

CONVENTIONS  
SCIENCES DE LA VIE  
AGROPÉDOLOGIE

N° 38

1997

Suivi hydro-chimique sous différents systèmes  
de culture à Maré : résultats de l'année 1996

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

Convention Province des Iles Loyauté/ORSTOM  
N° 04/94 notifiée le 9 mars 1994  
Avenant n°3 du 6/2/1997

CONVENTIONS  
SCIENCES DE LA VIE  
AGROPÉDOLOGIE

N° 38

1997

Suivi hydro-chimique sous différents systèmes de  
culture à Maré : résultats de l'année 1996

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

Convention Province des Iles Loyauté / ORSTOM  
N° 04/94 notifiée le 9 mars 1994  
Avenant n°3 du 6/2/1997



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

CENTRE DE NOUMÉA

## RESUME

Le cycle cultural étudié au cours de l'année 1995 nous avait permis d'identifier les risques posés par l'utilisation d'engrais azotés sur la pollution des lentilles d'eau douces. En tenant compte des conclusions de l'année dernière, les mêmes parcelles ainsi que quatre autres ont été choisies en 1996 pour l'étude des bilans hydriques et minéraux.

Nous avons aussi pu comparer différents systèmes de culture sur le plan des caractéristiques morphologiques et hydrodynamiques ainsi que sur le plan des transferts d'eau et d'éléments minéraux.

Au bout de trois ans de mise en culture, nous n'avons pas observé de différences significatives entre les caractéristiques hydrodynamiques des différents systèmes de culture. Le bilan hydrique, surtout au cours de ce cycle très pluvieux, est très similaire d'une parcelle à l'autre. Par contre, le couvert végétal a une incidence très marquée sur les concentrations et donc sur les flux d'azote et de potassium au-dessous de la zone racinaire.

Il est donc possible de limiter les risques de pollution des lentilles d'eau douce en prenant en compte différentes données (climatiques, type, stade et densité du couvert végétal) pour le raisonnement des apports d'engrais.

## AVANT-PROPOS

Les pressions économiques et démographiques que subissent les Iles Loyauté, ainsi qu'une volonté de fixer les populations, notamment les jeunes, sur les îles rend nécessaire un abandon progressif des techniques d'exploitation traditionnelles pour une agriculture plus intensive.

Cependant, ce type d'agriculture n'est pas sans poser un certain nombre de problèmes. 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.), intitulée "**Etude des risques de dégradation de la fertilité des sols et de pollution des lentilles d'eau douce**". Celle-ci vise à évaluer les risques liés à l'intensification de l'agriculture et à préciser les conditions pour obtenir une agriculture durable et respectueuse de l'environnement.

Ce document est le second volet de l'étude des flux hydriques et minéraux réalisée sous diverses parcelles du Centre d'Appui au Développement Agricole de Tawaïnèdre. Après la présentation des résultats obtenus en 1995 et des méthodes utilisées dans un précédent document (Duwig *et al.*, 1993), ce rapport fait le point des résultats obtenus en 1996.

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.

Les analyses chimiques ont été réalisées par les personnels du Laboratoire Commun d'Analyse de l'ORSTOM-Nouméa sous la responsabilité de J.L. Duprey.

La duplication de ce rapport a été confiée à l'atelier de reprographie du Centre ORSTOM de Nouméa (responsable : J.P. Mermoud).

## SOMMAIRE

RESUME .....	1
AVANT-PROPOS.....	3
SOMMAIRE .....	5
INTRODUCTION.....	7
1- SITUATION DE L'ETUDE.....	7
1.1 - Choix des parcelles.....	8
1.2 - Matériels utilisés.....	9
1.2.1 - Etalonnage de la TDR.....	9
1.2.2 - Etalonnage du radiomètre.....	12
1.3 - Climatologie .....	13
2 - CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DU SOL .....	14
2.1 - Caractéristiques statiques.....	14
2.1.1 - Cartographie et caractérisation morphologiques des volumes structuraux.....	14
2.1.2 - Densité apparente.....	15
2.1.3 - Répartition porale, indice des vides.....	15
2.1.4 - Courbes de rétention en eau.....	20
2.2 - Caractéristiques dynamiques.....	22
2.2.1 - Infiltrométrie.....	22
2.2.2 - Relation entre la conductivité hydraulique et la teneur en eau.....	25
2.3 - Comparaison des résultats, discussions et conclusion.....	26
2.3.1 - En surface.....	26
2.3.2 - En profondeur .....	26
2.3.3 - Conclusion.....	26
3. BILANS HYDRIQUES ET MINERAUX .....	27
3.1 - Bilan hydrique.....	27
3.2 - Bilan d'éléments minéraux .....	30
3.3 - Conclusion .....	33
4. CONCLUSION GENERALE .....	35
BIBLIOGRAPHIE.....	36

## INTRODUCTION

La problématique de l'étude est d'ajuster au mieux la fertilisation des cultures, pour parvenir à une agriculture plus intensive et respectueuse de l'environnement, notamment des lentilles d'eau douce présentes dans le soubassement corallien de cet atoll surélevé. Cette recherche est d'autant plus importante que les sols ferrallitiques allitiques, qui constituent les principaux sols cultivables des Iles Loyauté, sont particulièrement fragiles vis à vis de l'intensification de l'agriculture. Ils sont très perméables et retiennent peu la plupart des éléments minéraux. Ceci peut induire d'une part une mauvaise efficacité des engrais apportés aux cultures et d'autre part, des risques de pollution des lentilles d'eau douces. Parmi les éléments majeurs apportés aux cultures (N, P, K) seuls l'azote et le potassium sont susceptibles d'être rapidement perdus par lixiviation.

Après la première année de mesures où ont été plus particulièrement étudiés les termes du bilan en eau et en azote, une deuxième année a été entreprise pour continuer l'étude des bilans d'eau et d'éléments minéraux (azote et potassium) sous différentes conditions climatiques. De plus, des expériences et des mesures particulières ont été effectuées pour étudier les processus physico-chimiques déterminants dans le transport des éléments minéraux.

L'objectif principal de ce rapport est donc de définir au mieux les termes des bilans hydriques, azotés et en potassium sous divers systèmes de cultures (rotation des cultures, travail du sol et niveau de fertilisations minérales et organiques variables).

Deux composantes sont nécessaires pour évaluer les flux minéraux :

- la mesure des flux hydriques ;
- la détermination de la teneur des solutions en éléments minéraux.

Trois niveaux d'observation doivent être pris en compte dans l'analyse :

- les entrées du système (pluies et apports d'engrais) ;
- les sorties (évapotranspiration, consommation par la plante, drainage, lixiviation) ;
- les flux internes (adsorption/désorption, immobilisation/minéralisation-nitrification). Ces derniers font l'objet d'autres travaux et n'ont pas été pris en compte dans l'établissement des bilans minéraux.

### 1- SITUATION DE L'ETUDE

Les objectifs de l'étude lors du cycle cultural de l'année 1995 ont bien entendu été poursuivis. La répétition des mesures sur plusieurs cycles permet avant tout de prendre en compte la variabilité des conditions climatiques, mais aussi d'étudier l'évolution des paramètres étudiés au cours du temps. Cette année nous a aussi servi à élargir notre champ d'étude, et à améliorer nos connaissances du sol et des processus physico-chimiques déterminant le transport des engrais azotés.

Dans ce premier paragraphe sont présentés les parcelles étudiées, les nouvelles connaissances acquises sur le matériel, et la climatologie, paramètre indispensable dans l'étude du cycle de l'eau.

## 1.1 - Choix des parcelles

Le choix des parcelles étudiées en 1996 s'est fait en considération des objectifs de l'année 1995, c'est-à-dire la comparaison de différents systèmes de culture qui sont la combinaison de trois facteurs : le travail du sol, la fertilisation et la rotation des cultures. L'accent a été porté cette année sur la comparaison de deux travaux du sol et deux fertilisations différentes.

Trois parcelles sur les quatre suivies l'année dernière ont donc été gardées :

- une parcelle sol nu fertilisée (B),
- une parcelle en rotation maïs-patate douce/maïs-patate douce (C),
- une parcelle sous graminées pérennes (G).

Ces trois parcelles reçoivent une fumure minérale "haute" (F2) qui correspond à un apport de 800 kg/ha de 13-13-21 (N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O), et sont soumises à un travail du sol "lourd" (labour et semis mécanisés).

Cinq autres parcelles ont été rajoutées :

- une parcelle sol nu non fertilisée (A), afin de pouvoir estimer la production interne du sol en azote et potassium au cours de la minéralisation de la matière organique ; la comparaison entre sol nu fertilisé et non fertilisé permet en outre de suivre la migration de l'engrais épandu en surface,
- trois parcelles en rotation maïs-patate-douce/maïs-patate-douce : la première (D), avec fertilisation "haute " plus apport de compost (F3) et sous travail du sol "lourd", la deuxième (E) avec fertilisation F2 et sous travail du sol "léger" (labour mécanisé et semis manuel), et la dernière (F) avec travail "léger" et fertilisation F3,
- une parcelle de légumineuses soumise au travail du sol "lourd" et sans fertilisation, afin d'étudier la fourniture azotée au sol d'une telle couverture, mais aussi l'importance éventuelle des pertes en azote.

Le tableau 1 résume les caractéristiques des différentes parcelles.

Parcelle	Culture	Rotation	Travail du sol	Fertilisation
A	sol nu	aucune	"lourd"	aucune
B	sol nu	aucune	"lourd"	F2
C	maïs	maïs-patate-douce/ maïs-patate-douce	"lourd"	F2
D	maïs	maïs-patate-douce/ maïs-patate-douce	"lourd"	F3
E	maïs	maïs-patate-douce/ maïs-patate-douce	"léger"	F2
F	maïs	maïs-patate-douce/ maïs-patate-douce	"léger"	F3
G	graminées pérennes	aucune	"lourd"	F2
H	légumineuses	aucune	"lourd"	aucune

**Tableau 1 : Description des parcelles étudiées**

On rappelle que travail du sol "lourd" signifie labour et semis mécanisés et "léger" pas de labour mécanisé profond (simplement utilisation d'outils à disques pour un travail superficiel) et semis manuel. Dans notre cas, la culture précédent celle du maïs était la culture de patates douces sur butte. Il a donc fallu travailler le sol pour enlever les buttes. La fertilisation F2 correspond à un apport en deux fois (le 15/02/96 alors que le maïs est au stade trois feuilles, et

le 15/03/96 au stade de la floraison) de 800 kg/ha de 13/13/21 (N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O) et le niveau F3 à ce même apport d'engrais chimiques plus du compost avant la préparation du sol.

Le compost apporté provient d'un mélange de Panicum, de Rhodes Grass et de fumier. Le tableau 2 présente ses caractéristiques.

quantité	azote total (mg/g)	carbone total (mg/g)
5 tonnes/ha	21	450

**Tableau 2 : quantité et qualité du compost apporté**

## 1.2 - Matériels utilisés

La méthodologie mise en oeuvre pour l'étude des flux hydriques et d'éléments minéraux a été présentée et discutée en détail dans Duwig *et al.* (1996).

Les mesures effectuées consistent :

- à l'enregistrement des précipitations et de l'évapotranspiration, grâce à une station climatologique, selon un pas de temps horaire,
- au suivi de l'eau dans le sol grâce à un humidimètre associé à la tensiométrie. Chaque parcelle (à part les parcelles A, et H) a été équipée de deux répétitions de sondes TDR placées à 10, 20, 30 et 40 cm de profondeur et de deux séries de tensiomètres placés à 10, 20, 30, 40 et 50 cm de profondeur,
- à l'extraction de la solution du sol à l'aide de bougies poreuses placées à 10 et 40 cm de profondeur. Au cours de cette campagne de mesures, trois séries de 8 bougies poreuses ont été installées à 40 cm de profondeur (au lieu d'une seule série en 1995). Ceci nous a permis de collecter des solutions tous les un ou deux jours, en alternance sur chacune des trois séries, en limitant les perturbations du flux hydrique induites par des prélèvements trop fréquents sur les mêmes bougies poreuses.

Les caractéristiques hydrauliques du sol ont été déterminées grâce à un infiltromètre à disque. Outre l'extraction des solutions du sol, des prélèvements de sol pour le suivi de l'azote minéral ont aussi été réalisés tous les mois environ.

Certains instruments de mesures ont dû cependant être calibrés plus précisément cette année, les nombres de mesures disponibles étant plus conséquent.

### 1.2.1 - Etalonnage de la TDR

La mesure de la teneur en eau par TDR (Time Domain Reflectometry) se fait par la mesure du temps de retour d'une impulsion électrique le long d'une sonde. Ce temps de réflexion fournit la constante diélectrique du matériau (K<sub>a</sub>) On en déduit la teneur en eau en utilisant une courbe d'étalonnage empirique.(Zegelin et White (1989), Clothier *et al.* (1994) ; Duwig *et al.* (1996)).

Une calibration de la TDR pour les sols oxidiques de Maré a du être effectuée car la relation la plus généralement utilisée (Topp *et al.*, 1980) qui est présentée comme valable pour différents types de sol ne s'applique pas pour les sols étudiés. En effet, Topp n'a étudié que des sols sableux et argileux. Roth *et al.*, (1992) ont étudié une gamme plus large de sol et ont



travaillé sur une approche empirique pour établir une calibration "universelle". Ils ont déterminé deux calibrations différentes, selon un taux faible ou élevé en matière organique. Cependant, les teneurs en eau calculées à partir de ces fonctions diffèrent d'au moins 6 % avec nos mesures gravimétriques dans le meilleur des cas.

Une calibration avait déjà été effectuée en 1995 à partir des mesures simultanées de teneur en eau par la TDR et par prélèvements gravimétriques, ainsi que des mesures en laboratoire sur sol tamisé et séché à l'air. Cette calibration a été utilisée sur les mesures de teneur en eau par TDR en 1996 et comparée à des mesures simultanées par prélèvements gravimétriques. Cette comparaison n'a pas été satisfaisante, il a donc été décidé de répéter l'opération en 1996, également à partir de mesures simultanées sur le terrain de TDR et prélèvements gravimétriques, ainsi que des mesures au laboratoire sur mottes non remaniées et humectées au champ jusqu'à une teneur en eau proche de la saturation. Les mesures ont alors été effectuées au cours de la dessiccation. L'horizon de surface a été humecté une deuxième fois au laboratoire pour une autre série de mesures (on ne constate pas de différences entre les deux dessiccations).

Trois niveaux ont été différenciés pour l'étalonnage :

- le premier, proche de la surface, entre 0 et 15 cm (Figure 1) ;
- le deuxième, niveau intermédiaire, entre 15 et 35 cm (Figure 2) ;
- le dernier, en profondeur entre 35 et 50 cm (Figure 3).

Ces niveaux correspondent grossièrement aux trois principaux volumes de sol déterminés lors des descriptions des profils de sol.

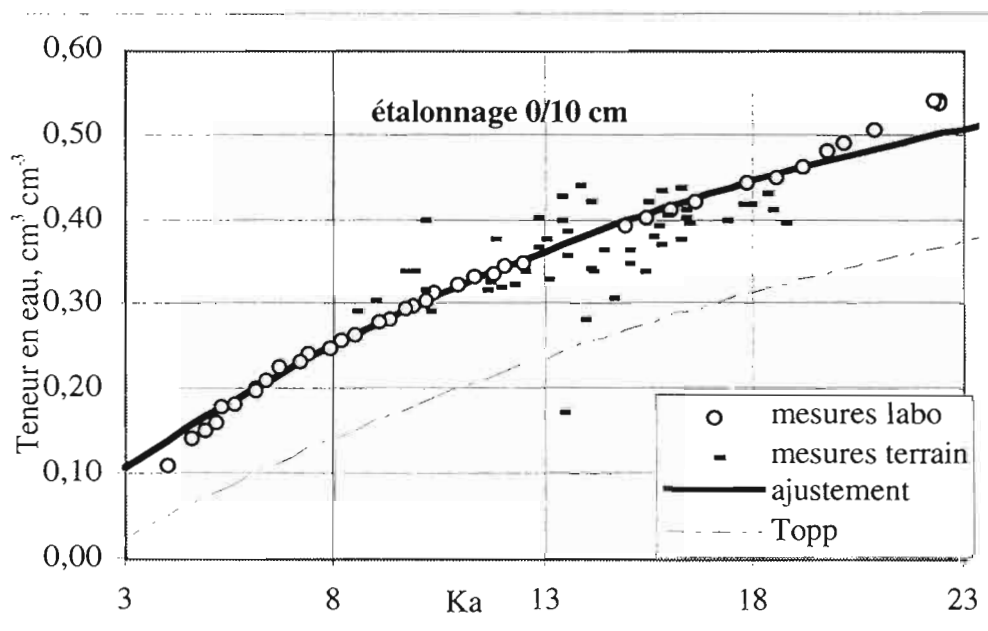


Figure 1 : Etalonnage de la TDR en surface

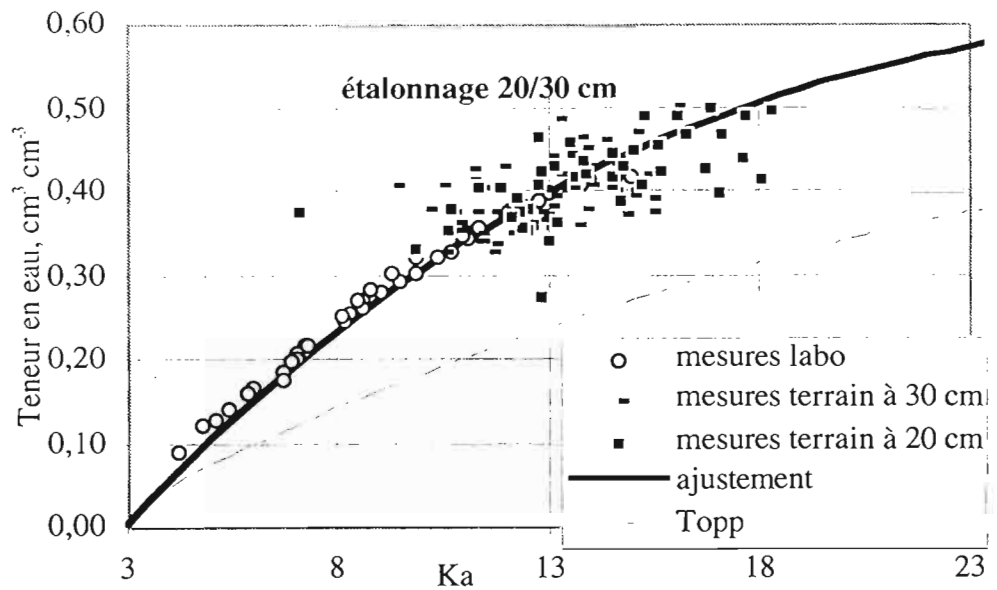


Figure 2 : étalonnage de la TDR, niveau intermédiaire (20à 30 cm).

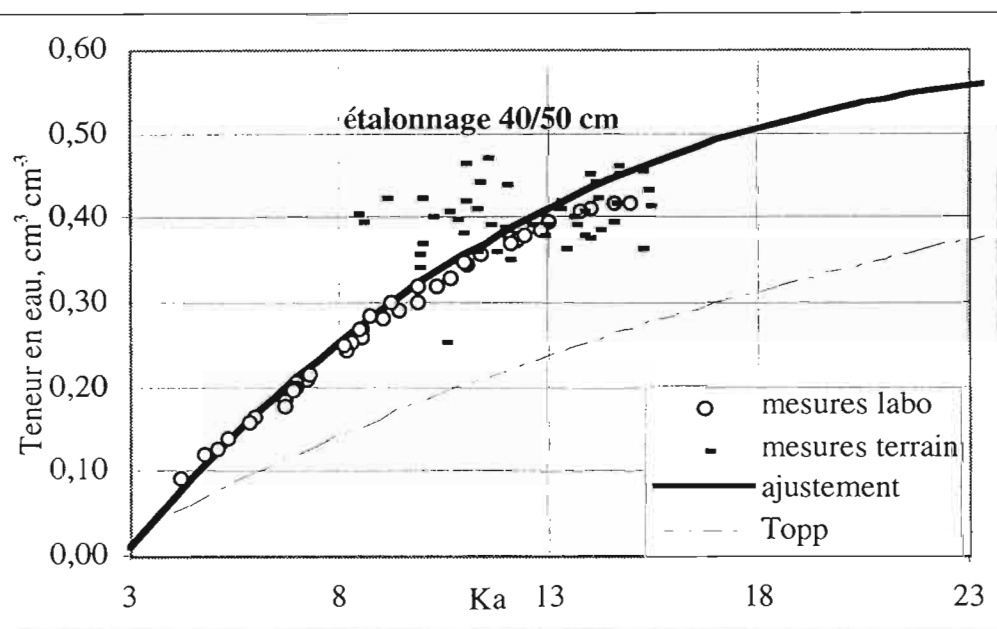


Figure 3 : Etalonnage de la TDR en profondeur

Les données ont été ajustées à un polynôme du troisième degré, basée sur la première calibration trouvée par Topp *et al.* (1980) et réutilisée bien des fois par la suite (Dasberg et Dalton, 1985 ; Nadler *et al.*, 1991 ; Roth *et al.*, 1992 ; Zegelin *et al.*, 1992 ; Jacobsen et Schoening, 1993). D'après Nadler *et al.* (1991), il semble que la plupart des données peuvent être exprimées par une relation similaire, mais non identique à celle de Topp.

Le polynôme ajusté est de la forme suivante :

$$\theta = a + bK_a + cK_a^2 + dK_a^3,$$

où a, b, c et d sont les paramètres ajustés.

Le tableau 3 donne la valeur des différents paramètres selon la couche de sol étudiée, ainsi que le coefficient de corrélation  $R^2$  de la relation ajustée.

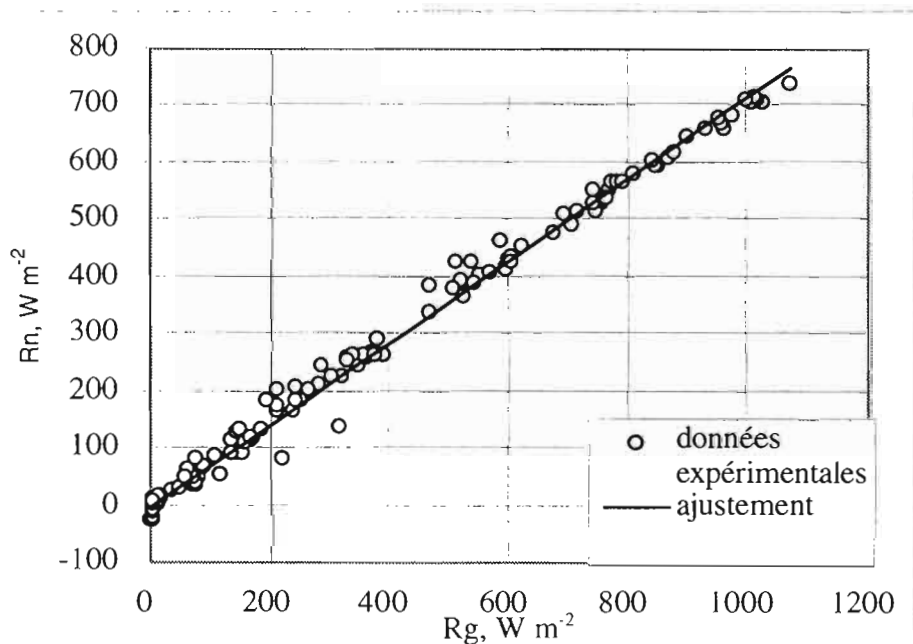
profondeur	a	b	c	d	$R^2$
10 cm	4,0 E-4	3,8E-6	-9E-4	8,9E-4	0,84
20 à 30 cm	-1,7E-1	6,3E-2	-1,7E-3	1,6E-5	0,80
40 cm	-1,8E-1	7,0E-2	-2,2E-3	2,4E-5	0,84

**Tableau 3 : paramètres de l'étalonnage de la TDR selon la profondeur**

La comparaison des courbes d'étalonnage de 1995 et 1996 donnent des variations allant de 0 à  $0,1 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ . Cette variation découle premièrement des courbes ajustées de différentes formes utilisées en 1995 et 1996. En 1995, la courbe ajustée était de la forme  $aKa^b$  et l'ajustement n'était pas précis pour les  $Ka$  élevés. De plus, la variation la plus importante entre les deux années correspond aux  $Ka$  supérieurs à 20, soit des teneurs en eau proche de  $0,50 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  qui sont rarement enregistrées sur le terrain. L'étalonnage 1995 est donc utilisable pour des teneurs en eau courantes mais est trop imprécis pour des teneurs en eau proches de la saturation.

### 1.2.2 - Etalonnage du radiomètre

Le radiomètre permet de mesurer le rayonnement net ou bilan radiatif au sol ( $R_n$ ). C'est un paramètre important dans le calcul de l'évapotranspiration potentielle (Valancogne, 1992), puisqu'il représente la quantité d'énergie disponible pour le processus d'évaporation et de transfert de chaleur sensible entre le sol et l'atmosphère. Ce paramètre peut être aussi déterminé à partir du rayonnement solaire global,  $R_g$ , du rayonnement émis par la surface, et de l'albédo, rapport entre le rayonnement incident et celui réfléchi. N'ayant pas à notre disposition ces paramètres, à part le rayonnement global, une relation entre  $R_n$  et  $R_g$  a du être calculée (Figure 4), pour pallier à un fonctionnement défectueux du radiomètre pendant une période après le cyclone du 27 mars.



**Figure 4 : Relation entre le rayonnement net et le rayonnement global**

La relation calculée à partir de la régression linéaire entre les points expérimentaux est la suivante :

$$R_n = 0,71 \text{ Rg} , R^2 = 0,99 .$$

### 1.3 - Climatologie

La campagne de mesure 1996 se caractérise par une pluviométrie abondante, comparée à celle du cycle cultural étudié en 1995 (Figure 5). Durant le mois de mars 1996, le cyclone Béti (27/03/97) a atteint tout le territoire de la Nouvelle-Calédonie, entraînant un apport de pluie de 238 mm en 4 jours. L'ensemble du mois de mars a été très pluvieux avec une pluviométrie de 606 mm, soit 28 % d'une pluie annuelle déjà élevée, de 2173 mm. La moyenne annuelle de 1956 à 1966 sur La Roche (à 5 km du site d'étude) était de 1441 mm (Latham et Mercky, 1983).

Le tableau 4 donne les précipitations et l'évapotranspiration potentielle (calculée par la méthode de Penman) comparées entre 1995 et 1996.

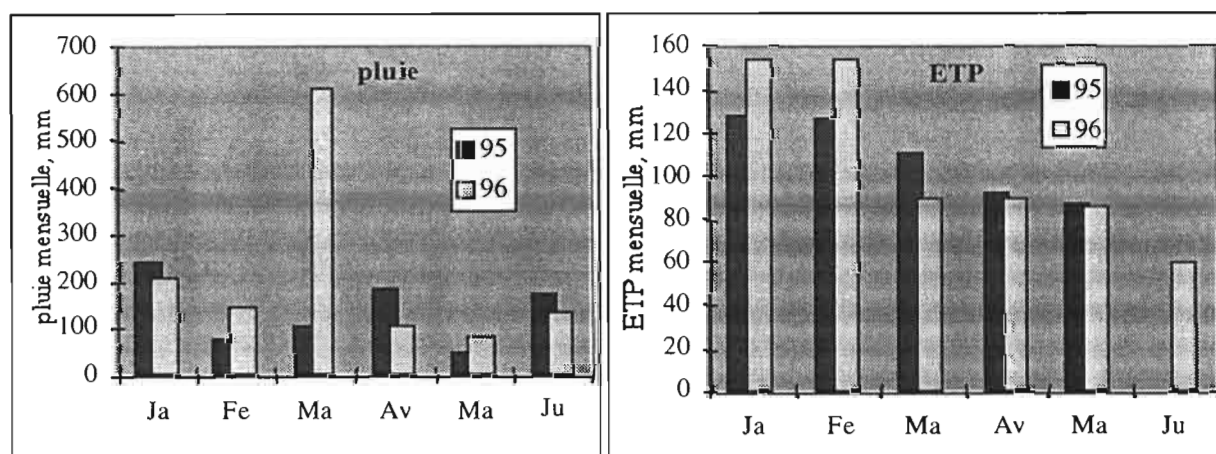


Figure 5 : Comparaison des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle entre 1995 et 1996

Durant le cycle cultural de l'année 95, le bilan des précipitation par rapport à l'évapotranspiration (P-ETP) est déficitaire durant deux mois, le mois de mars et le mois de mai. Durant le cycle 1996, le bilan P-ETP est excédentaire ou nul sur toute la durée du cycle de culture. Ces résultats montrent que la saison des pluies a apporté suffisamment d'eau aux cultures pour ces deux années, et que le risque potentiel de lixiviation des engrais est réel.

mois	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin
P-ETP en 1995	112,1	-47,1	-9,9	91,2	-40,5	-
P-ETP en 1996	52,9	-7,6	516,4	14,6	-1,6	68,8

Tableau 4 : différence entre les précipitations et l'évapotranspiration potentielle mensuelles en mm.

## 2 - CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DU SOL

L'objectif de ce chapitre est de comprendre les relations qui peuvent exister entre la structure et les propriétés hydrodynamiques du sol.

Cela suppose au préalable une description précise de la morphologie du sol et la définition des volumes structuraux afin d'obtenir les caractéristiques **statiques** du sol. Une description plus détaillée des volumes structuraux, de leurs caractéristiques (chimie, compacité, densité racinaire) et de leur évolution sera présentée dans Bourdon *et al.* (1997). Sur chaque parcelle étudiée, des fosses ont été creusées pour la description du profil cultural. Une fois les volumes structuraux définis à partir essentiellement de l'observation morphologique des profils, des échantillons de sol et des cylindres non perturbés ont été prélevés dans chacun d'eux, afin d'étudier les caractéristiques chimiques, la granulométrie, la densité apparente et la courbe de rétention en eau. La répartition porale a été calculée à partir de la courbe de rétention en utilisant la loi de Jurin (Perret, 1993).

Ensuite, un infiltromètre à disque (Clothier et White, 1981) a été utilisé pour déterminer les caractéristiques **dynamiques** de chaque volume structural, c'est-à-dire la conductivité hydraulique et la sorptivité.

### 2.1 - Caractéristiques statiques

Les profils étudiés sont les suivants :

- 14 : profil sous jachère, avec de nombreux faux-poivriers,
- 18 : profil sous jachère arbustive ancienne (plus de 10 ans), essentiellement des goyaviers, étudié en Octobre 1995,
- 16 : profil sous patates douces, travail du sol "léger", fertilisation F2, étudié en Octobre 1995,
- 17 : profil sous sol nu, travail du sol "lourd",
- 19 : profil sous patates douces, travail du sol "lourd", fertilisation F2, étudié en Octobre 1995,
- 40 : profil sous maïs, travail du sol "lourd", fertilisation F2, étudié en Avril 1996.

#### 2.1.1 - Cartographie et caractérisation morphologiques des volumes structuraux

La caractérisation des différents volumes structuraux a été effectuée à partir d'une description morphologique fine et de mesures de compacité du sol à l'aide d'un pénétromètre à aiguille conique (Bourdon *et al.*, 1997).

Six volumes structuraux ont été identifiés. Leurs caractéristiques déterminées visuellement sont données ci-dessous :

- en surface (0-15 cm environ) :
  - GrSa : juxtaposition d'une structure grumeleuse à une structure sub-anguleuse fine, de 1 à 2 mm, très meuble, porosité interparticulaire très importante, dominant sous jachère,
  - PaGr : juxtaposition d'une structure particulaire à une structure grumeleuse, taille des éléments <1 mm, très meuble, porosité très importante,
- en profondeur (en-dessous de 15 cm) :
  - MF(Sa-Gr) : massif fissuré avec des éléments sub-anguleux à grumeleux, meuble, volumes des vides assez importants, pores peu nombreux très fins et tubulaires,

- M1 : structure micro-agrégée d'aspect massif, avec présence de matière organique, assez cohérent, volume des vides très faible, pores nombreux très fins et tubulaires,
- M2 : structure micro-agrégée d'aspect massif, avec peu de matière organique, très cohérent, très compact, volume des vides très faible, pores nombreux très fins et tubulaires,
- K : calcaire corallien.

Après labour, on observe en général :

- l'apparition d'une structure PaGr en surface, résultant du mélange des structures GrSa et Mf,
- sous "travail du sol lourd", la proportion de PaGr augmente et le massif non modifié ne se trouve plus qu'à environ 30 cm de profondeur,
- une fissuration par le labour des horizons M1 et M2 en Mf(Sa-Gr),
- les proportions des différentes structures sous jachère (18) et "travail du sol léger" (16) sont très comparables, il y a simplement remplacement d'une partie du massif en GrSa.

### 2.1.2 - Densité apparente

La densité apparente est une donnée importante à déterminer : elle sert dans le calcul de la porosité totale, mais aussi dans la transformation de la teneur en eau gravimétrique en humidité volumique.

En moyenne, toutes parcelles confondues, la densité apparente de chaque horizon n'a pas varié d'une année sur l'autre (tableau 5). Le tableau ci-dessous présente la moyenne et l'écart-type sur trois horizons, en confondant les structures PaGr et SaGr (horizon 1), ainsi que M1 et M2 (horizon 3), l'horizon 2 étant associé à la structure Mf ou M1 (pour le travail du sol "léger").

année	95		96	
	moyenne	ecart	moyenne	ecart
1	0,72	0,04	0,68	0,05
2	0,74	0,06	0,75	0,02
3	0,87	0,01	0,84	0,04

**Tableau 5 : comparaison des densités apparentes selon les horizons entre 1995 et 1996**

La densité apparente de l'horizon 2, niveau intermédiaire, semble pourtant augmenter avec le travail du sol "lourd", toutes cultures confondues. Elle passe de  $0,72 \pm 0,03$  pour le travail du sol "léger" à  $0,79 \pm 0,02$  pour le travail du sol "lourd". C'est en effet l'horizon qui diffère le plus suivant le type de travail du sol, puisqu'il est pratiquement non perturbé dans un cas et labouré dans l'autre cas. La différence entre les densités apparentes suivant le travail du sol pour les deux autres horizons n'est pas significative.

Il n'a pas été possible avec les données actuellement disponibles de faire une comparaison suivant le type de culture.

### 2.1.3 - Répartition porale, indice des vides

Dans les sols, le mouvement de l'eau est déterminé par son énergie potentielle. Celle-ci exprimée par unité de poids, est appelée la charge hydraulique. Cette énergie potentielle se décompose en potentiel gravitaire et potentiel matriciel, pour les zones non saturées.

C'est le potentiel matriciel qui détermine la rétention et la circulation de l'eau dans le sol. A ce potentiel matriciel, est relié un rayon de pores équivalent, ces pores étant assimilés à des tubes capillaires cylindriques. Ce rayon de pores équivalent est donné par la loi de Jurin :

$$r = \frac{2\gamma}{\rho gh},$$

- où
- r est le rayon de pores équivalent,
  - $\gamma$  la tension à l'interface liquide-vapeur (pour l'eau à 20°C,  $\gamma = 72.10^{-3} \text{ N m}^{-1}$ ),
  - $\rho$  la masse volumique de l'eau,
  - g l'accélération de la pesanteur
  - h, la pression matricielle.

Les rayons des pores équivalents pour diverses pressions matricielles (h) et différents pF définissent diverses classes de pores ; les relations entre ces paramètres sont données dans le tableau 6.

pF	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4,2
r, $\mu\text{m}$	150	47,5	15	4,7	1,5	0,5	0,1
h, cm	10	31,6	100	316	10000	3162	15849
porosité	macroporosité grossière		macroporosité fine		mésoporosité		

(\*) au delà de pF 4,2 correspond la microporosité, soit des rayons de pores inférieurs à 0,1  $\mu\text{m}$

**Tableau 6 : équivalence entre le pF, le rayon de pores équivalent (r), la pression matricielle (h) et le type de porosité**

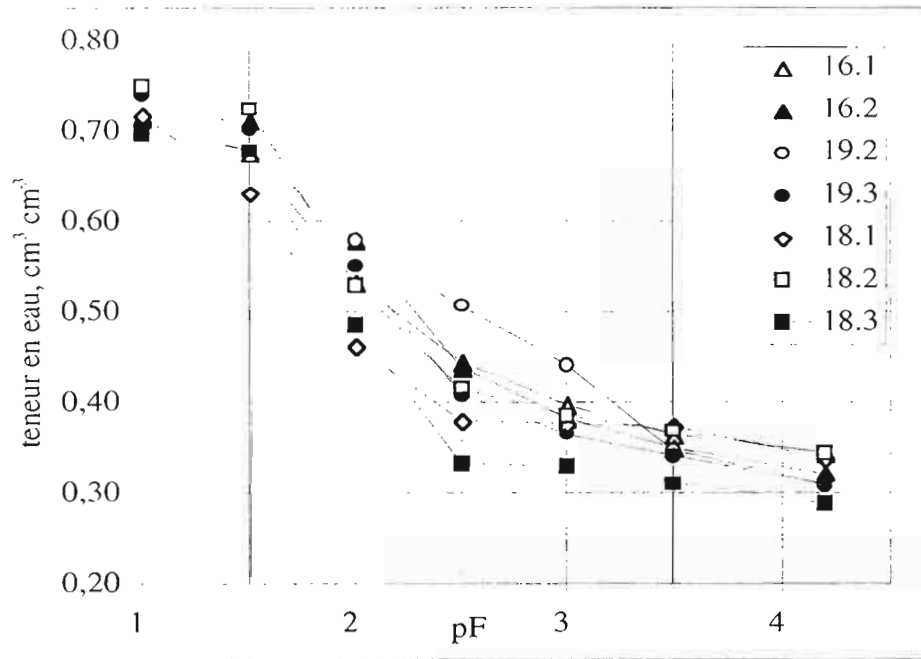
Dans la macroporosité, le potentiel gravitaire est dominant et le drainage est rapide. Dans la mésoporosité, le potentiel matriciel est le plus important et le drainage est lent à très lent, l'eau est également extraite par les racines ou évaporée. Ensuite, dans la microporosité, le drainage est nul et l'extraction par les racines est quasiment impossible, l'assèchement du sol ne se fait plus alors que par évaporation. Ainsi, plus le rayon des pores est petit, plus la rétention de l'eau est importante et donc la circulation de l'eau faible.

Dans les faits, la plus grande partie de l'eau échappe à la gravité. En effet, le drainage après un épisode pluvieux important se produit dans les pores larges, qui sont seulement capables de maintenir une pression matriciel faible (Azooz *et al.*, 1996) : le drainage est alors rapide. Après une période de ressuyage du sol ou pour des épisodes pluvieux plus réduits, l'eau circule dans des pores plus fins où la pression matricielle est plus forte : le drainage devient de plus en plus lent puis s'annule.

En toute rigueur, le modèle de pores équivalent s'applique aux étranglements existants d'un pore et ne donne pas d'information réelle sur la géométrie des pores (Perret, 1992). De plus, cette méthode ne s'applique qu'à un matériau rigide, mais dans notre cas, aucunes données ne sont disponibles sur la déformation éventuelle du sol, bien que l'absence d'argiles gonflantes laisse supposer une déformation réduite.

On peut cependant comparer les systèmes de porosité des différents niveaux de sol, ainsi que l'évolution due au travail du sol. L'évolution de la répartition entre les différentes classes de pores, en fonction des systèmes de cultures (notamment selon le travail du sol) est en effet très importante dans l'analyse de la circulation de l'eau.

Elle peut être abordée par la mesure du volume et de la teneur en eau des prélèvements de sol par cylindres utilisés pour la mesure des pF (Figure 6).



**Figure 6 : exemple d'évolution de la teneur en eau en fonction du pF, pour quelques horizons**

Toutefois, pour comparer les profils entre eux, la notion d'indice de vides, d'eau et d'air par rapport au volume du solide (unité :  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$  de solide) est utilisée :

- indice de l'eau,  $I_w = \frac{V_w}{V_s}$

- indice des vides,  $I_v = \frac{V_v}{V_s}$ ,

- indice de l'air,  $I_a = I_v - I_w$ ,

avec V le volume des différentes phases, solide (indice s), liquide (indice w) et l'indice v se rapporte aux vides ménagés entre les particules solides (Perret, 1992).

Il apparaît que :

• Sous végétation naturelle (figure 7) :

- l'indice d'air est important aux pF très faibles, pour l'horizon de surface 14.1. Ceci proviendrait d'une forte macroporosité grossière inter-agrégats. La vidange de l'eau pour 14.1 s'effectue très régulièrement, signalant une répartition porale très homogène. Cet horizon se compose donc d'une macroporosité fine assez importante qui détermine le mouvement et la rétention de l'eau, et d'une mésoporosité moyenne qui correspond à une fraction importante de l'eau utilisable par les plantes. La microporosité est importante, toutefois, elle correspond à de l'eau pratiquement inutilisable par les plantes.

- les horizons 14.2 et 18.2 ont un comportement semblable ; avec une entrée d'air à pF 1,5. La répartition porale est donc très hétérogène, marquée par la disparition de la macroporosité grossière, par une macroporosité fine et une mésoporosité assez faible.

- pour l'horizon 18.3, l'entrée d'air à pF 1,5 est encore plus marquée puisque le sol reste saturé jusqu'à pF 1,5. La porosité de cet horizon est donc essentiellement composé de pores dont le diamètre maximal correspond à 100  $\mu\text{m}$ .



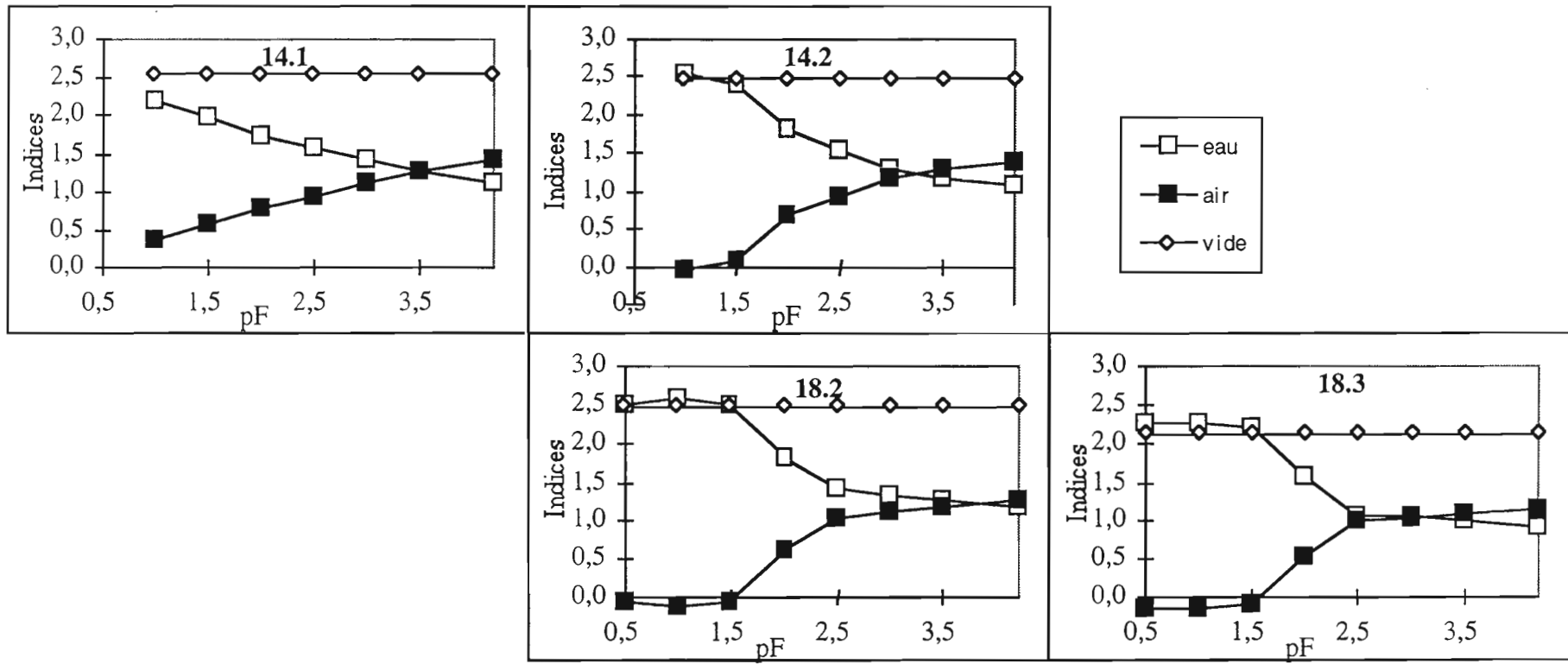


Figure 7 : évolution des indices d'eau, des vides et d'air, sous végétation naturelle

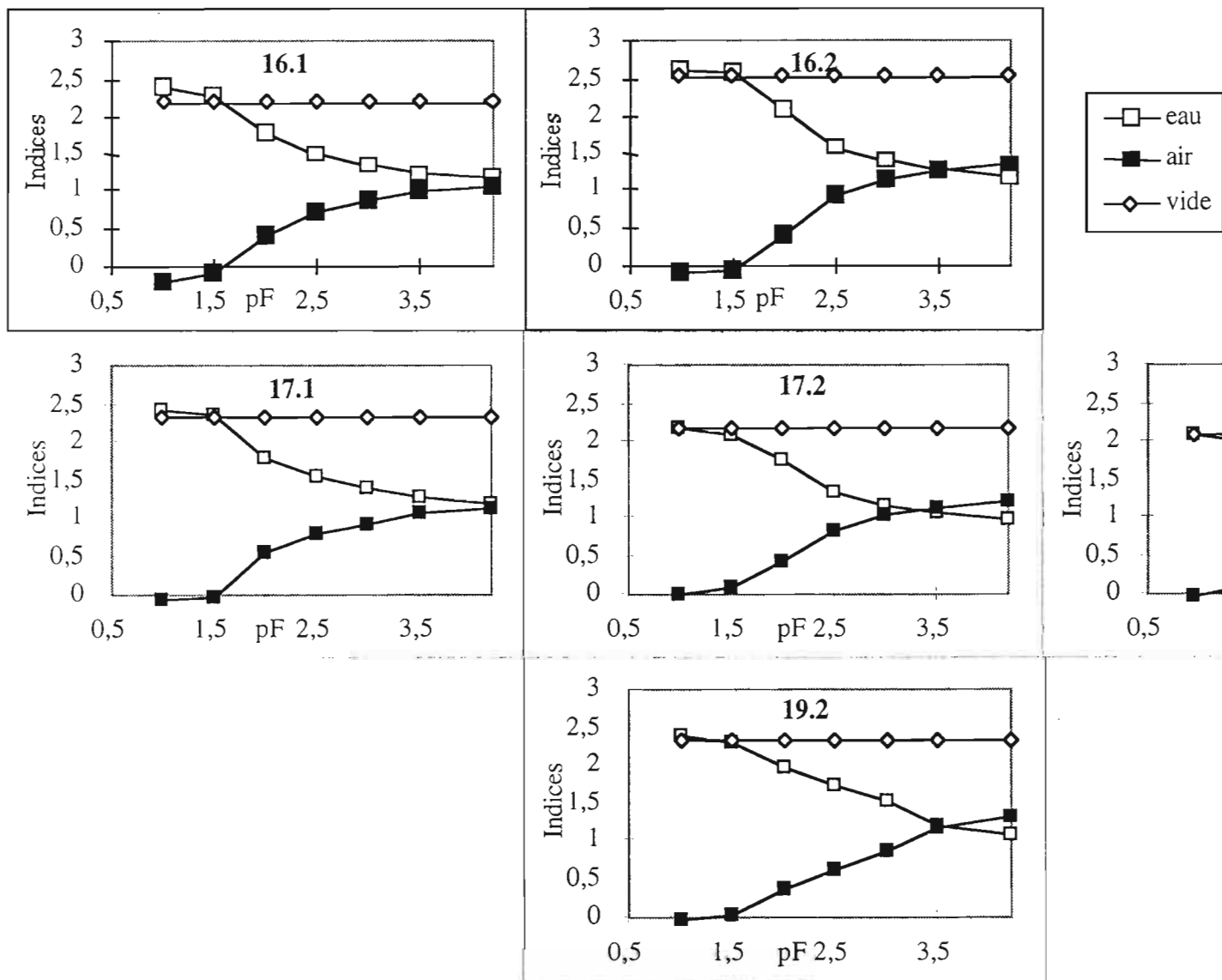


Figure 8 : évolution des indices d'eau, des vides et d'air, sous parcelles cultivées

- Sous parcelles cultivées (figure 8) :
  - les horizons de surface 16.1 et 17.1 présentent un comportement semblable, avec une vidange de l'eau relativement régulière, et une entrée d'air assez marquée vers pF 1,5. On observe une disparition de la macroporosité grossière et une diminution de la microporosité,
  - l'horizon 16.2 présente un comportement semblable aux horizons 14.2 et 18.2 : en effet, le profil 16 est sous travail du sol "léger", et 16.2 est l'horizon intermédiaire peu touché par le travail du sol,
  - pour les horizons 17.2 et 19.2, l'eau se vidange assez régulièrement, l'entrée d'air entre pF 1,5 et 2 est moins marqué que sous travail du sol "léger", la répartition porale est donc plus homogène,
  - l'horizon 17.3 se rapproche de 18.3, avec une entrée d'air marquée à pF 1,5, et une mésoporosité importante.

Les différences entre les horizons et les deux travaux du sol sont relativement peu marquées, on peut néanmoins retenir quelques points importants :

- la répartition porale des couches intermédiaires et profondes est très hétérogène, avec une absence de pores de tailles supérieures à 100  $\mu\text{m}$ , un nombre de pores de taille de 30 à 100  $\mu\text{m}$  important, et de pores de 30 à 0,2  $\mu\text{m}$  répartis avec homogénéité assez peu important. La disparition de la macroporosité grossière à la suite de la mise en culture est susceptible de réduire la vitesse de transfert de l'eau. De plus, la mésoporosité est assez réduite, ce qui signifie que la réserve en eau pour les plantes est assez faible,
- le travail du sol homogénéise la répartition porale avec apparition de macropore supérieurs à 100  $\mu\text{m}$  pour les horizons intermédiaires et augmentation du nombre de micropores. Il diminue légèrement l'indice des vides en surface, donc la porosité totale.

#### 2.1.4 - Courbes de rétention en eau

Pour un type de sol donné, une valeur de pression de l'eau (ou charge hydraulique) dans le sol est liée à une valeur de teneur en eau. Cette relation repose sur le couplage des mesures *in-situ* d'humidité et de charges hydrauliques H, obtenues par relevés ponctuels sur le terrain à différentes profondeurs. Sa forme dépend de l'arrangement géométrique des particules, de leur agrégation et d'autres phénomènes chimiques et biologiques (Kutilek et Nielsen, 1994). Généralement, cette relation présente un hystérésis, qui signifie que la teneur en eau du sol au cours de drainage est plus élevée que celle au cours d'une phase d'humectation, pour la même charge hydraulique. Ce phénomène provient de la géométrie irrégulière des pores, de l'inclusion d'air dans la matrice du sol et du phénomène de retrait-gonflement (Childs, 1969, in Vanclouster *et al.*, 1994). Ce phénomène d'hystérésis a été négligé, ne pouvant être déterminé par des mesures sur le terrain.

Cette relation est importante à déterminer, premièrement pour pouvoir recalculer les teneurs en eau à partir des charges hydrauliques, là où les mesures manquent. Deuxièmement, elle est indispensable pour la modélisation des transferts d'eau et d'éléments minéraux (Vanclouster *et al.*, 1994).

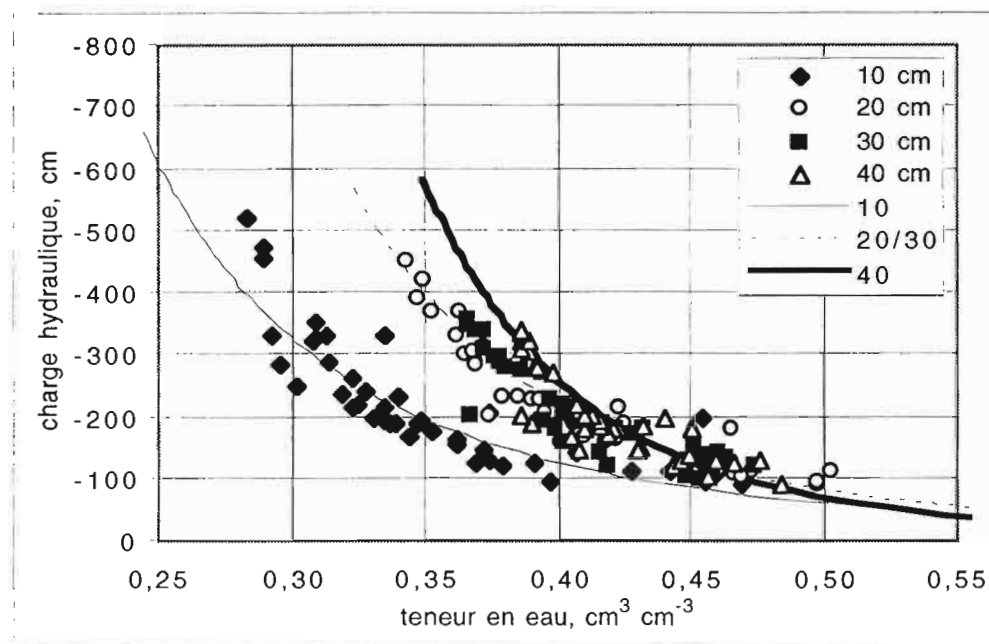
Quand le phénomène d'hystérésis est négligé, la courbe de rétention en eau peut être décrite par l'ajustement analytique de Van Genuchten (1980) :

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + (|h|/\beta)^n)^m},$$

où  $\theta_s$  est la teneur en eau à saturation ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ),  
 $\theta_r$  la teneur en eau résiduelle ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) [différence entre la teneur en eau du sol séché à l'air et à l'étuve à 105 °C pendant 24 heures],  
 $\beta$  est la valeur de la pression à l'entrée d'air (m), 10000  
 $n, m$  sont des paramètres de forme

La teneur en eau résiduelle  $\theta_r$  et la teneur en eau à saturation  $\theta_s$  ont été fixés à respectivement 0,02 et 0,65  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$  ; ces valeurs ont été déterminées par une expérience sur colonnes de sol où le sol avait été séché à l'air, tamisé puis humidifié jusqu'à saturation. Pour pouvoir comparer les paramètres ajustés sur le terrain et pour la colonne de sol, il a été décidé d'utiliser les mêmes teneurs en eau extrêmes, ces valeurs n'ayant jamais été mesurées sur le terrain.

Les mesures couplées de teneur en eau et de charge hydraulique utilisées ont été déterminées uniquement sur sol nu, pour s'affranchir du prélèvement d'eau par la plante. Les paramètres ont été ajustés aux données expérimentales (Figure 9) en utilisant le logiciel de statistique "Curve Expert 1.1" (Daniel Hyams).



**Figure 9 : relation entre la succion et la teneur en eau selon la profondeur.**

Le tableau 7 donne les paramètres de l'ajustement et le coefficient de corrélation de la relation ajustée :

Cote	$\beta$	$m$	$n$	$R^2$
10 cm	24,6	6,27	0,05	0,87
20 à 30 cm	25,65	5,48	0,04	0,93
40 cm	14,32	4,87	0,04	0,88

**Tableau 7 : paramètres ajustés de la courbe de rétention**

Sur la Figure 9 se distinguent trois niveaux caractéristiques malgré la plage de charges hydrauliques limitée :

- dans une zone proche de la surface, la variation de la charge hydraulique est limitée pour une gamme de variation de la teneur en eau étendue : la teneur en eau peut varier de 0,35 à 0,45 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> pour une variation de la charge de 100 cm,
- entre 20 et 30 cm (horizon intermédiaire), la variation de la charge hydraulique est beaucoup plus importante, cette courbe se rapproche de beaucoup de celle en profondeur,
- en profondeur, pour la même variation de teneur en eau, la charge varie de plus de 400 cm.

Cette différence signifie que pour une même gamme de taille de pores, la réserve en eau en surface est plus importante qu'en profondeur.

Le rapprochement entre la mesure des pF et la courbe de rétention en eau est possible pour des pF faibles (inférieurs à 2,5). En effet, on note un problème de superposition des méthodes tensio/humidimétrie et pF/teneur en eau : pour des pF élevés (>2,5), les teneurs en eau sont surestimées par rapport à celles obtenues par le couplage tensiomètres/TDR. (Problème méthodologique ?).

Toutefois, les indications trouvées sur les courbes de rétention en eau se rapprochent des conclusions énoncées ci-dessus : les courbes (Figure 9) n'ont été déterminées que pour une parcelle cultivée, mais on peut remarquer que la pente au point d'inflexion de la courbe est plus faible pour les horizons de surface et intermédiaire (touchés par le travail du sol) que pour l'horizon de profondeur (peu touché par le travail du sol). Cela signifie que la répartition porale est plus homogène dans les horizons labourés.

## 2.2 - Caractéristiques dynamiques

La caractérisation des propriétés hydrauliques dynamiques du sol a été réalisée grâce à un infiltromètre à disque qui permet d'obtenir des mesures de conductivité hydraulique et de sorptivité proche de la saturation, et à l'utilisation des mesures couplées tensiomètre/TDR qui donnent des points conductivité/teneur en eau pour des états hydriques du sol différents. Ces deux méthodes ont abouti à la détermination d'une courbe de conductivité hydraulique en fonction de la teneur en eau (méthode expliquée dans Duwig *et al.*, 1996).

### 2.2.1 - Infiltrométrie

Les mesures d'infiltrométrie ont été réalisées dans les principaux volumes structuraux différenciés lors de la description des profils. On retrouve donc l'horizon de surface, l'horizon intermédiaire et celui de profondeur (les structures M1 et M2 n'ont pas été distinguées), sur lesquels les mesures de densité apparente et les prélèvements de cylindres ont été effectués.

La figure 10 donne l'évolution de la conductivité hydraulique, mesure de l'efficacité de la force de gravité à entraîner l'eau du sol vers la profondeur à travers les pores du sol, et la sorptivité qui a pour objet de quantifier l'attraction capillaire exercée par le sol.

#### • En surface :

- on note que la conductivité hydraulique et la sorptivité sont plus élevées sous culture de maïs que sous jachère. Le labour a certainement pour effet d'améliorer la connexion des pores entre eux, avec des vides d'entassement, à la place de pores formés par des processus

biologiques, comme on peut les trouver sous jachère. Dans l'absolu, la conductivité est très forte alors que la sorptivité est moyenne ;

- sous jachère, l'eau circule très lentement pour les pressions -15 et -5 cm. On peut supposer que ceci est dû à l'effet de l'hydrophobicité de la matière organique dont la quantité est importante dans l'horizon de surface (sous jachère). La conductivité du profil 40 (année 96) est aussi très faible par rapport aux autres profils de maïs (1995), cette tendance à la baisse dans le temps sera à confirmer les années suivantes ;

- de plus, on observe une variation importante de la conductivité hydraulique entre les pressions -5 et 0,5 cm, spécialement sous maïs. Certains auteurs expliquent cette variation par une séparation nette du flux entre les domaines des macropores grossiers et des macropores fins (Clothier *et al.*, 1995 ; Angulo-Jaramillo *et al.*, 1996).

- Dans l'horizon intermédiaire :

- vu les coefficients de variation, on ne peut conclure sur des différences significatives entre les différents profils. La conductivité hydraulique reste élevée et la sorptivité augmente pour tous les profils,

- le profil 40 donne néanmoins une sorptivité plus faible que les autres profils, ce pourrait indiquer une dégradation par le labour des caractéristiques hydrauliques dans le temps. De plus, la mesure sur 40 a été effectuée en avril 1996, pendant la saison des pluies, et 16 et 19 pendant la saison sèche. La différence entre les **teneurs** en eau initiale et finale, après infiltration, est donc plus importante pour 16 et 19, ce qui augmente la sorptivité,

- En profondeur :

- la conductivité hydraulique des parcelles cultivées devient faible, et inférieure à celle sous jachère, qui elle est très élevée, pour les pressions -5 et -0,5 cm,

- la sorptivité qui était très importante sous maïs en 1995 devient très faible en 1996 dû à un flux d'infiltration beaucoup plus faible, et la sorptivité de la jachère reste élevée de valeur équivalente à celle dans l'horizon intermédiaire.

Le labour semble donc augmenter la conductivité hydraulique et la sorptivité en surface, qui sont assez faibles pour la jachère. La conductivité hydraulique qui est très élevée après 2 ans de labour semble diminuer lors de la troisième année. Toutefois, les conditions pluviométriques ont été très différentes lors des 2 périodes précédentes les mesures, avec des pluies faibles avant les mesures d'octobre 1995 et, au contraire, une pluviométrie abondante début 1996. Cette dernière peut expliquer la réduction de la conductivité hydraulique pour l'horizon de surface du profil 40, la pluie ayant un effet destructurant sur le sol.

Pour les horizons intermédiaire et de profondeur, les caractéristiques hydrauliques de la jachère sont élevées alors que le labour aurait tendance à les diminuer, spécialement pour l'horizon de profondeur, qui n'est pas directement touché par le labour mais qui doit être tassé. Cette dernière remarque va dans le sens de la disparition des macropores qui a été remarqué dans l'étude des indices de vides, d'eau et d'air.

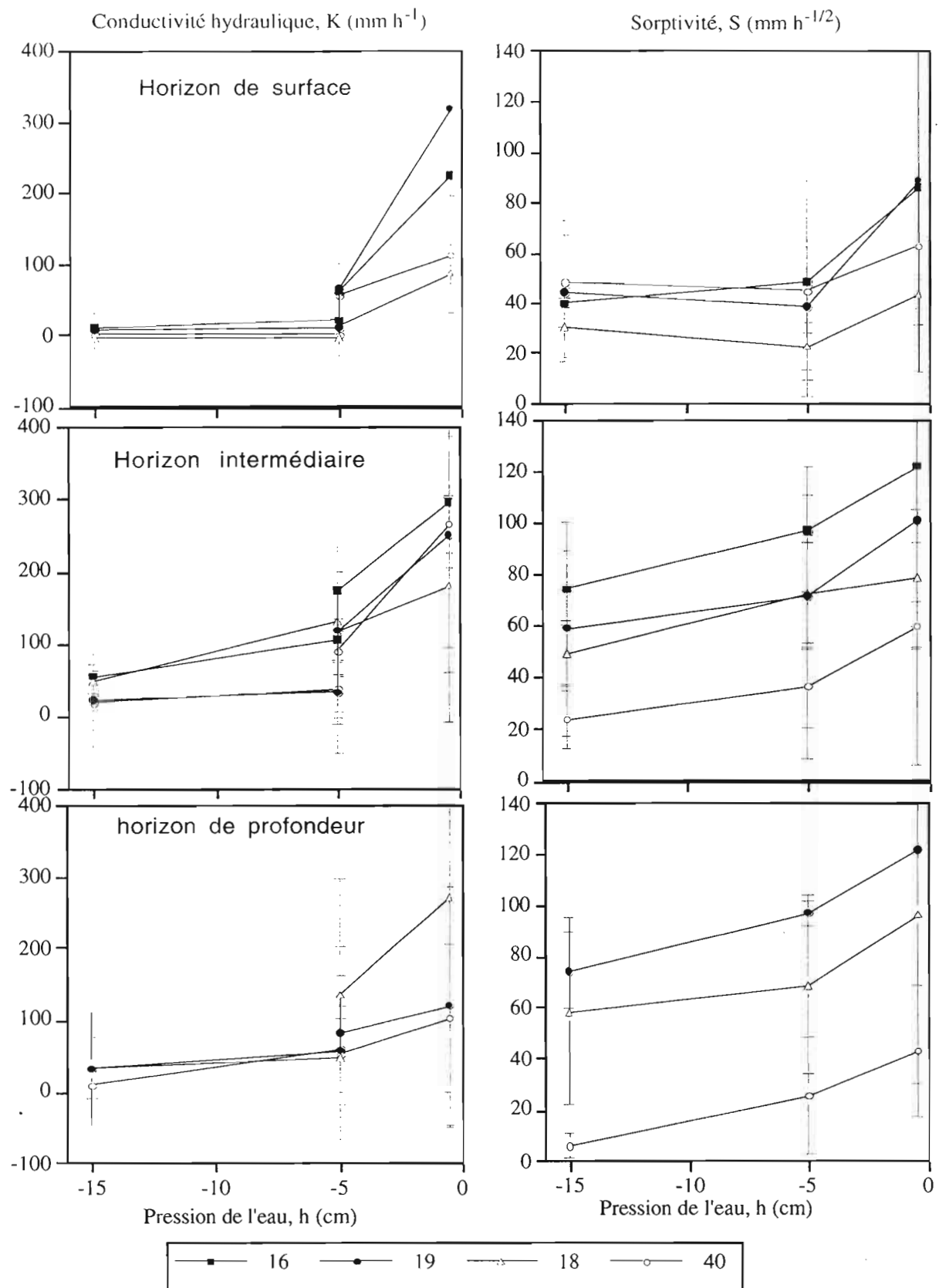


Figure 10 : Caractéristiques hydrauliques de la jachère (18) et de parcelles cultivées (16 et 19 : patates douces, 40 : maïs) pour trois horizons différents

### 2.2.2 - Relation entre la conductivité hydraulique et la teneur en eau

La relation entre la conductivité et la teneur en eau est indispensable pour le calcul du drainage par la loi de Darcy (voir chapitre 3). C'est aussi une relation qui décrit le comportement hydraulique du sol ; elle est donc importante dans l'utilisation de modèles hydriques. On rappelle que la détermination a été effectuée uniquement à la profondeur de 40 cm car c'est à cette profondeur que va être calculé le drainage. En effet, les racines ne sont pratiquement plus présentes à 40 cm et on peut donc supposer que l'eau et les éléments minéraux lixiviiés à cette profondeur sont perdus pour la plante.

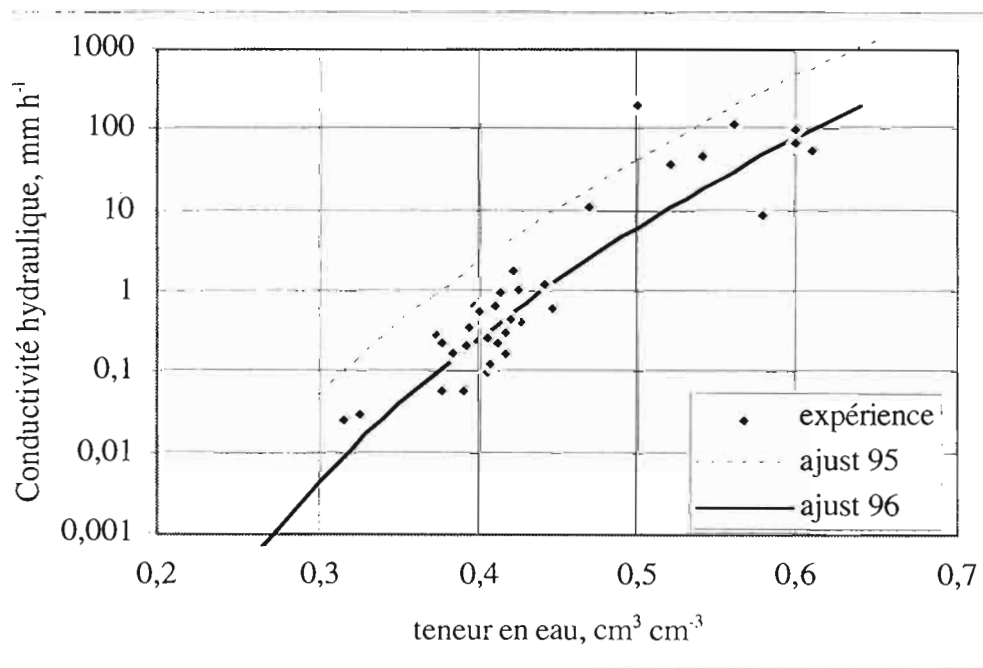
En 1995, la relation ajustée était de la forme :  $K(\theta) = a\theta^b$ . Cette relation ne diffère pas profondément de la relation de Mualem utilisée cette année. Simplement, cette dernière est facilement utilisable dans des modèles courants et utilise les paramètres déterminés dans la courbe de rétention en eau.

La relation ajustée de Mualem est de la forme :

$$K(\theta) = K_s \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^\alpha,$$

avec  $K_s$  conductivité hydraulique à saturation ( $\text{mm h}^{-1}$ ),  
 $\theta_r$  teneur en eau résiduelle ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ),  
 $\theta_s$  teneur en eau à saturation ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ),  
 $\alpha$  paramètre de forme.

La relation entre la conductivité hydraulique et la teneur en eau est présentée sur la Figure 11. Les paramètres ajustés sont les suivants :  $K_s = 250$ ,  $\theta_r = 0,02$ ,  $\theta_s = 0,65$   $\alpha = 13$ .



**Figure 11 : Relation entre la conductivité hydraulique et la teneur en eau, toutes parcelles confondues** (seules les données expérimentales de 1996 sont présentées : la courbe ajustée de l'année 1995 figure pour comparaison).



## 2.3 - Comparaison des résultats, discussions et conclusion

Les résultats nous ont permis de constater :

### 2.3.1 - En surface

- une modification importante de la structure sous culture qui passe de GrSa à PaGr,
- une diminution de la macroporosité et du diamètre moyen des pores,
- curieusement, cette modification de la macroporosité se traduit par une augmentation de la conductivité et de la sorptivité.

Deux raisons peuvent expliquer ces résultats contradictoires :

- une meilleure connexion des pores des volumes travaillés, caractérisés par des vides d'entassements entre agrégats et non par des vides biologiques comme sous jachère ;
- éventuellement un effet marqué de l'hydrophobicité sous jachère.

### 2.3.2 - En profondeur

- le travail du sol affecte peu la structure des horizons de profondeur, on observe seulement une légère fracturation de l'horizon intermédiaire (passage de la structure M1 à Mf) ;
- la conductivité, la sorptivité et la taille des pores hydrauliquement fonctionnels semblent légèrement diminuer. Toutefois, la variabilité des résultats ne nous permet pas de tirer des conclusions fiables.

### 2.3.3 - Conclusion

L'objectif général de ce travail est de quantifier les transferts d'eau et de nitrate dans le sol. Comme l'ont montré d'autres études (Curmi *et al.*, 1996), le mouvement de l'eau dans le sol dépend de la structure du sol. La variabilité des pratiques culturales mises en oeuvre nous ont donc conduit à tenter de prendre en compte l'organisation structurale du sol pour l'étude des transferts d'éléments minéraux.

Les résultats obtenus mettent en évidence une modification importante de la structure du sol et de ses caractéristiques hydrodynamiques à la suite de la mise en culture. Par contre, à partir des données actuelles (qui seront complétées lors du prochain cycle de culture), nous ne sommes pas en mesure de mettre en évidence des différences notables entre les deux types de travail du sol ou entre les diverses rotations des cultures.

Dans le calcul des bilans hydriques et minéraux, aucune différenciation ne sera faite entre les différentes parcelles observées pour les caractéristiques hydrodynamiques.

### 3. BILANS HYDRIQUES ET MINÉRAUX

La méthode de calcul des bilans hydriques et minéraux est donnée dans le rapport Duwig *et al.* (1996). Nous rappelons ici les points principaux :

- Le drainage (mm) est calculé quotidiennement à partir des données de charges hydrauliques et de teneurs en eau, en utilisant la loi de Darcy (Freeze, 1994) :

$$D = q\Delta t = -K(\theta)\text{grad}H\Delta t$$

où  $q$  est le flux d'eau ( $\text{mm j}^{-1}$ ),  
 $H$  la charge hydraulique (cm),  
 $K$  la conductivité hydraulique ( $\text{mm j}^{-1}$ )  
 $t$  le temps (1 jour).

- Les flux de nitrate et de potassium lixivié sont calculés quotidiennement (en  $\text{mg m}^{-2}$ ) en multipliant le drainage par la concentration en  $\text{N-NO}_3^-$  ou  $\text{K}^+$  (en  $\text{mg l}^{-1}$ ). On peut ensuite avoir un bilan d'eau et d'éléments minéraux lixiviés en sommant les calculs sur la période de mesures (ici, cette période correspond du 23/02/96 au 30/03/96).

- Le bilan hydrique a ensuite été calculé grâce à l'équation de conservation de la masse :

$$P = D + \text{ETR} + \Delta S$$

où  $P$  est la pluie (mm),  
 $D$  le drainage (mm),  
 $\Delta S$  la variation de stock d'eau dans la couche de sol considérée (mm),  
ETR l'évapotranspiration réelle (mm).

Le ruissellement éventuel a été négligé car les conductivités hydrauliques proche de la saturation sont élevées comparées aux intensités de pluie (le maximum enregistré est  $36,3 \text{ mm h}^{-1}$ ). Le bilan permet de calculer l'ETR et de la comparer à l'ETR estimée à partir de l'ETP (évapotranspiration potentielle) selon la méthode de Chopart et Siband (1988). On peut ainsi vérifier la validité des résultats obtenus à partir de la loi de Darcy.

#### 3.1 - Bilan hydrique

Les bilans sur chaque parcelle ont été calculés à 40 cm de profondeur, qui est une profondeur moyenne des profils et un niveau où il n'y a pratiquement plus de racines, donc où l'eau et les éléments minéraux ne sont plus accessibles par la plante.

Les flux hydriques **sont présentés** sur la Figure 12. Pour la parcelle D, il est identique à celui de la parcelle C car les données tensiométriques de la parcelle D n'ont pas été utilisées. Elles présentent des remontées capillaires très importantes et il est impossible de boucler un bilan d'eau positif. En effet, la profondeur de sol de cette parcelle est plus faible que celles des autres parcelles et les appareils placés à 40 cm sont installés à la limite du soubassement calcaire corallien. Il a donc été décidé d'utiliser le drainage calculé pour la parcelle C. De même pour la parcelle H (sous légumineuses) où le flux hydrique n'a pas été déterminé, nous avons utilisé le drainage calculé pour la parcelle G (les densités de couverts végétaux sont les plus ressemblants). Pour les parcelles sol nu A et B, le même drainage a été utilisé car le flux hydrique n'a été déterminé que sur l'une des deux parcelles.

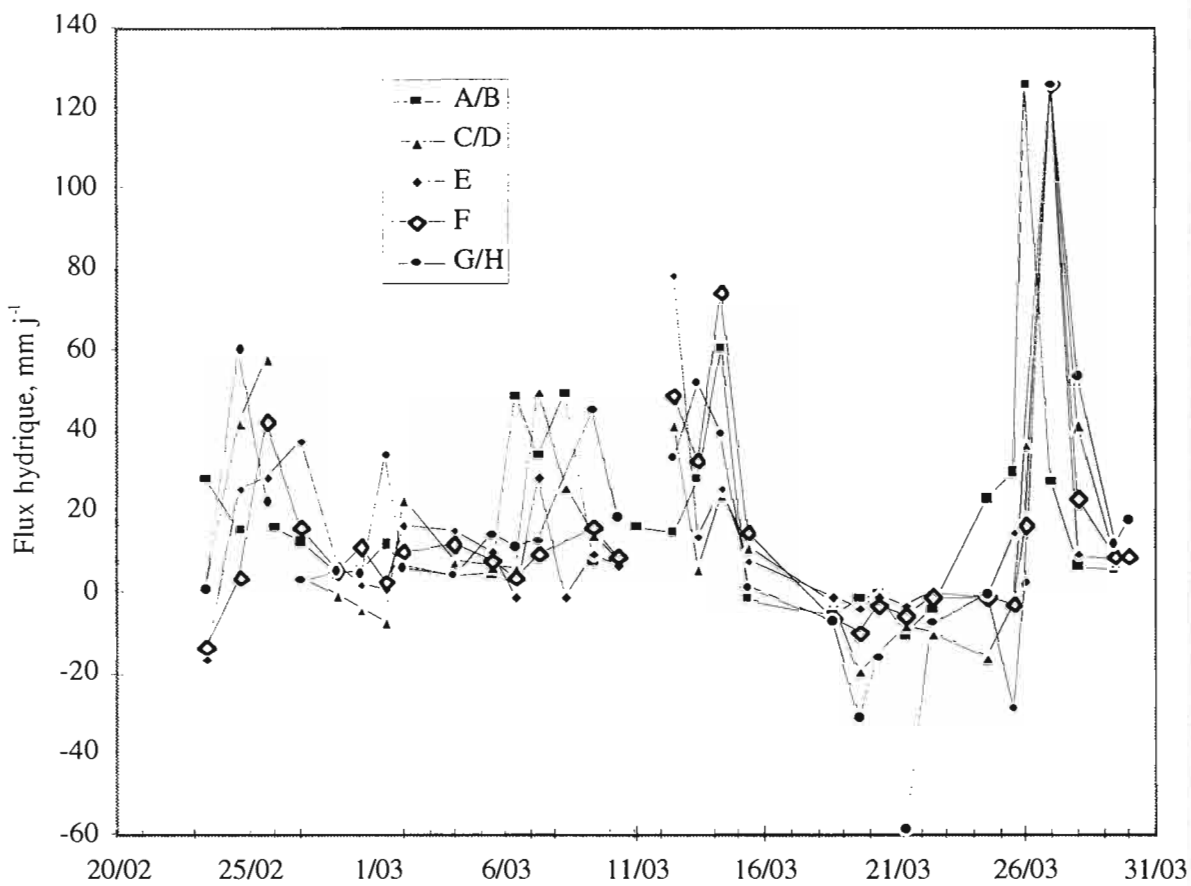
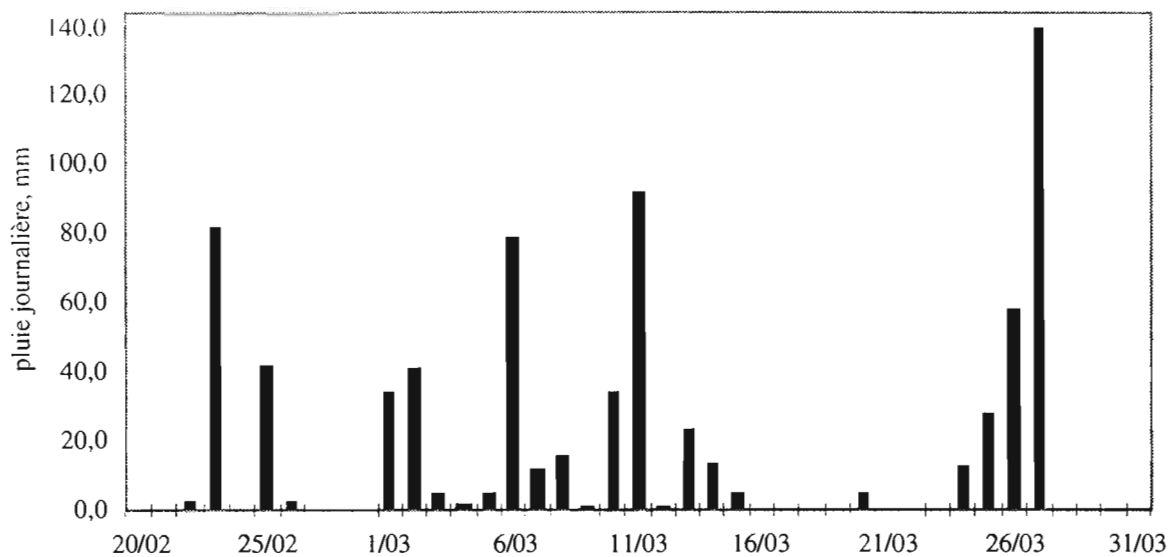


Figure 12 : Evolution de la pluviométrie journalière et du flux hydrique en fonction des jours, pour les différentes parcelles

Pour le calcul du bilan hydrique, deux périodes ont été considérées, qui sont séparées par une période sans pluie et où le drainage est négatif (remontées capillaires) sur toutes les parcelles. Sur certaines parcelles, le drainage est aussi négatif pendant quelques jours au cours des deux périodes considérées, mais il est impossible de couper chacune de ces périodes car il pleut pratiquement tous les jours. Une période choisie pour le calcul du bilan hydrique doit englober un épisode pluvieux en totalité.

Les données climatiques communes à toutes les parcelles sont données dans le tableau 8 suivant :

Période	Pluie, mm	ETP, mm	ETR estimée, mm
du 23/02 au 15/03/96	490,0	63,4	47,3
du 24/03 au 30/03/96	238,4	14,0	7,6

**Tableau 8 : données climatiques communes à toutes les parcelles**

Période du 23/02 au 15/03/96					
Parcelles	A/B	C/D	E	F	G/H
$\Delta S$ , mm	48,2	41,5	45,7	69,1	55,7
D, mm	417,7	385,7	381	375,4	400,6
ETR calculé, mm	24,1	62,8	63,3	45,5	33,7

Période du 24/03 au 30/03/96					
Parcelles	A/B	C/D	E	F	G/H
$\Delta S$ , mm	25,1	27,7	42,5	39,6	49,5
D, mm	203,7	203,1	190,3	187,4	181,6
ETR calculé, mm	9,6	7,6	5,6	11,4	7,3

**Tableau 9 : termes du bilan hydrique pour les différentes parcelles et pour les deux périodes**

En général, on observe peu de différences dans le flux hydrique pour les différentes parcelles étudiées (tableau 9). Bien sûr, le flux sous les parcelles sol nu est plus important que sous les parcelles cultivées. La pluviométrie de la période étudiée est très importante : 728,4 mm en 28 jours soit pratiquement 50 % de la pluviométrie moyenne annuelle et 33 % de la pluviométrie de l'année 1996. La consommation de la plante, qu'elle soit active ou pas, est faible par rapport à un tel apport de pluie.

On peut noter que les parcelles de maïs C/D, E et F (même travail du sol et fertilisation différente) ont un drainage quasiment identique.

Toutefois, l'ETR calculé à partir du bilan obtenu en utilisant la loi de Darcy varie sensiblement selon les parcelles, surtout les parcelles F et G/H sur la première période, où celle-ci est plus faible que pour C/D et E. Ceci est certainement dû à la variabilité spatiale dans les données (hétérogénéité du sol, écoulement non monodirectionnel de l'eau, couvert végétal hétérogène...) et peut-être à une différence dans le couvert végétal ou dans l'activité de la plante. Les parcelles sol nu A et B ont également une ETR faible durant la première période. Une des explications possibles, outre la variabilité spatiale est l'absence de plante. L'ETR n'est dû qu'à l'évaporation de l'eau dans l'horizon de surface du sol.

Enfin, on peut noter que, pour la première période, l'ETR estimée à partir de l'ETP est sous-estimée par rapport aux ETR calculées sur C/D et E, qui sont pratiquement identiques à l'ETP. Ceci semble logique pour une plante active durant une telle période où il pleut presque tous les jours et pendant laquelle la plante n'est jamais en stress hydrique.

### 3.2 - Bilan d'éléments minéraux

En moyenne, les concentrations en  $\text{N-NO}_3^-$  sont élevées (souvent supérieures à  $11,3 \text{ mg l}^{-1}$  de  $\text{N-NO}_3^-$ , qui équivaut à  $50 \text{ mg l}^{-1}$  de  $\text{NO}_3^-$ , le seuil limite de pollution de l'eau). On remarque sur la figure 13 que le pic de  $\text{N-NO}_3^-$  après le premier apport d'engrais est bien visible sur la parcelle B (parcelle sol nu fertilisée).

Les autres parcelles présentent également un pic moins important toutefois, et plus tôt dans le temps (l'apport d'engrais sur la parcelle B a été effectué une semaine après les autres parcelles). Le deuxième apport d'engrais a été effectué 12 jours avant le cyclone Béti (27 mars 1996). On observe le début du pic pour  $\text{N-NO}_3^-$ , malheureusement les données suivantes ne sont pas encore disponibles.

Le potassium est beaucoup plus retenu sur le sol que le nitrate. Le pic est donc moins haut et plus étalé. En effet, on observe le premier pic sur la parcelle B jusqu'au cyclone où le deuxième pic se superpose au premier. Les concentrations en potassium sur les parcelles cultivées sont faibles, comparativement à celles de pour  $\text{N-NO}_3^-$ .

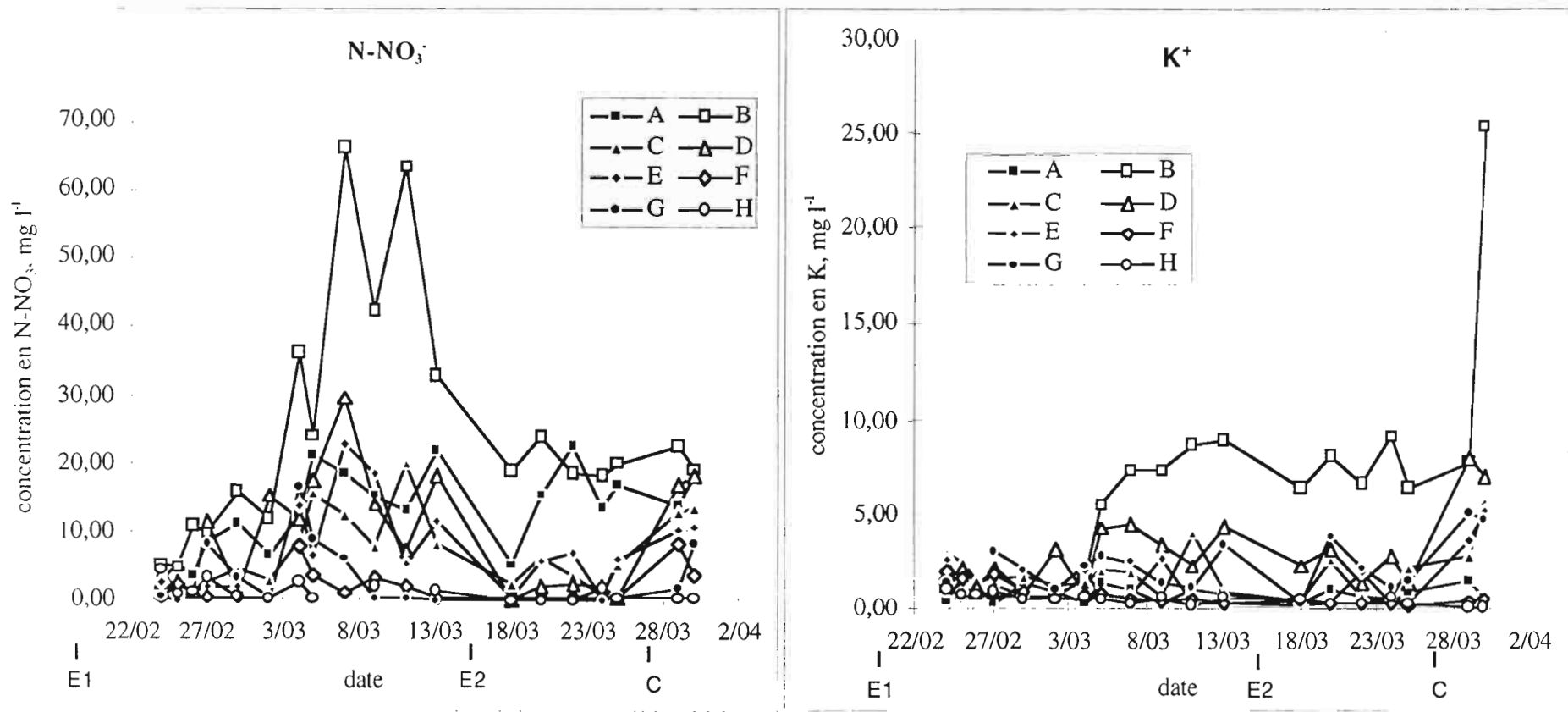
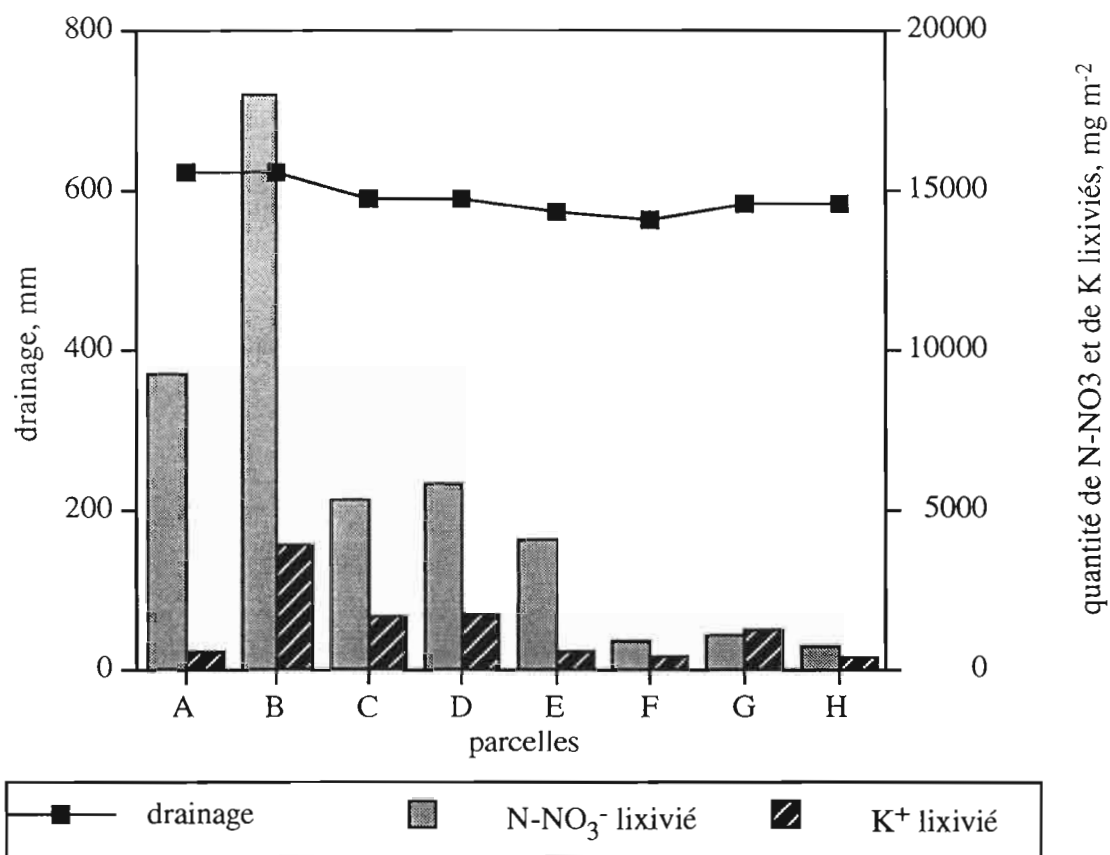


Figure 13 : évolution des concentrations en N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> et K<sup>+</sup> (mg l<sup>-1</sup>) au cours du cycle cultural. E1 et E2 situent les deux apports d'engrais et C la date du cyclone.



**Figure 14 : quantités d'eau drainée (mm), de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> et K<sup>+</sup> lixiviés (mg m<sup>-2</sup>) par parcelle, entre le 23/02 et le 30/03/96**

Les apports totaux en N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> et K<sup>+</sup> sont respectivement de 10 400 mg m<sup>-2</sup> et 13 950 mg m<sup>-2</sup>. La parcelle sol nu A est non fertilisée, on peut donc en déduire que la quantité de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> lixivié à partir de la production interne du sol (ou de la minéralisation de la matière organique du sol) est de 8824 mg m<sup>-2</sup> depuis le début de la saison des pluies. La différence des quantités lixiviées en N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> sur A et B montrent que le 30 mars, 15 jours seulement après le deuxième apport d'engrais, 85 % du N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> apporté est lixivié sur la parcelle B. Pour les parcelles cultivées, les quantités lixiviées en N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> sont quasiment identiques pour C, D et E. Sur la parcelles F, le N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> lixivié est nettement inférieur. Sur G et H, la lixiviation du N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> est très faible.

La lixiviation du potassium présente moins de variations selon les systèmes. La différence entre la lixiviation sous B et sous A donne 3540 mg m<sup>-2</sup> ce qui équivaut à 25 % de l'apport initial en potassium. En effet, le potassium est mieux retenu que le N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> dans ce sol, car les cations sont adsorbés sur les charges négatives de la matière organique du sol. Le 30 mars, le deuxième pic de potassium n'a pas été atteint. Les parcelles C, D et G présentent des quantités de potassium lixiviés quasiment identiques, ainsi que les parcelles A, H (toute deux non fertilisées) et F.

Des estimations de rendement ont été calculés à partir des résultats du CIRAD (Letournel et Corniaux, 1996). A partir de ces données et des teneurs en azote des échantillons végétaux, une estimation des prélèvements de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> par la culture a été réalisée (tableau 10).

Ces données permettront de boucler le bilan en  $\text{N-NO}_3^-$ , une fois que les concentrations en éléments minéraux seront disponibles sur la totalité du cycle.

Parcelles	C	D	E	F	G
Matière sèche ( $\text{kg ha}^{-1}$ )	2826	3452	3011	3523	5387
Quantité prélevée en $\text{N-NO}_3^-$ ( $\text{kg ha}^{-1}$ )	43,7	54,4	41,6	52,2	72,2
Quantité prélevée en $\text{K}^+$ ( $\text{kg ha}^{-1}$ )	49,4	66,1	53,3	63,2	112,1

**Tableau 10 : teneurs en matière sèche, en  $\text{N-NO}_3^-$  et en  $\text{K}^+$  dans les parties vertes en  $\text{kg ha}^{-1}$**

En supposant que le bilan soit bouclé, c'est-à-dire que la quantité de  $\text{N-NO}_3^-$  lixivié est complète et que la nitrification au cours de la période est d'environ  $90 \text{ kg ha}^{-1}$  (ce qui correspond à la perte de  $\text{N-NO}_3^-$  sous parcelle sol nu non fertilisée), on obtient une augmentation du stock de  $\text{N-NO}_3^-$  du sol de  $80$  à  $95 \text{ kg ha}^{-1}$  pour les parcelles C, D et E, de  $130 \text{ kg ha}^{-1}$  pour la parcelle F, et de  $110 \text{ kg ha}^{-1}$  pour la parcelle de graminées. La quantité de  $\text{N-NO}_3^-$  lixivié sur la parcelle F, particulièrement faible par rapport aux autres parcelles de maïs, ne peut être imputée à la consommation d'azote par la culture sur cette parcelle ; en effet, malgré des prélèvements similaires, la lixiviation reste élevée sur la parcelle D. Les mauvaises herbes nombreuses sur l'ensemble des parcelles ainsi que les repousses de patates douces (culture précédente) ont également pu contribuer au prélèvement d'azote. Cependant, ce point n'a pas été quantifié. Ce bilan, approximatif pour l'instant nous permet donc de vérifier notre calcul de  $\text{N-NO}_3^-$  lixivié.

De plus, on peut noter que les **graminées** exportent beaucoup plus de  $\text{N-NO}_3^-$  et de  $\text{K}^+$  que les parcelles de maïs. La lixiviation de ces deux éléments sous graminées est aussi relativement faible.

Dans ce calcul du bilan approximatif, nous avons supposé que l'immobilisation et la minéralisation de la matière organique sont identiques sous parcelles cultivées et sous parcelles sol nu. Cependant, l'apport de compost et l'incorporation des résidus de cultures juste avant le semis a pu provoquer l'immobilisation d'une partie du  $\text{N-NO}_3^-$  préalablement nitrifié. La production interne de  $\text{N-NO}_3^-$  par le sol ne seraient donc pas identique pour toutes les parcelles.

### 3.3 - Conclusion

La pluviométrie de cette année 1996 a été très importante, surtout durant la période étudiée, et les flux hydriques ne sont pas très variables selon les systèmes de culture (rotation, fertilisation ou travail du sol). Le calcul de la quantité drainée par la loi de Darcy nous a tout de même permis de vérifier notre méthode de calcul, en comparant l'évapotranspiration réelle calculée à partir de l'évapotranspiration potentielle et celle déterminée par le bilan hydrique. Nous avons donc validé l'étalonnage de la TDR et la relation entre la conductivité hydraulique et la teneur en eau, puisque ces deux relations sont déterminées empiriquement.

Les quantités de  $\text{N-NO}_3^-$  et  $\text{K}^+$  lixiviées sont par contre assez différentes selon les parcelles. Tout d'abord, malgré des pluies très intenses peu après la fertilisation (8 jours et 10 jours respectivement après les deux apports), la lixiviation au-dessous de la zone racinaire a été fortement limitée sur les parcelles cultivées durant la période étudiée, alors que  $85 \%$  de  $\text{N-NO}_3^-$



apporté par la fertilisation minérale ainsi que 90 kg ha<sup>-1</sup> issus de la minéralisation de la matière organique du sol ont été perdus sur sol nu, pendant les 45 jours suivant la première fertilisation. On observe une consommation des éléments minéraux peu variable selon les parcelles alors que la lixiviation l'est. On suppose que d'autres facteurs qui n'ont pas été étudiés, comme la présence d'adventices et l'incorporation de matière organique juste avant le semis ont joué.

#### 4. CONCLUSION GENERALE

Grâce aux observations et mesures physiques effectuées cette année, nous avons pu caractériser précisément les différents horizons qui forment le profil cultural. Nous avons déterminé les courbes caractéristiques (courbe de rétention en eau, relation entre la conductivité hydraulique et la teneur en eau) importantes pour évaluer le mécanisme de transfert de l'eau. Après trois années de mise en culture, les caractéristiques hydrodynamiques des différents horizons du sol ne montrent pas de réelle différence entre les différents systèmes de culture (rotation des cultures, fertilisation, travail du sol).

Cette deuxième année de mesures nous a permis de confirmer les craintes quant aux risques de pollution de la lentille d'eau douce par les fertilisants azotés. En effet, le drainage est très rapide dans ce sol, et le nitrate est très peu retenu. Pourtant cette année, les quantités d'éléments minéraux lixiviés au-dessous de la zone racinaire ont été relativement faibles sous parcelles cultivées contrairement à l'année dernière, car l'apport d'engrais a été fractionné en deux au moment où la plante était le plus susceptible de consommer rapidement les éléments minéraux. Sur la période d'étude, la lixiviation de  $N-NO_3^-$  dépasse  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  pour les parcelles C et D. Toutefois, cela correspond à une teneur moyenne de  $8,6 \text{ mg l}^{-1}$  en azote, soit  $38,1 \text{ mg l}^{-1}$  de  $NO_3^-$ ; cette valeur reste en dessous du seuil de pollution des eaux. Malgré un drainage très élevé, lié notamment au passage du cyclone Bédi, les eaux drainées sous culture restent en dessous du seuil de pollution acceptable.

On peut noter que la lixiviation du potassium est faible sur l'ensemble des parcelles comparé à l'apport par l'engrais.

Il est donc possible de limiter fortement la lixiviation des éléments minéraux. Il est pour cela important de fractionner au mieux les apports d'engrais, selon les besoins de la plante, et calculé en fonction de la densité de la culture.

Nous n'avons pas pu conclure sur des différences significatives entre les différents systèmes de culture. Ceux-ci ne semblent pas avoir des effets différenciés sur les processus de transfert de l'eau et des éléments minéraux.

Les conditions pluviométriques excessives de cette année 1996 nous ont aussi montré les limites d'utilisation de la méthode tensio/humidimétrique sur des sols très perméables, peu profonds et sous des pluies très intenses. Malgré une fréquence de mesures quotidienne, il a parfois été difficile d'obtenir des bilans hydriques équilibrés, les transferts d'eau s'effectuant parfois en quelques heures sous des pluies très intenses.

Cette année a donc été une étape importante dans la description du fonctionnement hydrochimique de ce sol et dans la confirmation des risques liés à l'utilisation d'engrais azotés. La troisième et dernière année de mesure nous permettra de comparer les résultats obtenus les années précédentes sous des conditions climatiques différentes, et d'observer une éventuelle évolution du sol au bout de cinq années de mise en culture.

## BIBLIOGRAPHIE

- Angulo-Jaramillo, R., Gaudet, J. P., Thon, J. L. et Vaulcin, M. (1996).** Measurement of hydraulic and mobile water content of field soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60: 710-715.
- Azooz, R. H., Arshad, M. A. et Franzluebbers, A. J. (1996).** Pore size distribution and hydraulic conductivity affected by Tillage in Northwestern Canada. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60: 1197-1201.
- Bourdon, E., Becquer, T., Duwig, C. et Nigote, W. (1997).** Etat structural et enracinement des végétaux cultivés sur Maré. Rapport de convention Science de la Vie, Agropédologie. ORSTOM, Nouméa. (en préparation).
- Clothier, B. E. et White, I. (1981).** Measurement of sorptivity and soil water diffusivity in the field. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 241-245.
- Clothier, B., Gaudet, J. P., Angulo, R. et Green, S. (1994).** Applications de la méthode TDR (Réflectométrie dans le Domaine Temporel) à la mesure de la teneur en eau et de la concentration en soluté dans les sols. Journée d'étude du 9 Février 1994 sur les méthodologies de la mesure en milieux poreux, Paris. Société française des thermiciens.
- Clothier, B. E., Heng, L., Magesan, G. N. et Vogeler, I. (1995).** The measured mobile-water content of unsaturated soil as a function of hydraulic regime. *Aust. J. Soil Res.*, 33: 397-414.
- Curmi, P., Mérot, P., Roger-Estrade, J. et Caneill, J. (1996).** Use of environmental isotopes for field study of water infiltration in the ploughed soil layer. *Geoderma*, 72: 203-217.
- Dasberg, S. et Dalton, F. N. (1985).** Time Domain Reflectometry field measurements of soil water content and electrical conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49: 293-297.
- Duwig, C., Becquer, T., Bourdon, E., Nigote, W. et Taputarai, L. (1996).** Suivi-hydrochimique sous différents systèmes de culture à Maré. Documents scientifiques et techniques. ORSTOM.
- Freeze, R. A. (1994).** Henry Darcy and the Fountains of Dijon. *Ground Water*, 32(1): 23-30.
- Jacobsen, O. H. et Schjonning, P. (1993).** A laboratory calibration of time domain reflectometry for soil water measurement including effects of bulk density and texture. *Journal of Hydrology*, 151: 147-157.
- Kutileck, M. et Nielsen, D. R. (1994).** *Soil Hydrology*. Cremlingen, Germany, Catena Verlag. 370pp
- Latham, M. et Mercky, P. (1983).** Etudes des sols des îles Loyauté. Carte pédologique et carte d'aptitude culturale et forestière à 1:200 000. ORSTOM.
- Létournel, F. et Corniaux, C. (1996).** Essai intensification et mécanisation de l'agriculture et protection de l'environnement sur île corallienne. Propositions de protocole de récolte de données et d'analyse de ces données. Analyse des données pour la saison 1995-1996. Rapport CIRAD, Nouvelle-Calédonie.

**Nadler, A., Dasberg, S. et Lapid, I. (1991).** Time Domain Reflectometry measurements of water content and electrical conductivity of layered soil columns. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55: 938.

**Perret, S. (1993).** Propriétés physiques, hydriques et mécaniques de sols andiques de la Réunion. Doctorat en Sciences Agronomiques. Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier.

**Roth, C. H., Malicki, M. A. et Plagge, R. (1992).** Empirical evaluation of the relationship between soil dielectric constant and volumetric water content as the basis for calibrating soil moisture measurements by TDR. *Journal of Soil Science*, 43: 1-13.

**Topp, G. C., Davis, J. L. et Annan, A. P. (1980).** Electromagnetic determination of soil water content : measurement in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, 16: 574-582.

**Valancogne, C. (1992).** Le bilan énergétique - Conséquences. Note dactylographiée. Laboratoire de bioclimatologie - INRA, Bordeaux.

**Van Genuchten, M. T. (1980).** A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44: 892-898.

**Vanclooster, M., Viane, P., Diels, J. et Christianens, K. (1994).** WAVE : a mathematical model for simulating water and agrochemicals in the soil and vadose environment. Leuven, Belgium, Institute for Land and Water Management, Katholieke Universiteit Leuven.

**Zegelin, S. J. et White, I. (1989).** Improved Field Probes for Soil Water Content and Electrical Conductivity Measurement Using Time Domain Reflectometry. *Water Resources Research*, 25(11): 2367-2376.

