MZ 80866

CONVENTIONS

SCIENCES DE LA VIE

AGROPÉDOLOGIE

N° 34

1996

Étude des risques de dégradation de la fertilité des sols et de pollution des lentilles d'eau douce

Note de synthèse de l'avenant 2

Thierry BECQUER
Céline DUWIG
Emmanuel BOURDON
Igor DUBUS
Véronique VINCENT
William NIGOTE
Bernard BONZON

Convention Province des Iles/ORSTOM
Avenant n°2 notifié le 14 mars 1995

F0 100 10312

L'INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE
POUR LE DÉVELOPPEMENT EN COOPÉRATION

ORSTOM

CENTRE DE NOUMÉA

CONVENTIONS

SCIENCES DE LA VIE

AGROPÉDOLOGIE

N° 34

1996

Étude des risques de dégradation de la fertilité des sols et de pollution des lentilles d'eau douce

Note de synthèse de l'avenant 2

Thierry BECQUER
Céline DUWIG
Emmanuel BOURDON
Igor DUBUS
Véronique VINCENT
William NIGOTE
Bernard BONZON

Convention Province des Iles/ORSTOM
Avenant n°2 notifié le 14 mars 1995

L'INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE
POUR LE DÉVELOPPEMENT EN COOPÉRATION

CENTRE DE NOUMÉA

© ORSTOM, Nouméa, 1996

/Becquer, T.
/Duwig, C.
/Bourdon, E.
/Dubus, I.
Vincent, V.
/Nigote, W.
/Bonzon, B.

Étude des risques de dégradation de la fertilité des sols et de pollution des lentilles d'eau douce. Note de synthèse de l'avenant 2

Nouméa : ORSTOM. Novembre 1996. 26 p.
Conv. : Sci. Vie ; Agropédol. ; 34

Ø76AGROØ5
NITRATE ; AZOTE ; POTASSIUM ; TRAVAIL DU SOL ; PRATIQUE CULTURALE ; ENRACINEMENT ; AMENDEMENT DU SOL ; LIXIVIATION ; LESSIVAGE ; BILAN HYDRIQUE ; BILAN MINERAL ; ENGRAIS MINERAL / LOYAUTE ILES ; MARE ILE

Imprimé par le Centre ORSTOM
Novembre 1996

ORSTOM Nouméa
REPROGRAPHIE

RESUME

Les suivis hydriques et minéraux menés à Maré montrent que les pertes de nitrate peuvent être très importantes, de 75 kg ha^{-1} à 150 kg ha^{-1} sur sol nu ou sous culture de maïs pour un apport de 104 kg d'azote ha^{-1}. Sous graminées pérennes, les pertes sont beaucoup plus limitées, de l'ordre de 40 kg ha^{-1}. Ces résultats montrent qu'il est souhaitable : d'éviter des apports d'engrais importants au semis ; de fractionner les apports en fonction des besoins de la plante ; éventuellement de localiser les apports à proximité des racines.

Par ailleurs, nos résultats montrent des variations induites par les travaux du sol sur l'enracinement des cultures et les vitesses de transferts hydriques. L'enracinement plus profond et plus dense sous graminées est susceptible d'expliquer la lixiviation plus réduite sous cette parcelle. Les modifications structurales observées entre la jachère, les graminées et les cultures induisent des variations importantes des paramètres hydrodynamiques. Toutefois, des mesures complémentaires sont encore nécessaires pour préciser et valider ces observations avant de pouvoir les intégrer dans les modèles de calcul des transferts hydriques et minéraux qui seront proposés.

Enfin, les interactions entre les différents éléments minéraux dans la nutrition des cultures devront être précisées. En particulier, l'effet des amendements phosphatés sur l'utilisation de l'azote et du potassium par les plantes et, par suite, les conséquences sur la lixiviation doivent encore être étudiés.

SOMMAIRE

1 - CADRE ET OBJECTIFS DES RECHERCHES 4

2 - TRAVAUX REALISES 5

3 - CARACTERISATION DE L'ETAT STRUCTURAL ET DE L'ENRACINEMENT DES VEGETAUX CULTIVES 6

3.1 - Introduction 6

3.2 - Matériel et méthodes 6

3.2.1 - Le champ d'expérimentation 6
3.2.2 - Les méthodes d'étude 6

3.3 - Résultats 7

3.3.1 - Caractérisation morphologique des volumes structuraux 7
3.3.2 - Cartographie des profils pénétrométriques et racinaires 7

3.4 - Discussion 11

3.5 - Conclusion 12

4 - RELATIONS ENTRE L'ETAT STRUCTURAL ET LES CARACTERISTIQUES HYDRAULIQUES DU SOL 12

41- Introduction 12

42 - Matériel et méthodes 13

4.3 - Résultats 14

4.3.1 - Répartition des tailles de pores pour différentes situations culturales 14
4.3.2 - Comparaison de la conductivité hydraulique et de la sorptivité capillaire pour différentes situations culturales 14
4.3.3 - Détermination de la conductivité hydraulique $K(\theta)$ à 40 cm de profondeur 17

4.4 - Conclusion 17

5 - SUIVI DES FLUX HYDRIQUES ET D'ELEMENTS MINERAUX 18

5.1 - Introduction 18

5.2 - Matériel et méthodes 18

5.2.1 - Matériel de mesure 18
5.2.2 - Méthodes de calcul 19

5.3 - Résultats 20

5.3.1 - Le bilan hydrique 20
5.3.1 - La lixiviation de l'azote 22

6- CONCLUSION 23

BIBLIOGRAPHIE 25

1 - CADRE ET OBJECTIFS DES RECHERCHES

Les pressions économiques et démographiques que subissent les Iles Loyauté ainsi qu'une certaine volonté de fixer les populations locales conduisent les agriculteurs à abandonner progressivement les techniques d'exploitation traditionnelles pour une agriculture plus intensive utilisant des engrais et des produits phytosanitaires. Ce type d'agriculture peut présenter un danger pour les écosystèmes insulaires particulièrement fragiles. En effet, l'utilisation en continu des sols risque de provoquer une diminution de leur teneur en matière organique et par suite une baisse de la fertilité, leur stabilité structurale et leur capacité d'échange cationique étant essentiellement liées à la matière organique (Becquer *et al.*, 1993). De plus, la mauvaise rétention par le sol de l'ion nitrate et des pesticides est susceptible d'induire une contamination de la lentille d'eau douce sous-jacente, qui constitue souvent la seule ressource en eau de ces atolls coralliens surélevés.

L'étude des risques de dégradation de la fertilité des sols et de pollution des lentilles d'eau douce a donc été entreprise en 1994, dans le cadre d'une convention de recherche entre la Province des Iles Loyauté et l'ORSTOM, avec le soutien financier du Fond de la Recherche et de la Technologie (F.R.T.), afin d'évaluer les risques liés à l'intensification de l'agriculture et de préciser les conditions pour obtenir une agriculture durable et respectueuse de l'environnement.

L'objectif de ce programme, qui doit durer 5 ans, est :

1°/ de mieux connaître l'évolution de la fertilité des sols au cours du temps et sous l'action de diverses pratiques agricoles. En particulier, nous analyserons, d'une part, l'évolution des caractéristiques morphopédologiques à la suite des travaux du sol et les conséquences sur les propriétés hydrodynamiques et l'enracinement des plantes, d'autre part, le fonctionnement du complexe d'échange et son évolution afin d'améliorer les nutritions potassique et phosphatée des plantes ;

2°/ de déterminer les conditions de nutrition optimale des végétaux afin de lever les carences en phosphore, silice et oligo-éléments (ou de limiter leurs effets) et

d'apprécier les conséquences de ces amendements et fertilisations sur les coefficients d'utilisation de l'azote et de la potasse.

3°/ de quantifier les risques de contamination des ressources en eau par les engrais azotés. Ceci nécessite de pouvoir établir à la fois des bilans d'eau et d'azote dans le système sol-plante. Les études précédentes et la comparaison des flux hydrochimiques sous différents systèmes de culture devraient permettre d'évaluer les risques liés à diverses pratiques et de proposer des solutions techniques les réduisant ;

4°/ d'estimer les risques de contamination par quelques pesticides. Ces études seront entreprises dans un second temps sur la base des connaissances acquises sur les transferts d'ions minéraux et sur les propriétés d'échange de ces sols.

2 - TRAVAUX REALISES

Au cours de la première année de travail (avenant n°1) les recherches avaient consisté essentiellement à tester et mettre en place sur le Centre d'Appui au Développement Agricole de Tawaïnèdre le matériel de suivi hydrique et minéral (tensiomètres, humidimètre TRASE, bougies poreuses, plaques lysimétriques...) (Becquer *et al.*, 1995). Seuls les premiers résultats, de janvier à mars 1995, avaient été présentés de façon assez succincte.

Cette note présente les principaux résultats acquis dans le cadre de l'avenant n°2, entre janvier 1995 et mars 1996. Trois axes complémentaires de recherche ont été développés :

• les caractérisations morphologique et physique des profils culturaux en relation avec l'enracinement des cultures ;

• l'étude de l'incidence des caractéristiques physiques sur les paramètres hydrodynamiques ;

• le suivi des transferts hydriques et chimiques réalisés en 1995, au cours de la première année d'observation.

L'ensemble de ces travaux ont été menés à bien grâce à une collaboration étroite avec le CIRAD et à l'appui du Service du Développement Économique de Maré et du GIE CORAWAGURO.

3 - CARACTERISATION DE L'ETAT STRUCTURAL ET DE L'ENRACINEMENT DES VEGETAUX CULTIVES

3.1 - Introduction

Les sols ferrallitiques allitiques développés sur les îles Loyauté ont une structure relativement fragile, susceptible d'être modifiée à la suite de passages successifs d'outils. Ces modifications peuvent être importantes par leur effet direct sur le développement des plantes, mais aussi par leurs conséquences sur le transfert de l'eau et des éléments minéraux (voir également Bourdon *et al.*, 1996). Les objectifs de ce travail sont donc dans un premier temps :

- d'observer les modifications structurales occasionnées par la mise en culture ;
- d'analyser l'importance de ces modifications sur la compacité du sol ;
- de relier cette dernière avec l'enracinement des cultures.

3.2 - Matériel et méthodes

3.2.1 - Le champ d'expérimentation

Diverses observations de profils culturaux ont été réalisées au cours des deux dernières années. Les résultats de observations réalisées en mars 1996, qui concernent trois parcelles de "l'essai système" et une parcelle maintenue en jachère sont présentés ici.

La première parcelle est une prairie de graminées (Rhode grass, *Chloris gayana* cv. Callide) de 2 ans, labourée avant l'installation de la culture. Les deux autres sont des parcelles de maïs (*Zea mays* cv. Hycorn 90) cultivées depuis 2 ans. La première subit un travail "lourd", avec un labour annuel avant le semis du maïs, effectué à la roue planteuse à la densité de 50 000 pieds ha^{-1}. La seconde est soumise à un travail "léger", sans labour, avec uniquement passage de disques, et semis à la canne planteuse en poquets de 2 graines, à la même densité que précédemment. La jachère est une jachère de longue durée à recrû arbustif.

3.2.2 - Les méthodes d'étude

L'étude du **profil cultural** (Hénin *et al.*, 1969 ; Manichon, 1982 ; de Blic 1990) dans les 40 premiers centimètres du sol permet de caractériser les différents **volumes structuraux**

qui le composent à partir, notamment, de la description de la structure, de la texture et de la couleur de chaque volume. La **compacité** du sol est mesurée par un pénétromètre de poche à aiguille cônique de type Yamanaka (Moreau et Nagumo, 1994) sur l'ensemble du profil en suivant une maille de 10 x 5 cm. Une représentation cartographique des données est réalisée à l'aide du logiciel SPYGLASS V3.0 (Spyglass, Inc.). L'**enracinement** a été évalué et cartographié à partir du relevé des impacts racinaires observés sur une face du profil (Tardieu et Manichon, 1986).

3.3 - Résultats

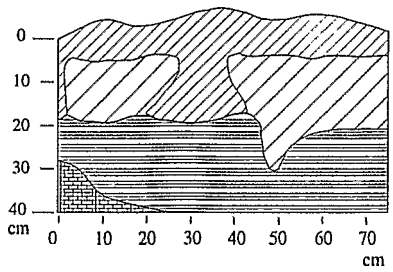
3.3.1 - Caractérisation morphologique des volumes structuraux

Une cartographie des volumes structuraux observés dans les différents profils étudiés est présentée sur la figure 1. La jachère est constituée de deux types d'horizons à structure très contrastée : un horizon de surface (0-12 cm), très humifère, à structures juxtaposées résultant de la coexistence d'agrégats grumeleux et d'éléments particulaires (Gr/Pa) ; les horizons sous-jacents, moins humifères, sont d'aspect massif (M). Sous culture, dans l'horizon de surface (0-10 cm), on observe un accroissement de la fraction particulaire par rapport à la fraction grumeleuse ou sub-anguleuse. En profondeur, le profil correspondant au "travail léger" est assez comparable au précédent. Par contre, le travail du sol "lourd" provoque une légère fragmentation de l'horizon intermédiaire (10-30 cm), où une structure subanguleuse à grumeleuse (Sa/Gr) peu nette se développe, l'horizon massif non modifié se trouvant à plus de 30 cm de profondeur.

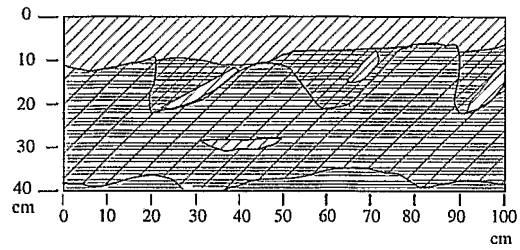
3.3.2 - Cartographie des profils pénétrométriques et racinaires

Les cartes des profils pénétrométriques et racinaires (Figure 2) donnent une représentation de la variation de la répartition, dans le profil, des zones plus ou moins compactes et de la densité des racines. A partir de ces données, des profils moyens de pénétrométrie et de densité racinaire ont été calculés (Figure 3). L'augmentation progressive de la compacité depuis les horizons de surface jusqu'à ceux de profondeur s'accompagne d'une diminution de la densité racinaire qui est presque nulle au delà de 40 cm. Le nombre de racines dans les horizons de profondeur ainsi que la profondeur d'enracinement sont légèrement supérieurs pour le système sous graminées. Ils sont toutefois similaires sous maïs (pas de différence significative pour $p = 0,05$) pour les deux types de travail du sol, hormis en surface où le nombre de racines est nettement plus élevé pour le travail minimum et correspond à un envahissement de la culture par les adventices.

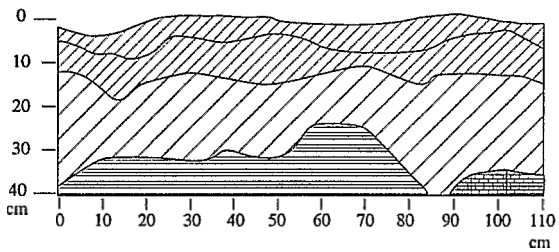
Parcelle sous végétation naturelle



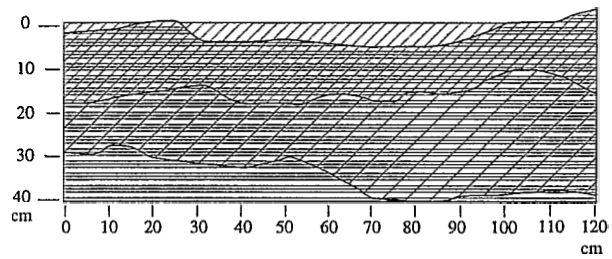
Parcelle sous graminées pérennes labourée à l'implantation



Parcelle sous maïs non labourée avant le semis



Parcelle sous maïs labourée avant le semis



Description morphologique des volumes structuraux élémentaires

Volume Pa GR : 2.5 YR 3/2 (rouge sombre) en frais ; structure particulaire dominante juxtaposée à une structure grumeleuse ; volume des vides très important inter-particulaires et inter-agrégats ; porosité intra-agrégats faible ; très meuble.

Volume Sa Gr : 2.5 YR 3/2 (rouge sombre) en frais ; structure subanguleuse moyenne à grossière juxtaposée à une structure grumeleuse fine à très fine ; volume des vides important inter-agrégats ; porosité intra-agrégats faible, quelques pores très fins ; meuble.

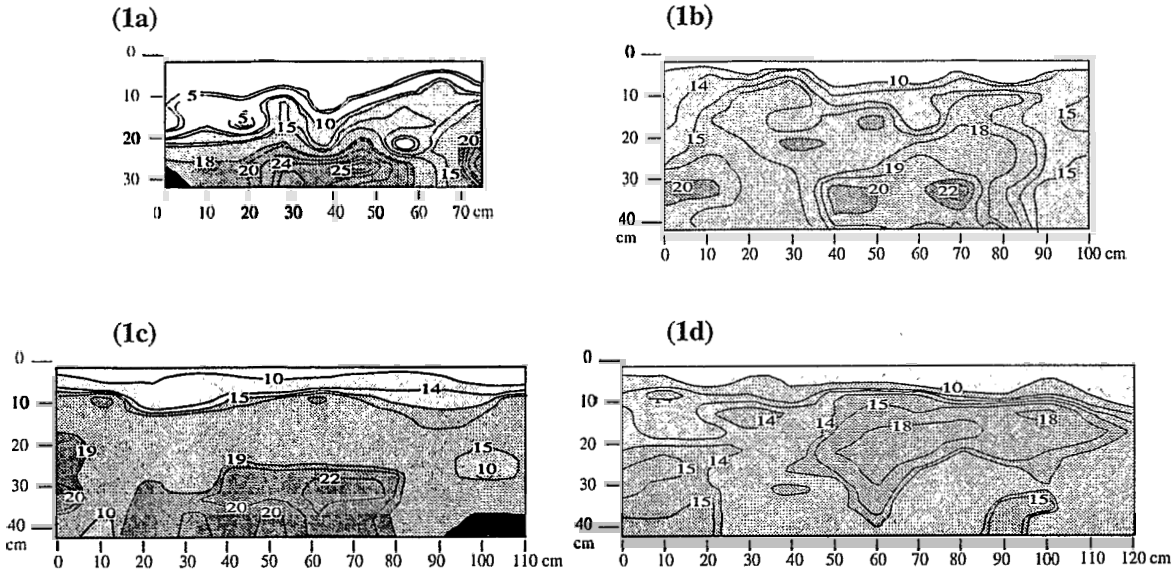
Volume MF (Sa) : 2.5 YR 3/2 à 3/4 (rouge sombre à brun rougeâtre foncé) en frais ; structure subanguleuse peu nette ; volume des vides assez faible, quelques fentes d'orientation quelconque ; porosité intra-agrégats faible, quelques pores très fins ; assez cohérent.

Volume M1 : 2.5 YR 3/2 à 3/4 (rouge foncé à brun rougeâtre foncé) en frais ; structure micro-agrégée d'aspect massif ; volume des vides faible ; porosité tubulaire, pores fins à très fins, rares à peu abondant traversant le volume ; meuble.

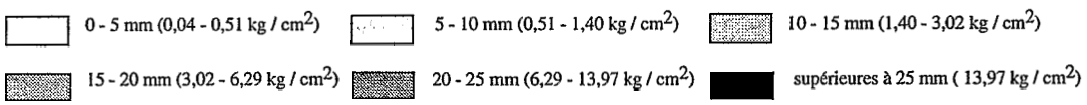
Volume M2 : 2.5 YR 3/6 (rouge foncé) en frais ; structure micro-agrégée d'aspect massif ; volume des vides faible ; porosité tubulaire, pores fins à très fins, peu abondant traversant le volume ; cohérent à très cohérent.

Volume K : roche mère (calcaire bio-détritique) faiblement consolidée à très forte porosité inter-granulaire.

Figure 1 : description morphologique et cartographie des volumes structuraux.



Valeurs de compacité ou de dureté, obtenues avec un pénétromètre de poche de type Yamanaka, à une humidité du sol proche de la capacité au champ



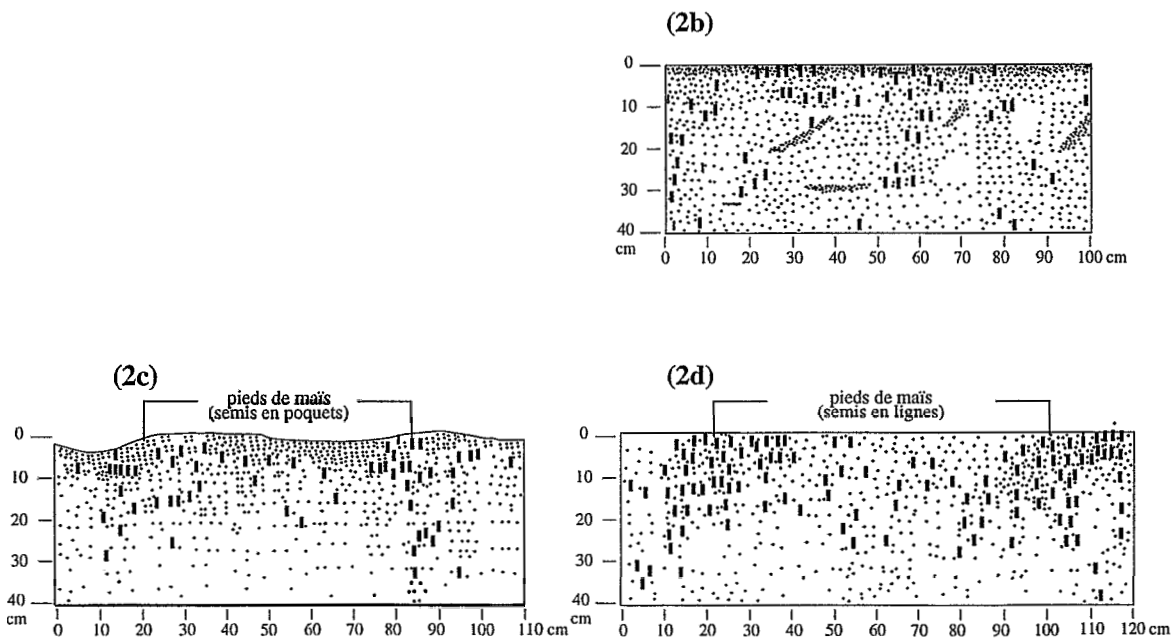
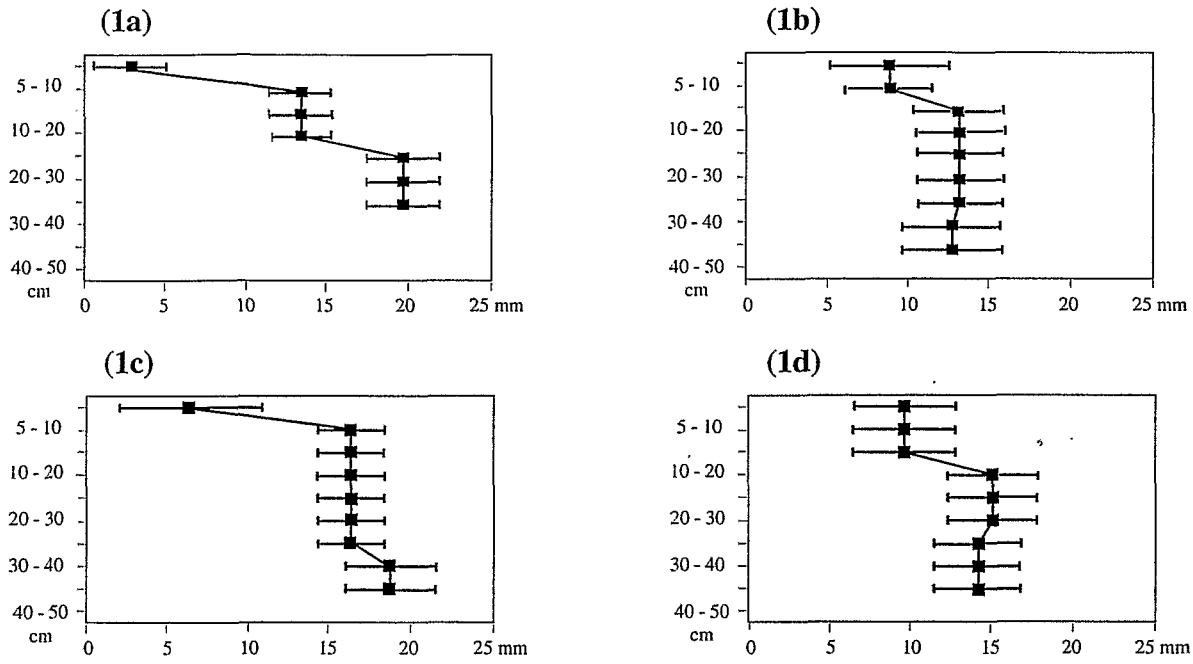


Figure 2 : cartographie de la compacité des volumes structuraux (1) et des profils racinaires (2) sous végétation naturelle (a), sous graminées pérennes labourées à l'implantation (b), sous maïs non labouré (c) et labouré (d).

Profil pénétrométrique (valeurs moyennes exprimées en mm d'enfoncement)



Profil racinaire (exprimé en nombre moyen de points d'impact par dm^2)

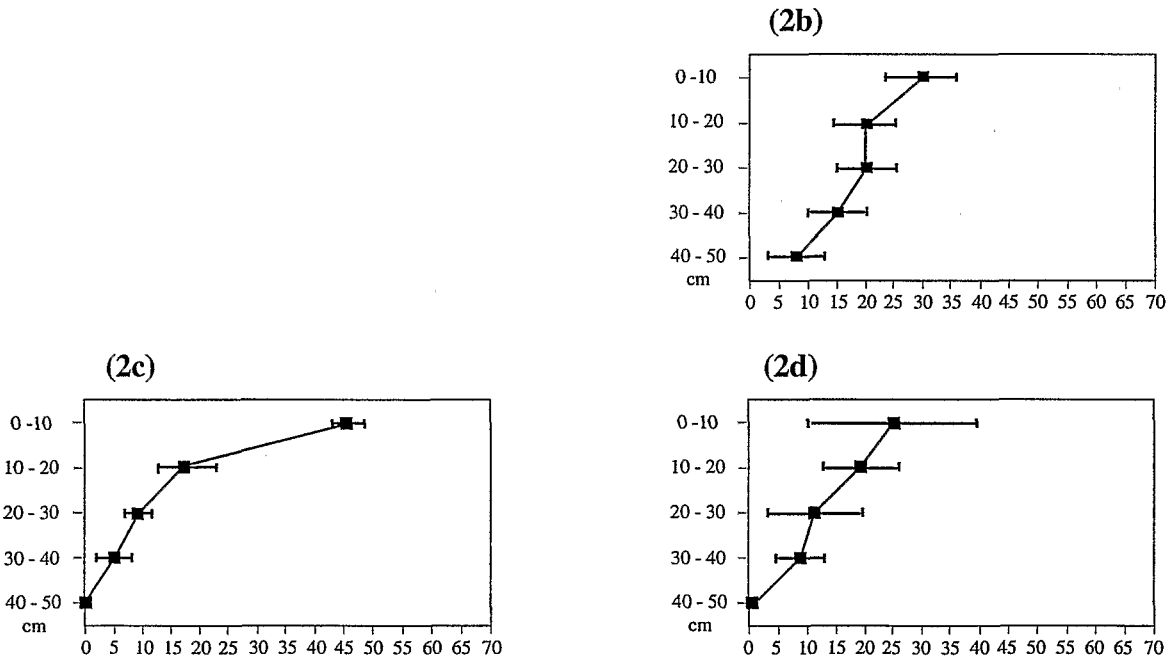


Figure 3 : comparaison entre la compacité moyenne (1) mesurée au pénétromètre Yamanaka et la densité racinaire (2) sous végétation naturelle (a), sous graminées pérennes (b), sous maïs non labouré (c) et maïs labouré à l'implantation (d).

3.4 - Discussion

Le travail du sol induit des modifications importantes de l'état structural du sol par rapport à l'état initial. En surface, quel que soit le type de travail du sol, il y a une destructuration qui se traduit par un accroissement important de la fraction particulaire par rapport à la fraction grumeleuse et une importante destructuration des structures biologiques. En profondeur, le labour se traduit par une légère fragmentation de l'horizon massif et l'apparition d'une structure sub-anguleuse, qui reste cependant peu développée. L'incorporation en profondeur de matière organique issue de l'horizon de surface peut également avoir un effet bénéfique sur la structuration. Cependant, cette incorporation par une charrue à disque reste généralement très localisée.

La cartographie pénétrométrique ne montre pas de modification importante de la compacité du sol entre les différents systèmes de culture, labourés ou non, par rapport à l'état initial. La compacité dépasse parfois 6,29 kg cm^{-2} (ou 20 mm) vers 35-40 cm de profondeur et est donc susceptible d'avoir un effet néfaste sur l'enracinement de diverses plantes cultivées (Moreau et Nagumo, 1994). Cependant, les comptages racinaires montrent une décroissance progressive de l'enracinement avec la profondeur, sans diminution brutale imputable à un horizon compact ou une zone compactée par le travail du sol. La compacité des sols ferrallitiques allitiques ne semble donc pas induire de problèmes importants sur l'enracinement des cultures.

Le nombre de racines dans les horizons de profondeur ainsi que la profondeur d'enracinement sont légèrement supérieurs pour le système sous graminées. Ce meilleur enracinement peut s'expliquer d'une part par l'ancienneté de la mise en place de la culture (culture pérenne de 2 ans pour la graminée, culture annuelle de 3 mois pour le maïs), d'autre part par une colonisation moins importante de l'inter-rang sous maïs. Pour les deux systèmes sous maïs, la densité des racines est similaire hormis en surface où, pour le système avec travail minimum, l'inter-rang est colonisé par de nombreuses adventices. Dans ce dernier cas, il faut également souligner que la densité racinaire moyenne correspond à deux pieds de maïs par ligne de semis (poquet). Le nombre de racines par pied et la colonisation du milieu est donc, en fait, deux fois plus faible. Toutefois, la croissance du maïs sur la parcelle avec travail minimum est nettement plus faible que celle observée sur parcelle labourée (Letournel et Corniaux, 1996). Comme nos résultats ne permettent pas de penser que les caractéristiques physiques du sol puissent expliquer cette différence, celle-ci serait donc, plus probablement, à rechercher au niveau de la disponibilité chimique des éléments minéraux dans le sol et d'une compétition entre les deux pieds de maïs d'un poquet.

3.5 - Conclusion

La caractérisation des profils culturaux sous jachère et sous différents modes de mise en culture des sols ferrallitiques allitiques des îles Loyauté met en évidence une modification importante de l'état structural, notamment dans l'horizon de surface. Toutefois, le type de travail du sol ne semble pas avoir une incidence majeure sur la compacité du sol et l'enracinement des cultures. En effet, la diminution de la densité racinaire avec la profondeur ne semble pas liée à l'existence d'horizons compacts ou de zones compactées par le travail du sol. Cependant, la croissance du maïs sur la parcelle avec "travail léger" est nettement plus faible que celle observée sur parcelle labourée. Les caractéristiques physiques du sol ne permettent pas d'expliquer cette différence, qui est donc, plus probablement, liée aux caractéristiques chimiques du sol ou à des phénomènes de compétition entre plantes.

L'incidence des caractéristiques structurales sur les propriétés physiques et hydrodynamiques du sol sont présentées ci-dessous (§4).

Divers points restent toutefois à préciser, en particulier :

• l'effet de la compétition entre les plantes devra être analysé en observant, pour les deux types de travail du sol, un semis en ligne et un semis en poquets de 2 graines ;

• l'effet du travail du sol sur les caractéristiques chimiques du sol, notamment sur la localisation du phosphore dans le profil et sa disponibilité pour les plantes.

Par ailleurs, l'évolution à moyen terme de ces diverses caractéristiques, physiques, chimiques ou biologiques, devra également être observée.

4 - RELATIONS ENTRE L'ETAT STRUCTURAL ET LES CARACTERISTIQUES HYDRAULIQUES DU SOL.

4.1 - Introduction

Les modifications structurales induites par le travail du sol (cf. ci-dessus) sont susceptibles d'agir sur le transfert de l'eau et des éléments minéraux. Les objectifs de cette deuxième étape de nos recherches sont donc de quantifier les principaux paramètres physiques agissant sur les transferts hydrauliques (Duwig *et al.*, 1996a ; Duwig *et al.*, 1996b) notamment :

- la conductivité hydraulique ;
- la sorptivité capillaire.

4.2 - Matériel et méthodes

La répartition des tailles de pores a été déterminée, sur chacun des volumes structuraux, à partir des courbes de rétention d'eau mesurées sur des cylindres de sol non perturbés. Après saturation par de l'eau, ces cylindres sont soumis à diverses succions sur une plaque à membrane et leur teneur en eau volumique est déterminée. L'équation de Laplace permet de relier chaque succion à un diamètre équivalent de pore. On peut ainsi d'obtenir une répartition volumique de chaque classe de pores.

La conductivité hydraulique a été déterminée (voir Duwig *et al.*, 1996b pour des détails méthodologiques) :

• **sur chacun des volumes structuraux identifiés précédemment**, à des teneurs en eau plus ou moins proche de la saturation. Ces déterminations ont été réalisées à l'aide d'un infiltromètre TRIMS. Elles ont pour objectif de comparer l'effet du travail du sol sur les vitesses d'infiltration de l'eau lors de pluies intenses.

• **à 40 cm de profondeur,** à des teneurs en eau variant entre la saturation et environ la capacité au champ. Deux méthodes complémentaires ont été utilisées :

- l'infiltromètrie TRIMS, pour des teneurs en eau proches de la saturation ;
- la méthode du "bilan naturel" ou "plan de flux nul" appliquée à la base du profil (Vachaud *et al.*, 1978) pour des teneurs en eau "plus courantes" (entre 0,2 et 0,4 $cm^3\ cm^{-3}$). Cette méthode est basée sur l'analyse des profils de teneurs en eau et de charges hydrauliques durant des périodes sans précipitations.

Ces mesures permettent d'établir une relation générale entre l'humidité du sol et la conductivité hydraulique $K(\theta)$ à la base du profil, ce paramètre intervenant dans le calcul du drainage.

La sorptivité capillaire a également été déterminée à l'aide de l'infiltromètre TRIMS (Duwig *et al.*, 1996b)

4.3 - Résultats

4.3.1 - répartition des tailles de pores pour différentes situations culturales.

La porosité totale est peu modifiée à la suite de la mise en culture. Par contre, l'importance de chaque classe de pores est fortement modifiée avec notamment (Figure 4) :

- la disparition des macropores supérieurs à 300 µm dans l'horizon de surface ;
- la diminution importante des pores de 10 à 300 µm concommitente de l'augmentation des micropores (inférieurs à 10 µm) dans l'ensemble des volumes structuraux des parcelles cultivées.

Ces modifications sont à mettre en parallèle avec l'augmentation de la fraction particulaire par rapport à la fraction grumeleuse et la destructuration des structures biologiques observées précédemment.

4.3.2 - Comparaison de la conductivité hydraulique et de la sorptivité capillaire pour différentes situations culturales.

La conductivité hydraulique et la sorptivité sont plus élevées, en surface, sous culture que sous jachère. La diminution de la macroporosité, après labour, pouvait laisser prévoir une baisse de la conductivité hydraulique. On observe, au contraire une augmentation de cette dernière. Le labour conduit à la constitution d'une porosité mieux connectée, avec des vides d'entassement entre les agrégats, alors que la porosité initiale, sous jachère, est issue essentiellement de l'activité biologique (racines, microfaune du sol...). De plus, l'écoulement de l'eau est très faible lorsque l'infiltromètre TRIMS est soumis à des succions de 5 et 15 cm d'eau. Nous supposons que ceci est dû à une certaine hydrophobicité liée à la teneur importante en matière organique de l'horizon de surface de la jachère.

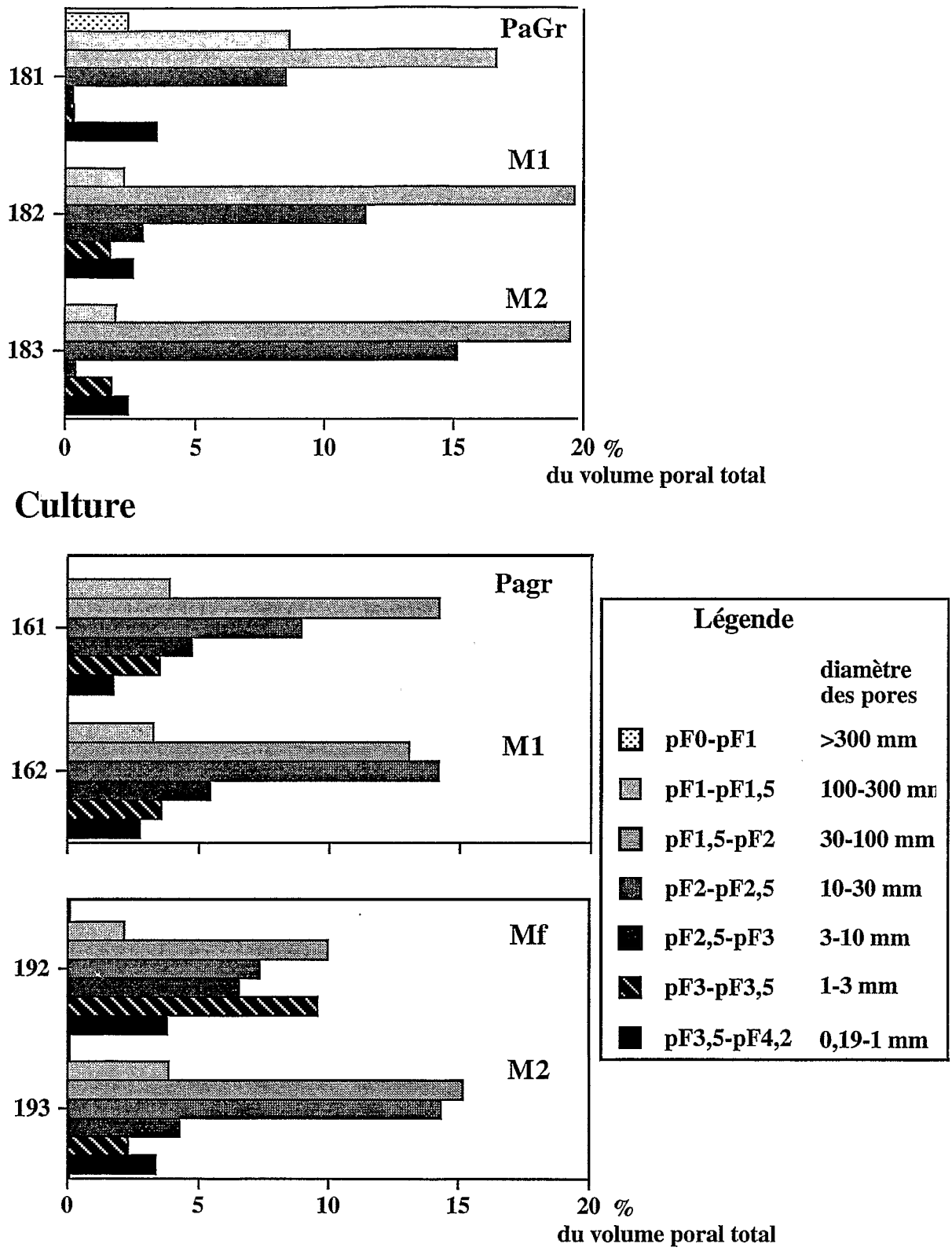


Figure 4 : répartition des classes de pores sous jachère et sous culture.

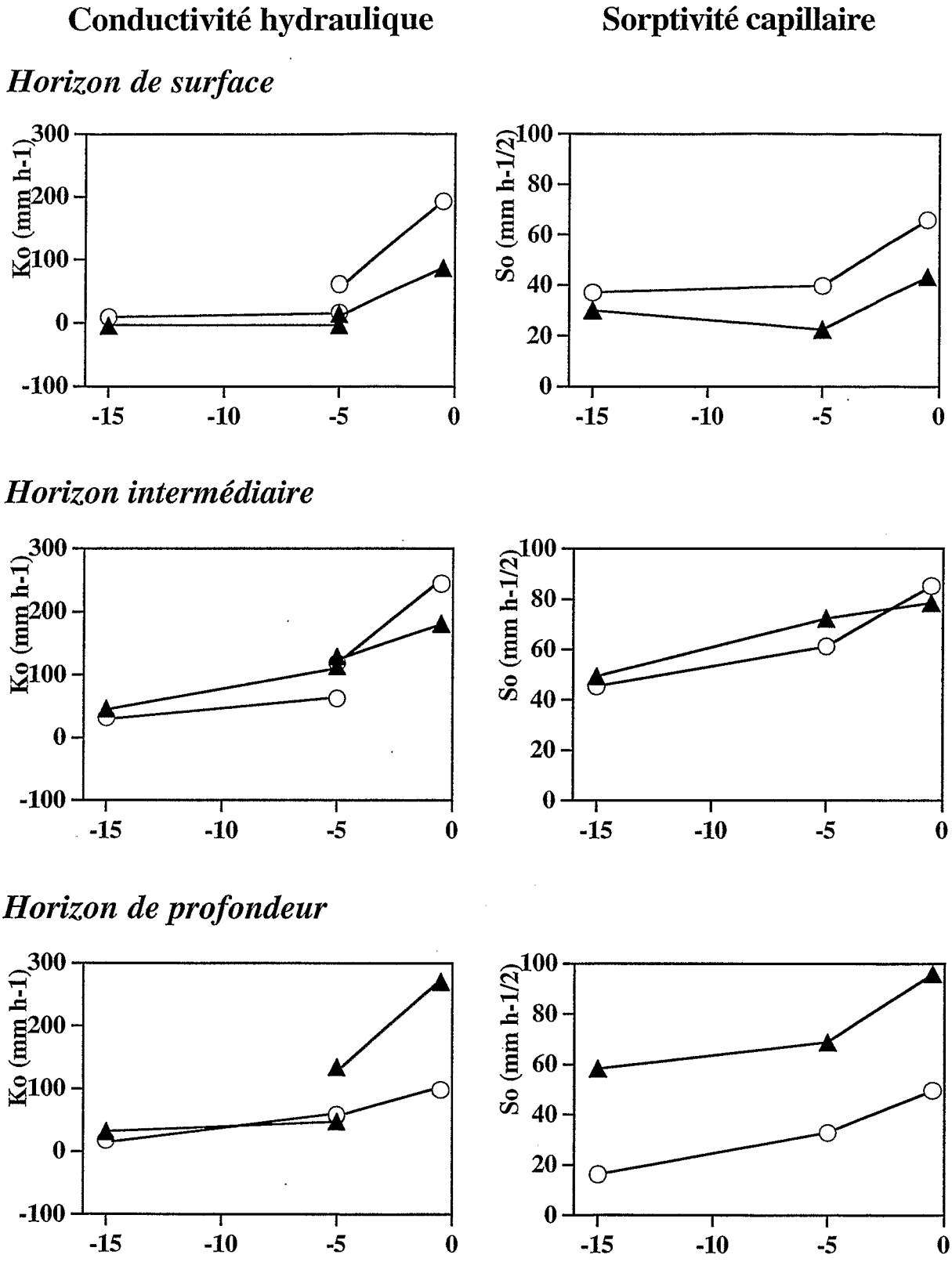


Figure 5 : Comparaison de la conductivité hydraulique et de la sorptivité capillaire sous jachère (▲) et sous culture (○) pour les horizons de surface, intermédiaire et de profondeur.

4.3.3 - Détermination de la conductivité hydraulique K(θ) *à 40 cm de profondeur*

A partir des deux séries de mesures réalisées avec l'infiltromètre TRIMS et la méthode du plan de flux nul, une relation entre la conductivité hydraulique et la teneur en eau peut être établie pour une gamme de variation importante de cette dernière. Nous nous sommes intéressés à la loi reliant K en fonction de θ à la profondeur de 40 cm (figure 6), qui va nous servir pour établir la quantité d'eau drainée à cette profondeur. Les données de K(θ) ont été réunies et une loi de la forme $K(\theta) = a\theta^b$ a été ajustée :

$K(\theta) = 3{,}60\ 10^5\ \theta^{13{,}06}$ $\quad r^2 = 0{,}87$, avec K(θ) en mm h^{-1}.

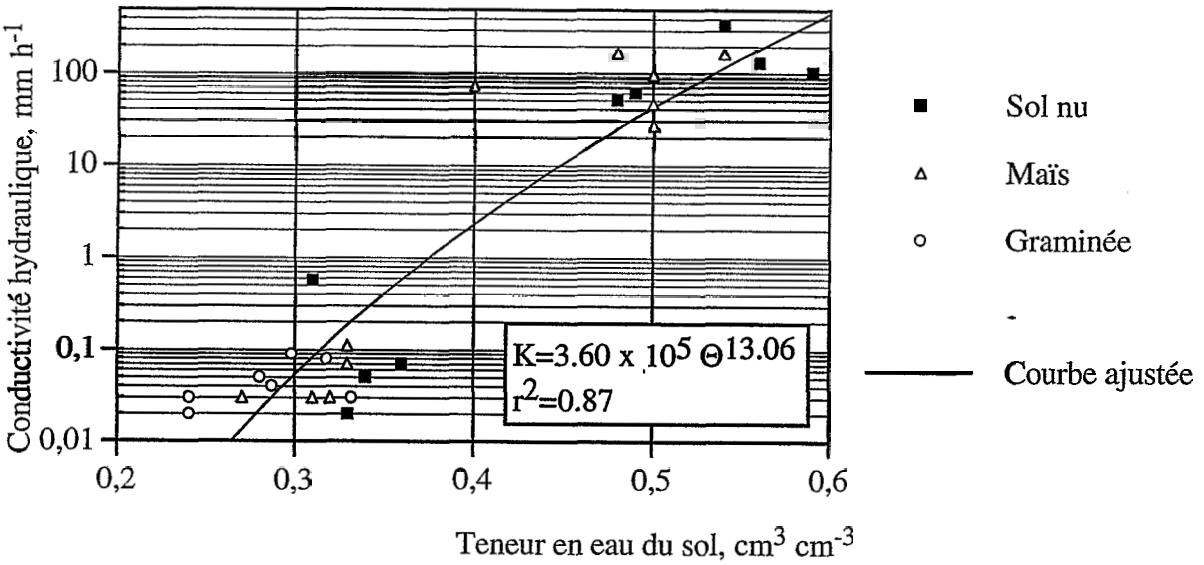


Figure 6 : Relation entre la conductivité hydraulique et la teneur en eau, toutes parcelles confondues

4.4 - Conclusions

La variabilité relativement importante des résultats ne nous permet pas, pour le moment, de déterminer :

- l'effet de chaque type de travail du sol ou de chaque type de culture ;
- l'évolution de ces paramètres au cours du cycle de culture.

Dans les résultats présentés sur les transferts d'eau et d'éléments minéraux, nous utilisons ces données qui sont encore provisoires. Des déterminations complémentaires, qui seront effectuées au cours des cycles de culture suivants permettront de préciser ces différents points et de fixer les valeurs de ces paramètres qui seront utilisés dans la modélisation des transferts hydriques et minéraux.

5 - SUIVI DES FLUX HYDRIQUES ET D'ELEMENTS MINERAUX.

5.1 - Introduction

Une utilisation accrue d'engrais, notamment azotés, est souvent nécessaire dans les systèmes de culture plus intensifs que les systèmes traditionnels. Dans les sols très perméables des îles Loyauté, les risques de pertes d'éléments minéraux par le système sol-plante sont élevés. Ces pertes se traduisent, d'une part par une mauvaise efficience de l'engrais, d'autre part, dans le cas de l'ion nitrate, par un risque de pollution de la lentille d'eau douce. Il est donc nécessaire de pouvoir suivre le devenir des engrais et notamment de quantifier la lixiviation du nitrate sous différents systèmes de culture afin d'estimer les risques de pollution encourus.

Parallèlement aux travaux présentés précédemment, un suivi de la quantité de nitrate lixivié sous la zone racinaire a donc été effectué durant la saison des pluies de janvier à juin 1995 (Duwig *et al.*, 1996b ; Duwig *et al.*, 1996c). L'objectif de ce travail était à la fois de suivre la quantité d'eau drainée et la concentration en nitrate des eaux d'infiltration.

5.2 - Matériel et méthodes

5.2.1 - Matériel de mesure

Les observations ont été réalisées sur "l'essai système" conduit par le CIRAD sur le Centre d'Appui au Développement Agricole de Tawaïnèdre. Quatre parcelles ont été choisies pour suivre les flux hydriques et minéraux :

- une parcelle sol nu (P2), qui sert de référence ;
- une parcelle en rotation maïs-patate douce / maïs-patate douce (P3) ;
- une parcelle en rotation maïs-légumineuse / igname-légumineuse (P6) ;
- une parcelle sous graminées pérennes (P5).

Toutes les quatre reçoivent une fumure minérale "haute" (F2) correspondant à un apport de 800 kg ha^{-1} de 13-13-21 (N, P_2O_5, K_2O) et sont soumises à un travail du sol "lourd" (labour et semis mécanisés). L'engrais a été apporté en un seul apport sur toutes les parcelles au semis du maïs (le 11 janvier 1995).

Les parcelles ont été équipée afin de suivre l'humidité du sol et les concentrations des solutions du sol avec :

- une station automatique d'acquisition des données météorologiques permettant le calcul de l'ETP Penman-Monteith ;
- un pluviographe enregistreur ;
- un appareil de T.D.R. (TRASE de Soil Moisture) pour la mesure de l'humidité du sol avec des sondes placées à 10, 20, 30, 40 cm de profondeur (2 répétitions par parcelle) ;
- des tensiomètres placés à 5 niveaux, 10, 20, 30, 40, 60 cm (3 séries par parcelle) pour suivre la charge hydraulique (ou pression de l'eau dans le sol) ;
- des bougies poreuses placées à 10 et 40 cm de profondeur (8 par niveau pour chaque parcelle) pour prélever les solutions du sol.

Les prélèvements de solution sont réalisés chaque semaine et les mesures hydriques tous les 2 jours.

5.2.2 - Méthodes de calcul

Le bilan hydrique, calculé à partir de l'équation de conservation de la masse, permet de déterminer l'ETR :

$$ETP = P - R - Dr - \Delta S$$

avec :

S : le stock d'eau dans le profil étudié,
P : la pluie incidente,
R : le ruissellement (nul, étant donné les valeurs de conductivité hydraulique bien supérieures aux intensités maximales des pluies),
Dr : le drainage à la base du profil,
ETR : l'évapotranspiration réelle.

et le drainage, Dr, calculé à partir de la loi de Darcy :

$$\Delta Dr = q.\ \Delta t = -\ K(\theta).gradH.\Delta t,$$

avec :

q : le flux hydrique, en mm j^{-1}, pendant l'intervalle de temps t,
K(θ) : la conductivité hydraulique à la teneur en eau θ, à 40 cm de profondeur,
gradH : le gradient de charge hydraulique à la même profondeur.

Le calcul du drainage n'a été effectué que pendant les périodes de gradient de charge négatif à 40 cm (ce qui implique un flux d'eau vers le bas). Nous n'avons donc pas considéré les périodes où des éventuelles remontées capillaires pouvaient intervenir.

L'ETR a aussi été à partir de l'ETP Penman-Monteith (DUWIG *et al.*, 1996a[Duwig, 1996 #54]) et cette valeur a été comparée à celle obtenue par le bilan hydrique.

Finalement, les flux minéraux lixiviés au-delà de 40 cm sont obtenus par la relation :

$$q_L = Dr\ C$$

avec :

q_L : le flux lixivié,
Dr : le drainage,
C : la concentration de l'élément dans la solution prélevée à 40 cm, en mg l^{-1}.

5.3 - Résultats

Les résultats du suivi des différents paramètres sont présentés en détail dans Duwig *et al.* (1996b). Les résultats des bilans hydriques et minéraux pour les 4 parcelles suivies et pour les 4 périodes où un drainage a été observé sont présentés dans le tableau 1.

5.3.1 - Le bilan hydrique

La comparaison entre l'ETR calculée par le bilan d'eau et l'ETR estimée à partir de l'ETP Penman-Monteith donne des résultats proches, ce qui valide le calcul du drainage par la loi de Darcy.

Parcelle P2

Date	29/01 au 08/02	24/02 au 13/03	03/04 au 14/04	15/04 au 5/05
Pluie, mm	179,4	104,8	65,9	127
ETP, mm	67	82	49	85
ETR estimée, mm	31	52	21	54
Variation du stock, mm	10	30	10	10
drainage mm	141	25	34	62
ETR calculée, mm	29	50	22	55
(N-NO3) mg/l	32,46	24,50	23,77	25,70
(N-NH4) mg/l	0,15	0,16	0,02	0,07
QI (N-NO3) mg/m2	4577	618	804	1596
QI (N-NH4) mg/m2	21	4	1	4

Parcelle P3

Date	29/01 au 08/02	24/02 au 13/03	03/04 au 14/04	15/04 au 28/04
Pluie, mm	179,4	104,8	65,9	117,5
ETP, mm	67	82	49	53
ETR estimée, mm	31	52	21	39
Variation du stock, mm	5	27	10	10
drainage mm	141	37	38	62
ETR calculee, mm	33	41	18	46
(N-NO3) mg/l	82,00	56,00	24,71	23,00
(N-NH4) mg/l	0,12	0,12	0,05	0,10
QI (N-NO3) mg/m2	11598	2082	929	1416
QI (N-NH4) mg/m2	17	4	2	6

Parcelle P5

Date	29/01 au 08/02	24/02 au 13/03	03/04 au 14/04	15/04 au 05/05
Pluie, mm	179,4	104,8	65,9	127
ETP, mm	67	82	49	85
ETR estimée, mm	31	52	21	54
Variation du stock, mm	10	38	10	10
drainage mm	132	35	22	63
ETR calculée, mm	37	31	29	54
(N-NO3) mg/l	31,05	0,14	0,00	0,05
(N-NH4) mg/l	2,25	0,09	0,00	0,30
QI (N-NO3) mg/m2	4104	5	0	3
QI (N-NH4) mg/m2	297	3	0	19

Parcelle P6

Date	29/01 au 08/02	24/02 au 13/03	03/04 au 10/04	15/04 au 28/04
Pluie, mm	179,4	104,8	65,9	117,5
ETP, mm	67	82	36	53
ETR estimée, mm	31	52	19	39
Variation du stock, mm	20	9	15	10
drainage mm	128	53	26	64
ETR calculée, mm	31	43	25	43
(N-NO3) mg/l	62,09	52,00	70,21	32,00
(N-NH4) mg/l	0,74	0,08	0,06	0,25
QI (N-NO3) mg/m2	7977	2746	1850	2060
QI (N-NH4) mg/m2	95	4	2	16

Tableau 1 : bilan en eau et détermination de l'ETR - comparaison avec l'ETP Penman-Monteith, calcul de l'azote lixivié

Le drainage lors de la première pluie (170 mm en 8 heures, l'intensité maximale étant de 50 mm/h) correspond à environ 70 à 78 % de la pluie incidente selon les parcelles, alors que celui-ci est beaucoup plus faible, comparativement à la pluie, pour les autres épisodes pluvieux. Ceci est bien sûr lié à la conductivité hydraulique du sol qui augmente exponentiellement en fonction de la teneur en eau du sol. La conductivité de ce sol de Maré est moyenne pour des teneurs en eau courantes (0,2 à 0,3 cm^3 cm^{-3}) et élevée pour des teneurs en eau proches de la saturation, par rapport aux valeurs obtenues pour d'autres types de sol (Poss, 1991 ; Kengni, 1993).

5.3.2 - La lixiviation de l'azote

Les teneurs moyennes en azote (nitrate, ammonium) des solutions du sol collectées avec les bougies poreuses ainsi que les quantités de nitrate et d'ammonium lixiviés sont présentées dans le tableau 1.

On remarque en premier lieu une lixiviation très importante lors de la première période de drainage correspondant à la première pluie après l'apport d'engrais, et ceci sur toutes les parcelles. La lixiviation du nitrate sur les parcelles P2 (sol nu), P3 et P6 varie fortement bien que l'on pouvait espérer obtenir les mêmes ordres de grandeur, le maïs ayant encore une action négligeable sur les flux hydrochimiques dans les deux dernières parcelles. Par ailleurs, les mesures de profils d'azote, effectués en parallèle, montrent que les stocks d'azote avant et après la pluie sont à peu près identiques sur P2, P3 et P6. Ces résultats variables peuvent s'expliquer par le fait que nous n'avons récolté qu'un nombre limité d'échantillons avec les bougies poreuses car les prélèvement d'eau deviennent très faibles dès que la tension du sol dépasse 400 hPa, ce qui est souvent le cas 8-10 jours après la pluie. De ce fait, les diverses périodes de drainage ne sont caractérisées que par 1 ou 2 prélèvements de solution du sol, ce qui est insuffisant pour évaluer correctement la concentration des solutions qui drainent. **La lixiviation du nitrate sous maïs jeune ou sol nu est cependant 2 fois plus importante que sous graminées (plante active), avec respectivement 80 et 41 kg ha^{-1} lixiviés, après cette première pluie.**

Pour les autres périodes de drainage, le flux lixivié sur P5 (graminées pérennes) est nul alors qu'il reste important sur les autres parcelles (de 30 à 65 kg ha^{-1}). La lixiviation reste importante sous maïs. Ceci dénote une efficacité moindre du maïs, comparativement aux graminées, à utiliser l'azote du sol. Nous avons en effet pu observer une colonisation racinaire assez faible des inter-rang sous maïs (Figure 2). Toutefois, nous ne disposons pas, pour le moment, d'estimation de l'absorption d'azote par les plantes et de la minéralisation par le sol pour réaliser un bilan.

6 - CONCLUSION

Ces résultats confirment les craintes que l'on pouvait avoir concernant la grande sensibilité de ce sol vis-à-vis de la lixiviation des éléments minéraux. Les pertes d'azote minéral sont très importantes sur toutes les parcelles après la première pluie du cycle cultural (170 mm en 8 heures). La lixiviation du nitrate diminue nettement au cours des épisodes pluvieux suivants, en raison d'un drainage beaucoup plus faible et de la concentration en nitrate qui diminue. Ces pertes peuvent être estimées à 45 kg ha^{-1} sur sol nu et 95 kg ha^{-1} sur maïs après le premier épisode pluvieux de fin janvier, et à 75 kg ha^{-1} sur sol nu et 150 kg ha^{-1} sur maïs sur l'ensemble du cycle pour un apport d'engrais de 104 kg d'azote ha^{-1}. La lixiviation du nitrate peut, dans certains cas, excéder l'apport d'engrais du fait d'une production non négligeable par la minéralisation de l'azote du sol. La parcelle de graminées a subi, par contre, des pertes plus limitées de l'ordre de 40 kg ha^{-1} (soit environ 40 % de l'apport) après la première pluie. Les pertes lors des pluies suivantes sont quasiment nulles.

Les résultats précédents montrent qu'une plante active est capable d'absorber une quantité importante d'engrais lors d'épisodes pluvieux modérés et ainsi de limiter les pertes par lixiviation. Par contre, lors de pluies très intenses, des pertes peuvent avoir lieu même sous ce type de culture. Il est donc souhaitable :

- d'éviter des apports d'engrais importants au semis,
- de fractionner les apports en fonction des besoins de la plante,
- éventuellement de localiser les apports à proximité des racines.

Les résultats actuels ne nous permettent pas de faire un bilan minéral correct. En particulier :

- la mesure des concentrations d'azote dans les solutions du sol devra être précisée par des prélèvements plus nombreux (tous les 2 jours environ pendant les périodes de drainage important), ce qui nous conduira à installer plusieurs séries de bougies poreuses sur chaque parcelles ;

- l'estimation de la production de nitrate à partir de la minéralisation de la matière organique devra être réalisée (travail en cours). Cette première étude a dès à présent montré que la nitrification était efficace car l'ammonium disparaît rapidement du profil et reste à des niveaux faibles dans la solution du sol.

Par ailleurs, nos résultats montrent des variations induites par les travaux du sol sur l'enracinement des cultures et les vitesses de transferts hydriques. Toutefois, ces variations n'ont pas été prises en compte dans les calculs de drainage. L'estimation des différents paramètres hydriques pour les diverses situations morpho-pédologiques observées ou pour les

divers itinéraires techniques utilisés nécessitent d'être précisés avant de pouvoir les intégrer dans les modèles de calcul des transferts hydriques et minéraux qui seront proposés.

Enfin, malgré leur teneur élevée en phosphore total, les sols ferrallitiques allitiques des Loyauté sont assez fortement carencés en cet élément ainsi que l'a montré l'expérimentation en serre conduite en 1994 : pour mémoire, environ 4 t ha^{-1} de P_2O_5 doivent être appliqués aux 3000 t ha^{-1} de terre de l'horizon arable 0-30 cm pour lever cette déficience induite par la fixation très énergique du phosphore sur les oxydes de fer et d'aluminium. Il devrait en résulter une amélioration de l'absorption de l'azote et du potassium et, par voie de conséquence, une diminution de leur lixiviation. Cette amélioration de l'absorption d'azote et de potassium pourrait être recherchée également par une amélioration du statut de la silice et l'application d'oligoéléments, les sols des Loyauté présentant, certainement pour la majeure partie des espèces cultivées, des carences en ces nutriments. Des études expérimentales en serre, puis au champ, devront donc être mises en place rapidement pour apprécier l'importance des conséquences de ces amendements et fertilisations sur les coefficients d'utilisation de l'azote et de la potasse.

BIBLIOGRAPHIE

Becquer, T., E. Bourdon et J. Pétard (1993). Contribution à l'étude des sols de Maré : les sols du Centre d'Appui au Développement Agricole de Tawaïnèdre et de Taodé. 2- Caractérisation physico-chimique des sols. Nouméa : ORSTOM. Conv. : Sci. Vie : Agropédol., 24 ; 63p., multigr.

Becquer, T., C. Duwig, E. Bourdon, B. Bonzon, G. Guenec et J. Danloux (1995). Etude des risques de dégradation de la fertilité des sols et de pollution des lentilles d'eau douce. Note de synthèse de l'avenant n°1. Nouméa : ORSTOM. Conv. : Sci. Vie : Agropédol., 29, 19p., multigr.

Blic, P. de (1990). L'examen du profil cultural : un outil pour mieux comprendre le comportement du sol soumis à des travaux aratoires. Organic matter management and tillage in humid and subhumid Africa., Bangkok, IBSRAM Proceedings.

Bourdon, E., C. Duwig, T. Becquer, F. Letournel et D. Blavet (1996). Etat structural et enracinement des végétaux cultivés sur sols ferrallitiques allitiques des Iles Loyauté (Nouvelle-Calédonie). Atelier "Interactions entre itinéraires techniques, performances des equipements et profil cultural, CIRAD, Montpellier, 11-12 septembre 1996.

Duwig, C., T. Becquer, E. Bourdon, P. d. Blic, B. E. Clothier et M. Vauclin (1996a). Oxisols structure and water movement on the Island of Maré (Loyalty Islands, New-Caledonia). Western Pacific Geophysics Meeting, 23-27 juillet 1996, Brisbane, Australie,

Duwig, C., T. Becquer, E. Bourdon, W. Nigote et L. Taputuarai (1996b). Suivi hydro-chimique sous différents systèmes de culture à Maré. Documents Scientifiques et Techniques, III1.

Duwig, C., T. Becquer, B. E. Clothier et M. Vauclin (1996c). Nitrate leaching in the Loyalty Islands (New Caledonia) under intensified agricultural practices. First International Conference on Contaminants in the Soil Environment in the Australasia-Pacific Region, 18-23 février 1996, Adelaide, Australia, Kluwer Academic Publishers.

Hénin, S., R. Gras et G. monnier (1969). Le profil cultural. Paris, Masson.

Kengni, L. (1993). Mesure in-situ des pertes d'eau et d'azote sous culture de maïs irriguée. Application à la plaine de la Bièvre (Isère). Thèse, Université Joseph Fourier (UJF) - Grenoble.

Letournel, F. et C. Corniaux (1996). Essai d'intensification et mécanisation de l'agriculture et protection de l'environnement sur île coralienne. CIRAD (à paraître).

Manichon, H. (1982). L'action des outils sur le sol : appréciation de leurs effets par la méthode du profil cultural. Sc. Sol : 203-219.

Moreau, R. et F. Nagumo (1995). Le pénétromètre Yamanaka et son utilisation pour l'évaluation des possibilités d'enracinements dans les horizons des sols cultivés. 2éme Réunion du Groupe Thématique "Structure et Fertilité des Sols Tropicaux", Montpellier, ORSTOM.

Poss, R. (1991). Transferts de l'eau et des minéraux dans les terres de Barre du Togo. Conséquences agronomiques. Thèse, Univ. Paris VI.

Tardieu, F. et H. Manichon (1986). Caractérisation en tant que capteur d'eau de l'enracinement du maïs en parcelle cultivée. II- Une méthode d'étude de la répartition verticale et horizontale des racines. Agronomie **6**(5): 415-425.

Vachaud, G., C. Dancette, S. Sonko et J. L. Thony (1978). Méthodes de caractérisation in situ d'un sol non saturé. Application à deux types de sol du Sénégal en vue de la détermination des termes du bilan hydrique. Ann. Agron. **29**: 1-36.