

MINISTERE DE L'AGRICULTURE
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE DE MONTPELLIER

DIPLOME D'AGRONOMIE APPROFONDIE
Mise en valeur du milieu naturel
Mention : GENIE AGRONOMIQUE

ETUDE DE L'EVOLUTION DE L'ETAT HYDRIQUE D'UN ANDOSOL
SELON DIFFERENTS SYSTEMES DE CULTURE

VEILLET Sophie

Mémoire soutenu le 15 octobre 1993, à MONTPELLIER

JURY :

- J.P. LUC
- J.C. REMY
- J. WERY
- P. HERMANN
- P. PEREZ



Centre de coopération internationale
en recherche agronomique pour le développement
Département des systèmes agro-alimentaires et ruraux
CIRAD-SAR

SOMMAIRE

RESUME	p1
LISTE DES FIGURES DU TEXTE	p2
INTRODUCTION	p5
I. PRESENTATION DE L'ETUDE	p7
1- Le contexte du milieu naturel	p7
1-1 Le climat des Hauts de l'Ouest	
1-2 Les sols des Hauts de l'Ouest	
1-3 Contraintes résultantes	
2- Le contexte agricole	p10
2-1 Les systèmes de culture des Hauts de l'Ouest	
2-2 La recherche agronomique dans les Hauts de l'Ouest	
2-3 Les plantes de couverture : premiers résultats	
3- L'étude	p11
3-1 Objectifs	
3-2 Choix des paramètres mesurés	
3-3 Choix du site expérimental et dispositif	
II. CARACTERISATION HYDRODYNAMIQUE DU SITE	p17
1- Etablissement des courbes de rétention en laboratoire	p17
1-1 Protocole	
1-2 Résultats	
2- Mesure de la conductivité hydraulique in situ	p19
2-1 Protocole	
2-2 Résultats	
3- Conclusion	p22
III MISE EN PLACE DU SUIVI ET ETALONNAGE DES APPAREILS	p25
1- Mesure de l'humidité volumique: la sonde TDR	p25
1-1 Principe	
1-2 Matériel	
1-3 Protocole	
1-4 Etalonnage	

2- Mesure de l'état énergétique de l'eau dans le sol: la tensiométrie	p27
2-1 Le tensiomètre à bougie	
2-2 Le tensiomètre résistif	
3- Détermination de la zone d'extraction racinaire: profils	p31
3-1 Description	
3-2 Analyse	
IV. ANALYSE DU SUIVI ET SYNTHÈSE	p35
1- Calage du suivi	p35
2- Variabilité et représentativité des mesures	p35
3- Analyse du suivi pendant le cycle du haricot	p37
3-1 Evolution en sol nu	
3-2 Evolution sous kikuyu	
3-3 Evolution sous lotier	
3-4 Bilan de la période	
4- Analyse du suivi après haricot	p44
4-1 Description du fonctionnement	
4-2 Bilan de la période	
5- Synthèse	p47
CONCLUSION	p49
BIBLIOGRAPHIE	p51
ANNEXES	p55

RESUME

Les Hauts de l'Ouest constituent à La Réunion une zone à fortes contraintes naturelles. L'érosion en particulier, entretenue par des pratiques culturales compromettantes, menace la pérennité des exploitations. Dans le cadre du Plan d'Aménagement des Hauts, le CIRAD expérimente des systèmes de culture conservateurs, intégrant une couverture vive permanente du sol.

Les premières études ont montré l'efficacité de ces plantes de couverture pour limiter l'érosion et restaurer la fertilité des sols, tout en réduisant les coûts de production. Reste alors à préciser leur influence sur la plante.

Afin de déterminer l'impact des plantes de couverture sur les modalités d'alimentation hydrique des cultures nous avons mis en place un dispositif de suivi tensio-neutronique sur trois parcelles expérimentales de la station CIRAD de Colimaçons (Hauts de l'Ouest):

- ◆ haricot en sol nu,
- ◆ haricot sous couverture vive de kikuyu,
- ◆ haricot sous couverture vive de lotier.

Les mesures d'humidité se sont avérées trop superficielles par rapport à l'enracinement des couvertures pour pouvoir être intéressantes. Par contre le suivi tensiométrique nous a permis de relier les profils racinaires réalisés aux flux hydriques mesurés en profondeur.

Nous avons ainsi observé que la couverture induit des différences dans le mode d'enracinement de la culture. Elle privilégie en effet une concentration des racines de haricot dans les horizons superficiels alors qu'en sol nu l'enracinement descend plus en profondeur.

Ces différences se répercutent sur les modalités d'alimentation hydrique du haricot et sur le fonctionnement hydrodynamique profond du sol; Le kikuyu permet par son enracinement d'exploiter l'eau en profondeur, cette consommation équivalant globalement à l'évaporation en sol nu. A l'inverse l'effet mulch sous lotier, associé à un enracinement superficiel, protège les couches profondes de l'assèchement.

Cependant nous n'avons pas observé d'effet néfaste des couvertures sur l'alimentation hydrique du haricot alors qu'à la reprise des couvertures (après la récolte) l'assèchement du sol est plus poussé sous kikuyu. Ces observations permettent de conclure que la gestion des couvertures est bien maîtrisée puisqu'elle permet un équilibre entre l'effet de protection dû à la couverture et sa consommation.

FIGURES DANS LE TEXTE

PARTIE I.

Fig.I.1 Pluviométrie comparée de deux sites de la zone "sous le vent" (médiane sur la période 1966-1985)

Fig.I.2 Schéma du bilan hydrique

Fig.I.3 Localisation du site expérimental

Fig.I.4 Dispositif expérimental

PARTIE II.

Fig.II.1 Relation succion - humidité pondérale - h_z Aa et Sa

Fig.II.2 Comparaison des conductivités hydrauliques de deux types de sol

Fig.II.3 Relation conductivité hydraulique - succion

Fig.II.4 Relation teneur en eau / potentiel de l'eau: comparaison des méthodologies employées

PARTIE III.

Fig.III.1 Sonde TDR: relation entre l'étalonnage de terrain et l'étalonnage de Topp

Fig.III.2 Dispositif d'étalonnage du capteur de pression

Fig.III.3 Etalonnage du capteur de pression

Fig.III.4 Schéma du capteur Watermark

Fig.III.5 Etalonnages du capteur Watermark

Fig.III.6 Profils racinaires schématiques

Fig.III.7 Impact des plantes de couverture sur la zone d'exploration racinaire

PARTIE IV.

Fig.IV.1 Calage du suivi

Fig.IV.2 Relation succion (tensiomètres) / humidité volumique (sonde TDR)

Fig.IV.3 Evolution à 20 cm - localisation des profils

Fig.IV.4 Profils tensiométriques en sol nu

Fig.IV.5 Gradients de charge hydraulique en profondeur en sol nu

Fig.IV.6 Gradients de charge hydraulique dans les horizons superficiels en sol nu (site haut)

Fig.IV.7 Profils tensiométriques sous kikuyu

Fig.IV.8 Gradients de charge hydraulique dans les horizons superficiels sous kikuyu

Fig.IV.9 Profils tensiométriques sous lotier

Fig.IV.10 Evolution moyenne de l'humidité sur 20 cm

Fig.IV.11 Gradients de charge hydraulique dans les horizons superficiels en sol nu et sous kikuyu

Fig.IV.12 Evolution comparée de la charge hydraulique en profondeur (100 cm)

INTRODUCTION

Ce travail s'inscrit dans le cadre des recherches menées par le CIRAD sur la mise au point de systèmes de culture adaptés au milieu des Hauts de l'Ouest réunionnais. Les graves problèmes d'érosion dans cette région ont en effet motivé l'implantation de systèmes associant des plantes de couverture permanente aux cultures.

Les études menées jusqu'à présent ont mis en évidence l'effet bénéfique des couvertures sur la protection et même la restauration des potentialités agricoles du milieu. Ces études visaient à caractériser le comportement hydrodynamique des horizons superficiels, indépendamment du devenir et de la disponibilité de l'eau infiltrée.

Notre travail consiste alors à déterminer l'influence des plantes de couverture sur la culture en terme d'alimentation en eau.

Dans ce but, un suivi de l'état hydrique du sol au cours de la saison sèche est mis en place sur trois parcelles:

- ◆ haricot en sol nu,
- ◆ haricot sous couverture de kikuyu,
- ◆ haricot sous couverture de lotier.

L'essentiel des mesures est axé sur la tensiométrie. Ce choix est motivé par le fait que la succion de l'eau du sol est un bon indicateur de sa disponibilité pour la plante. Elle permet de plus d'évaluer les flux hydriques dans le sol et donc d'appréhender celui-ci en terme de fonctionnement hydrodynamique.

I. PRESENTATION DE L'ETUDE

1- LE CONTEXTE DU MILIEU NATUREL

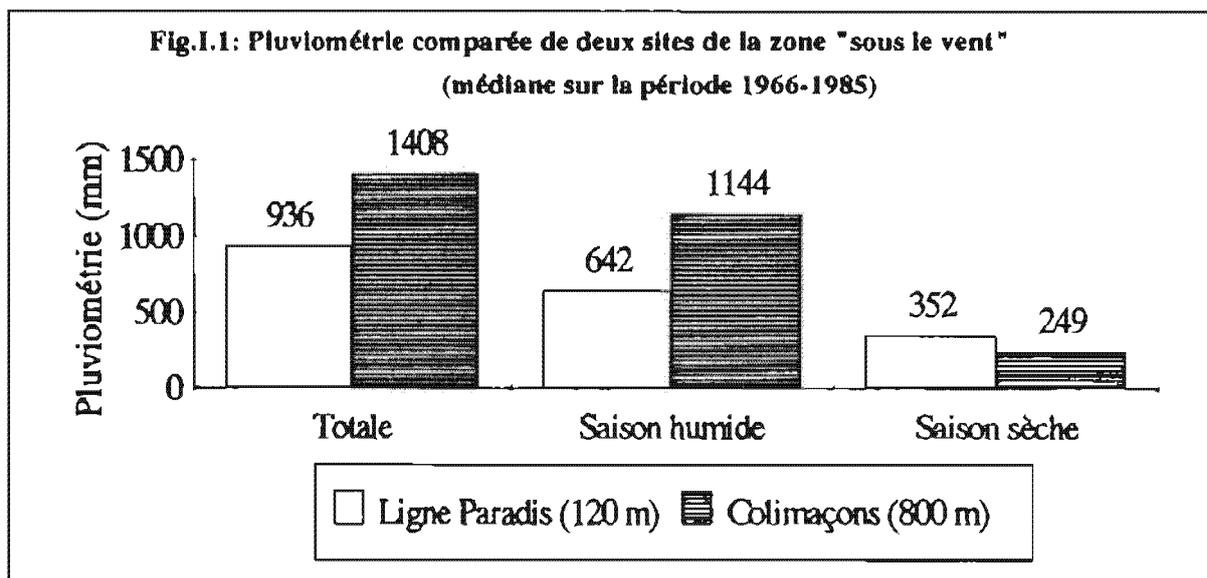
1-1 Le climat des Hauts de l'Ouest (GENERE, 1985; RAUNET, 1991)

Du fait de sa position en latitude, La Réunion est soumise à un climat tropical austral à deux saisons: l'une chaude et humide (décembre à avril), l'autre fraîche et relativement sèche (mai à novembre).

L'influence des courants d'Est et la configuration orographique de l'île la divisent en deux régions (annexe 1): la zone "au vent" soumise aux alizés (2000 à 8000 mm/an) et la zone "sous le vent" relativement abritée par le relief (600 à 2500 mm/an). Dans chacune de ces régions les paramètres climatiques évoluent en fonction de l'altitude.

Situés dans la partie "sous le vent" au dessus de 600 m d'altitude, les Hauts de l'Ouest sont soumis à une pluviométrie moyenne de 1500 mm/an. Il faut cependant souligner la grande variabilité inter-annuelle des précipitations, les quantités d'eau dépendant notamment du nombre et de l'importance des dépressions cycloniques qui passent au large de l'île l'été (décembre à avril). L'utilisation des moyennes pluviométriques n'a donc qu'un intérêt limité en agriculture, les problèmes étant plus liés à la répartition des pluies qu'à la valeur totale de la pluviométrie.

A titre d'exemple, la figure I.1 (voir aussi annexe 2) présente la pluviosité de deux sites du versant "sous le vent": l'un sur le littoral (Ligne paradis), l'autre dans les Hauts de l'Ouest (Colimaçons).



Si les pluies sont effectivement supérieures en altitude (1408 mm à 800 m contre 936 mm à 120 m), les précipitations sont nettement plus regroupées sur la période cyclonique à Colimaçons, délimitant ainsi une saison sèche marquée.

Notons cependant que l'enneigement important dans les Hauts de l'Ouest tempère l'effet du déficit pluviométrique. Il y réduit l'insolation à 4 ou 5 h et l'humidité relative de l'air reste très élevée (85% à 600 m - 90% entre 1000 et 1500 m) en raison des brouillards fréquents.

1-2 Les sols des Hauts de l'Ouest

Le versant Ouest du Piton des Neiges présente une différenciation des sols liée à l'altitude et au climat:

- ◆ sols bruns de 350 à 600 m,
- ◆ andosols désaturés non perhydratés de 600 à 1300 m,
- ◆ andosols désaturés perhydratés de 1300 à 1600 m,
- ◆ et au delà andosols vitriques ou podzoliques.

Les sols des Hauts de l'Ouest sont donc uniquement constitués d'andosols, sols les plus répandus à la Réunion (annexe 3).

□ formation

Ce sont des sols jeunes formés sur cendres volcaniques (pyroclastites datées de - 40 000 à - 15 000 ans). Le processus de leur formation, l'andosolisation, correspond à l'hydrolyse des verres volcaniques, libérant des produits amorphes (hydroxydes de fer et d'alumine) ainsi que des aluminosilicates "para-cristallins" (allophane, imogolite).

Ces constituants absorbent et fixent les acides humiques, formant ainsi des gels organo-minéraux "amorphes" (aux rayons X), dont le maintien est favorisé par une hydratation élevée et quasi-permanente. C'est la présence de ces gels qui confère aux andosols leurs caractéristiques très spécifiques.

□ profil-type

L'horizon Aa (20-30 cm) est de couleur brun-foncée car riche en matière organique (10-20%). Sous végétation naturelle, il présente une structure bien marquée en gros agrégats grumeleux et cohérents. La texture est sablo-limoneuse au toucher et la densité apparente proche de 0.8-0.9.

L'horizon d'altération Sa (50-100 cm) est de couleur brun-jaune (5% de matière organique). Le toucher limoneux caractéristique est dû aux gels organo-minéraux hydratés. La structure est continue et la densité apparente faible (0.3-0.5). La porosité totale très élevée est dominée par la microporosité.

propriétés physiques

La nature et l'organisation intime des constituants des andosols expliquent les propriétés particulières de ces sols:

- ◆ une surface spécifique élevée,
- ◆ une faible densité apparente,
- ◆ une forte rétention en eau liée à une microporosité importante (les teneurs en eau pondérales peuvent dépasser 200%),
- ◆ une bonne stabilité structurale à l'état naturel.

Cependant lors d'une dessiccation poussée (séchage à l'air), des macro-agrégats stables mais sans cohésion entre eux ("pseudo-sables" hydrophobes) apparaissent, ce qui modifie les propriétés physiques du matériau. Au delà d'un seuil correspondant à pF 3.8 cette deshydratation est irréversible (PERRET, 1992).

Les sols cultivés subissent en surface de telles évolutions et deviennent peu à peu particulièrement érodibles, par "flotation" des pseudo-sables.

1-3 Contraintes résultantes

La mise en culture des andosols des Hauts de l'Ouest se heurte à deux problèmes majeurs:

un problème de gestion de l'eau associé à:

- ◆ une saison sèche marquée alors que les cultures se font en pluvial
- ◆ un sol ne facilitant pas l'alimentation hydrique des plantes:
 - RFU relativement faible (forte microporosité des andosols) malgré de fortes humidités pondérales,
 - difficultés d'exploitation des horizons profonds par les racines,
 - baisse de la conductivité hydraulique du sol et de ses capacités à retenir l'eau s'il a subi une dessiccation irréversible.

un risque érosif lié à:

- ◆ la sensibilité particulière des andosols mal ou trop travaillés (formation de pseudo-sables), surtout si la culture est peu couvrante,
- ◆ une pluviosité sous forme d'orages voire même de cyclones,
- ◆ une topographie mouvementée (pentes moyennes de 15 à 20°).

2- LE CONTEXTE AGRICOLE

2-1 Les systèmes de culture des Hauts de l'Ouest

Le "géranium rosat" (*pélargonium à parfum*), plante sarclée et peu couvrante, a longtemps été considéré comme la culture pivot des Hauts de l'Ouest. Il a en effet permis, à la fin du siècle dernier, la mise en valeur des terrains encore inexploités de cette zone (MICHELLON et al, 1991). C'était alors une culture itinérante sur défrichage d'*Acacia decurrens*, ce qui permettait une restauration régulière de la fertilité des sols.

Mais au cours des deux dernières décennies, l'évolution rapide de l'économie de l'île a entraîné une profonde mutation des exploitations:

- ◆ sédentarisation de la culture entraînant une baisse des rendements (appauvrissement des sols en l'absence de lutte anti-érosive)
- ◆ diminution des actifs agricoles de la zone (alors que la culture traditionnelle nécessite une main d'oeuvre importante)
- ◆ "professionnalisation" des agriculteurs séduits par d'autres spéculations plus rémunératrices (élevage, cultures maraîchères ...).

En 1990, le géranium ne couvre plus que 1300 ha dans les Hauts de l'Ouest (contre 4000 ha en 1973). Il semble aujourd'hui que les contraintes physiques (pentes, fertilité faible des sols érodés, enclavement des exploitations ...) et socio-économiques (faible niveau de formation des exploitants, petite taille des exploitations, trésorerie défaillante ...) soient autant de freins au développement agricole de la région (MICHELLON, CHASTEL, 1988).

2-2 La recherche agronomique dans les Hauts de l'Ouest

Depuis plusieurs années la recherche (CIRAD) et le développement (Chambre d'Agriculture, APR, SAFER ...) s'associent pour proposer une alternative au système "monoculture de géranium", sous-productif et dégradant pour le milieu naturel.

L'objectif est le développement agricole de la zone grâce à:

- ◆ une augmentation de la production d'essence de géranium (dont l'huile essentielle reste, en valeur, la deuxième production agricole d'exportation après le sucre (CHASTEL, 1990))
- ◆ une diversification des cultures destinées au marché local (vivrières, maraîchères et élevage).

Un préalable indispensable à l'intensification des systèmes est la lutte contre l'érosion. Or parmi les différents paramètres déterminant l'érodibilité des substrats agricoles, la couverture du sol est l'un des plus importants et surtout l'un de ceux que l'on peut modifier (MICHELLON et al, 1991).

2-3 Les plantes de couverture: premiers résultats

L'utilisation des plantes de couverture s'est fortement développée parallèlement aux techniques de semis direct à partir des années 60. En 1985, les surfaces ainsi cultivées représentent cinq millions d'hectares aux Etats Unis (maïs, soja, coton) et un million d'hectares au Brésil (soja, céréales). Elles sont aussi utilisées en Afrique (Nigéria), en Asie (Chine et Thaïlande) et en Australie (LAL, 1989; ALMEIDA, RODRIGUES, 1985; PHILLIPS, 1985). Il existe ainsi une multitude de références sur le sujet pour des climats, des sols et des agricultures variés.

A la Réunion, la station CIRAD de Colimaçons (Hauts de l'Ouest) teste depuis 1988 un itinéraire technique de travail minimum du sol avec couverture permanente. Les études sont réalisées par comparaison de systèmes de cultures intensifs (géranium, cultures maraichères ou vivrières, cultures fourragères) en sol nu et sous couverture vive de:

- ◆ kikuyu (*Pennisetum clandestinum*), graminée tropicale introduite,
- ◆ lotier (*Lotus uliginosus* Maku), légumineuse.

Les premiers résultats ont permis de mettre en évidence un effet positif des couvertures pour:

- ◆ limiter l'érosion (ancrage racinaire des structures superficielles, protection contre l'action des gouttes de pluie, filtrage des eaux de ruissellement, diminution de la compétence de la nappe ruissellante) (GOUBAND, 1992; PERRET, 1992)
- ◆ restaurer la fertilité des sols (la couverture fournit des résidus au sol qui stimulent l'activité microbienne et augmentent la minéralisation) (MICHELLON et al, 1991; BURLE, 1993)
- ◆ limiter la prolifération des adventices (semences photosensibles masquées, effets allelopathiques ...) (FONTAR et THOMAS, 1992; HUMEAU, 1993).

Des modifications sur les comportements intrinsèques du sol sont aussi induites: porosité de rétention utile à la plante plus importante (la couverture protège les couches superficielles d'un séchage bioclimatique trop important) et augmentation de la conductivité hydraulique (MONIMEAU, 1991; BURLE, 1993). Ce comportement particulier induit par la couverture doit avoir des conséquences agronomiques qu'il reste à définir.

3- L'ETUDE

3-1 Objectifs

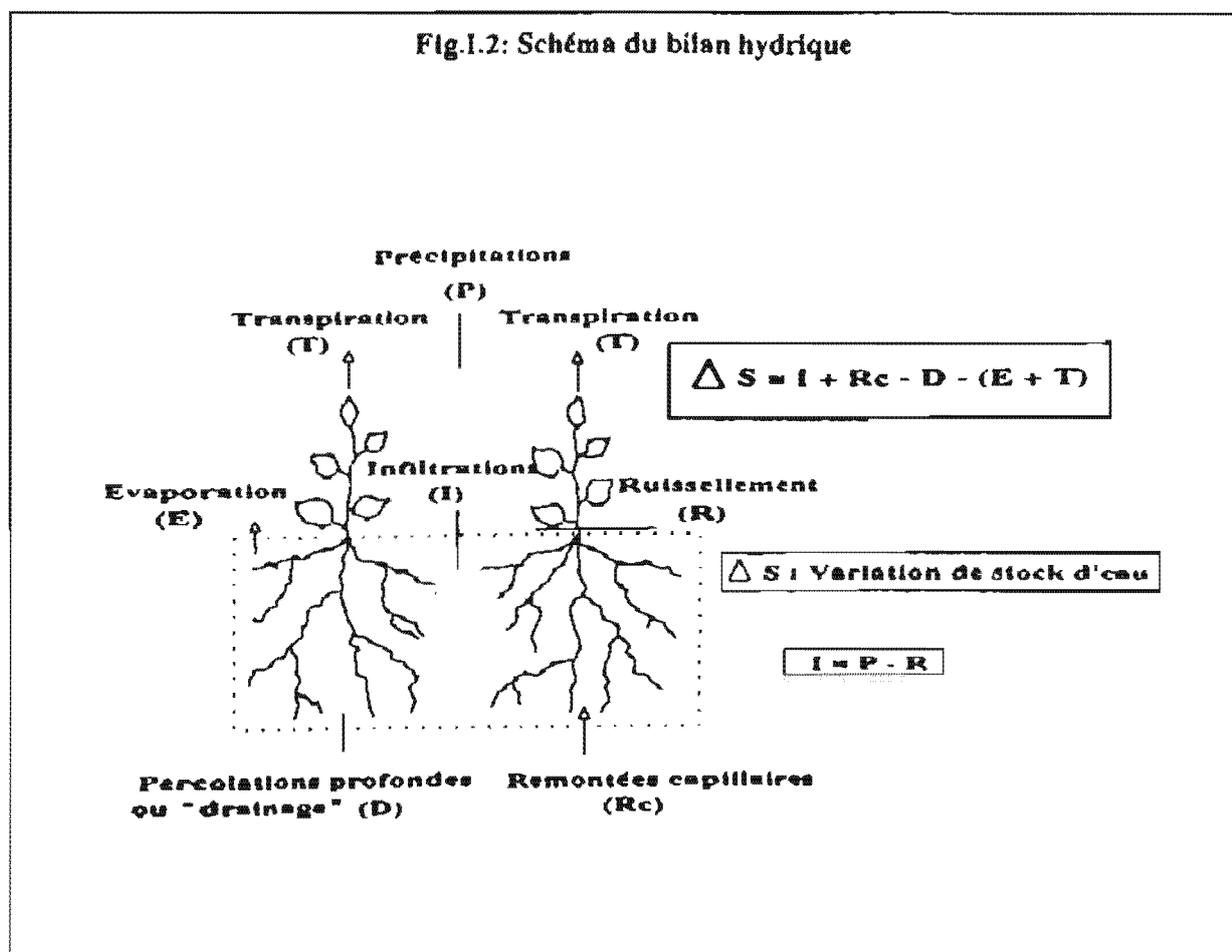
L'ensemble des mesures de stock d'eau réalisées dans les couches superficielles montrent des valeurs supérieures sous couverture par rapport au sol nu. Le sol est plus humide et sa capacité à stocker l'eau plus importante. Compte-tenu de l'évidente consommation en eau supplémentaire occasionnée par la couverture végétale, il paraissait intéressant de connaître l'influence de l'amélioration porale du substrat (circulation et rétention d'eau) sur les termes des bilans hydriques comparés: culture sur sol nu / culture sous couverture.

Le principe de cette étude est de suivre, au cours de la saison sèche, l'évolution de l'état hydrique du sol sous couverture et en sol nu, afin de déterminer l'impact des plantes de couverture sur les modalités d'alimentation hydrique des plantes.

3-2 Choix des paramètres mesurés

L'étude des comportements hydriques du sol et donc le suivi des flux d'eau nécessite le suivi des termes du bilan hydrique.

L'énoncé du bilan hydrique (fig.1.2) est un simple énoncé de la loi de conservation de la matière.



□ mesure des stocks d'eau (ΔS)

La teneur en eau volumique se prête directement aux calculs de stock d'eau. Sa mesure nécessite:

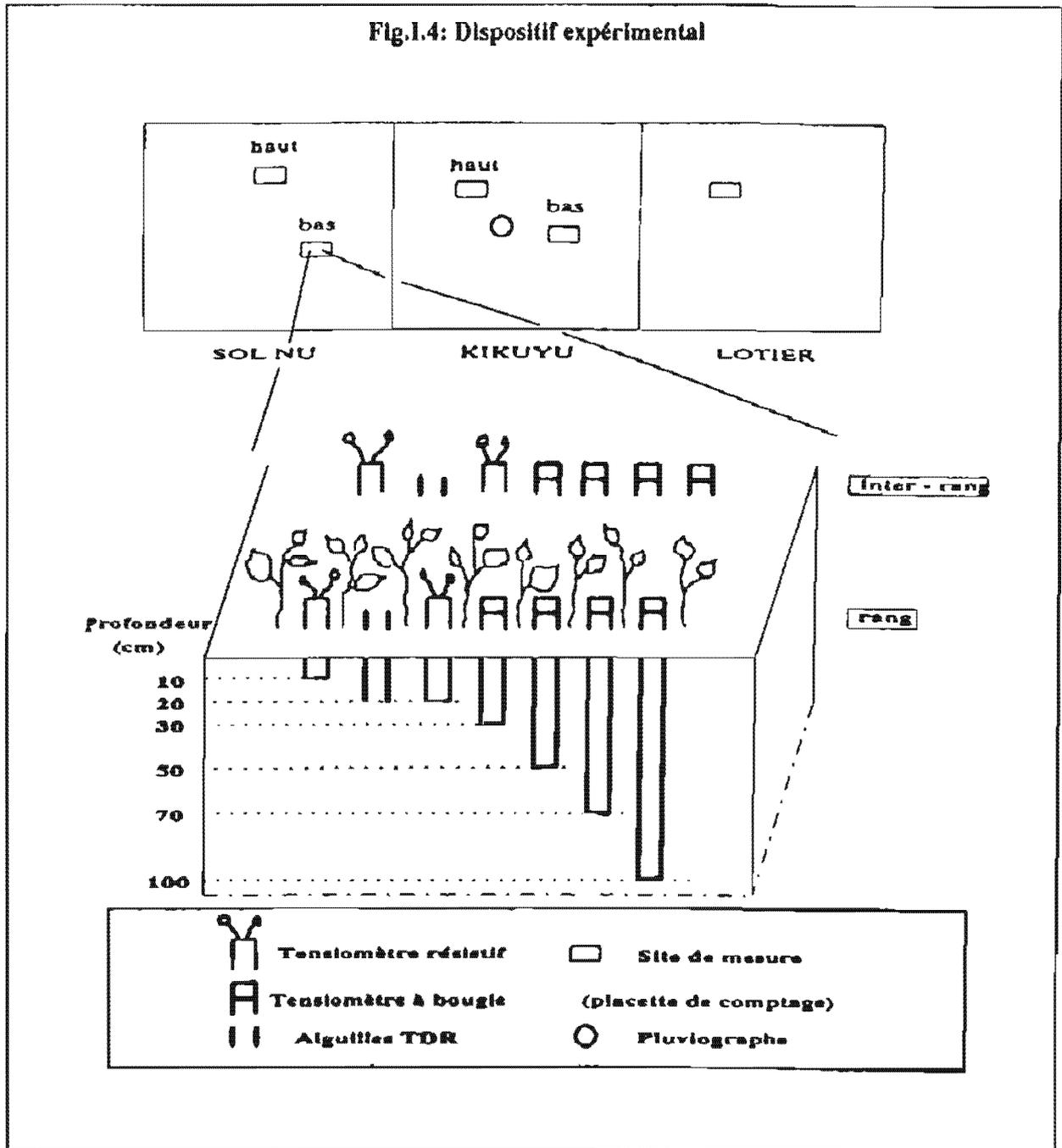
- ♦ soit le prélèvement d'un échantillon de sol de volume connu (cylindre)
- ♦ soit l'utilisation d'une sonde nucléaire ou réflectométrique, dont l'avantage est de permettre des mesures répétitives, toujours sur le même volume du même échantillon, et donc de contourner en partie le problème de la variabilité spatiale.

Elles sont en effet comparables puisque leur surface est semblable, la pente est relativement homogène, leur histoire est la même (l'antécédent Canne à sucre remonte à 1990, date d'implantation des couvertures) et leur proximité devrait limiter l'effet de l'hétérogénéité spatiale du terrain.

La culture choisie est le haricot (variété Marlat) dont l'enracinement peu profond doit permettre une évaluation complète des flux hydriques concernés. L'itinéraire technique est décrit en annexe 4.

Les mesures sont effectuées sur des placettes de comptage du CIRAD ce qui permet d'avoir accès à des données telles que les composantes du rendement.

Fig.1.4: Dispositif expérimental



La lourdeur du dispositif a limité le nombre de répétitions à 2 sur sol nu, 2 sur kikuyu, 1 sur lotier (moins couvrant que le kikuyu en début de suivi). Sur chaque site le suivi a été effectué dans le rang et dans l'inter-rang (fig.1.4).

La pluviométrie étant soumise à une forte variabilité spatiale dans les Hauts de l'Ouest, nous avons choisi d'installer un pluviographe sur l'une des trois parcelles (fig.1.4). Cet appareil nous donne les valeurs des précipitations à 0.5 mm près sur le site. Cependant les précipitations occultes ne peuvent être mesurées. Leur importance n'est sans doute pas négligeable étant donné la forte nébulosité et leur influence doit être différente selon la couverture du sol (celle-ci facilitant le captage de la rosée).

II. CARACTERISATION HYDRODYNAMIQUE DU SITE

Les rappels théoriques concernant l'eau dans le sol (caractérisation triphasique du réservoir sol, état énergétique de l'eau et lois de l'écoulement) sont exposés en annexe 5.

La caractérisation hydrodynamique du site implique de déterminer les deux relations essentielles:

- ◆ la relation $\Psi(\theta)$, courbe succion-humidité caractéristique du sol,
- ◆ la relation $K(\theta)$, qui permet de connaître avec quelle facilité l'eau s'écoulera à la suite d'une variation d'humidité entre deux tranches de sol.

1- ETABLISSEMENT DES COURBES DE RETENTION EN LABORATOIRE

1-1 Protocole

Les courbes potentiel-teneur en eau ont été obtenues en soumettant des échantillons préalablement saturés à des pressions pneumatiques:

- ◆ dans une cellule à plaque de céramique poreuse pour $pF=1$, $pF=1.5$, $pF=2$, $pF=2.5$, $pF=3$, $pF=3.5$
- ◆ dans une presse à membrane cellulosique pour $pF=4.2$ (annexe 6).

A une pression donnée, tous les pores de taille supérieure ou équivalente à cette pression sont vidés.

Nous avons manipulé des échantillons non remaniés (mottes centimétriques) pour rester proches des conditions au champ (structure du sol, distribution des pores) déterminantes de la rétention de l'eau dans le sol aux basses succions (HILLEL, 1988). Cela nous a de plus permis de mesurer le volume apparent selon la méthode décrite par MONNIER et al (1973) puis BEAUMONT et al (1989). Cette méthode est basée sur le principe de la poussée d'Archimède, par déplacement et pesée après immersion dans du pétrole désaromatisé, peu volatil et de faible interaction physico-chimique avec la phase solide de l'échantillon. Puis par étuvage à 105°C pendant 24 h nous avons obtenu l'état anhydre de référence.

Ainsi sur un même échantillon il nous a été possible de connaître volume apparent, poids sec et teneur en eau à une succion donnée.

Des mottes ont été prélevées dans les horizons Aa et Sa de la parcelle sol nu et nous avons effectué 6 à 10 répétitions par pF .

1-2 Résultats

□ variabilité et représentativité des mesures

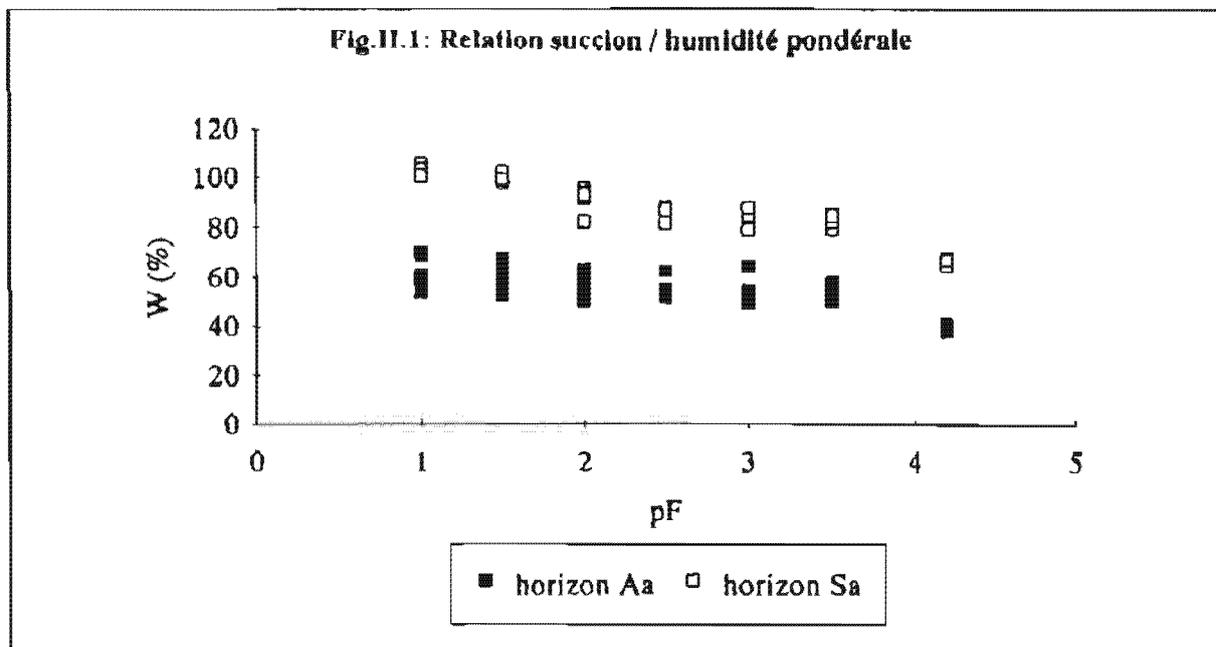
On constate une importante variabilité des résultats (annexe 7) surtout pour l'horizon Aa. Cette dispersion est à relier à la forte hétérogénéité spatiale des horizons superficiels. VAKSMANN (1987) suggère à ce propos d'étudier la forme et l'étendue du nuage de points plutôt que d'utiliser une moyenne des valeurs pour caractériser un site.

Cette variabilité s'explique aussi par la difficulté de prélever des mottes suffisamment résistantes dans du Aa superficiel et donc la tendance à prélever dans l'horizon sous-jacent (transition Aa-Sa) dont la composition n'est plus celle d'un Aa pur (si l'on considère l'humidité volumique, le nuage de points se resserre puisque la densité apparente, différence essentielle entre les horizons Aa et Sa, est alors prise en compte).

Enfin certaines manipulations ont dû être répétées ce qui a provoqué une dispersion supplémentaire des résultats, surtout aux pF faibles où il est parfois délicat de contrôler la pression d'air appliquée.

□ analyse des résultats

L'allure des courbes (fig.II.1) est conforme à celle obtenue généralement sur ce type de matériau andique: presque linéaire, légèrement sigmoïde et aplatic (MAEDA et WARKENTIN, 1975).



Les capacités de rétention restent très élevées à tous les pF, comme c'est le cas en général pour les andosols. On confirme également que la rétention hydrique est plus élevée dans les horizons

profonds (différence nette entre Aa et Sa). La courbe de l'horizon Sa indique en effet une porosité de rétention très forte, largement dominée par la microporosité (vidange marquée après pF 3.5).

conclusion

Sur andosol, les teneurs en eau pour des pF élevés restent assez importantes. Ceci illustre le fait qu'une grande partie de la porosité est de petite dimension. En conséquence, la seule mesure de l'humidité ne suffit pas à aborder la disponibilité de l'eau pour les plantes car la plus grande part se trouve trop fortement liée au sol pour être utilisée par la plante.

D'autre part, PERRET (1992) remarque que le calcul d'une réserve en eau à partir de courbes pF de laboratoire est irréalisable puisque:

- ◆ le point de flétrissement virtuel pF 4.2 n'est jamais atteint dans l'horizon Sa en conditions naturelles; il convient alors de connaître la gamme de variation de l'état énergétique de l'eau dans le sol en place,

- ◆ dans la zone superficielle ce point peut être dépassé, mais l'architecture du matériau est alors modifiée et son affinité pour l'eau diminue.

2- MESURE DE LA CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE IN SITU

2-1 Protocole

Le principe et la description de l'infiltromètre à succion contrôlée sont rappelés en annexe 8.

Ce dispositif nous a permis de réaliser *in situ* des essais d'infiltration sous charge négative constante et donc d'établir:

- ◆ la relation $K(h)$
- ◆ des valeurs couplées potentiel matriciel / teneur en eau *in situ*, dans une gamme de succion comprise entre 0 et 200 mm.

Seules des mesures sur les horizons Aa et Sa de la parcelle sol nu ont été effectuées.

2-2 Résultats

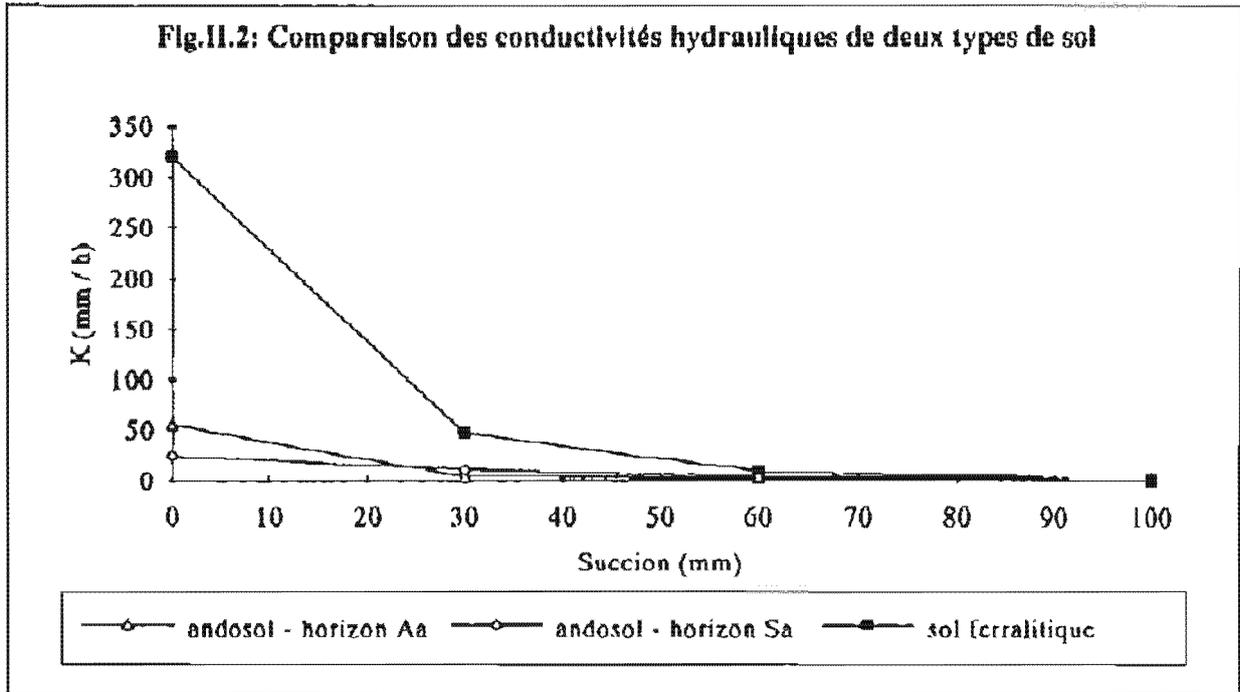
variabilité et représentativité des mesures

La forte dispersion des valeurs obtenues (annexe 9) s'explique aisément par l'hétérogénéité de la surface du sol et la taille réduite de la zone concernée par l'écoulement. Elle nous a amenés à travailler sur des nuages de points et non sur des couples r_1 / r_2 (annexe 10).

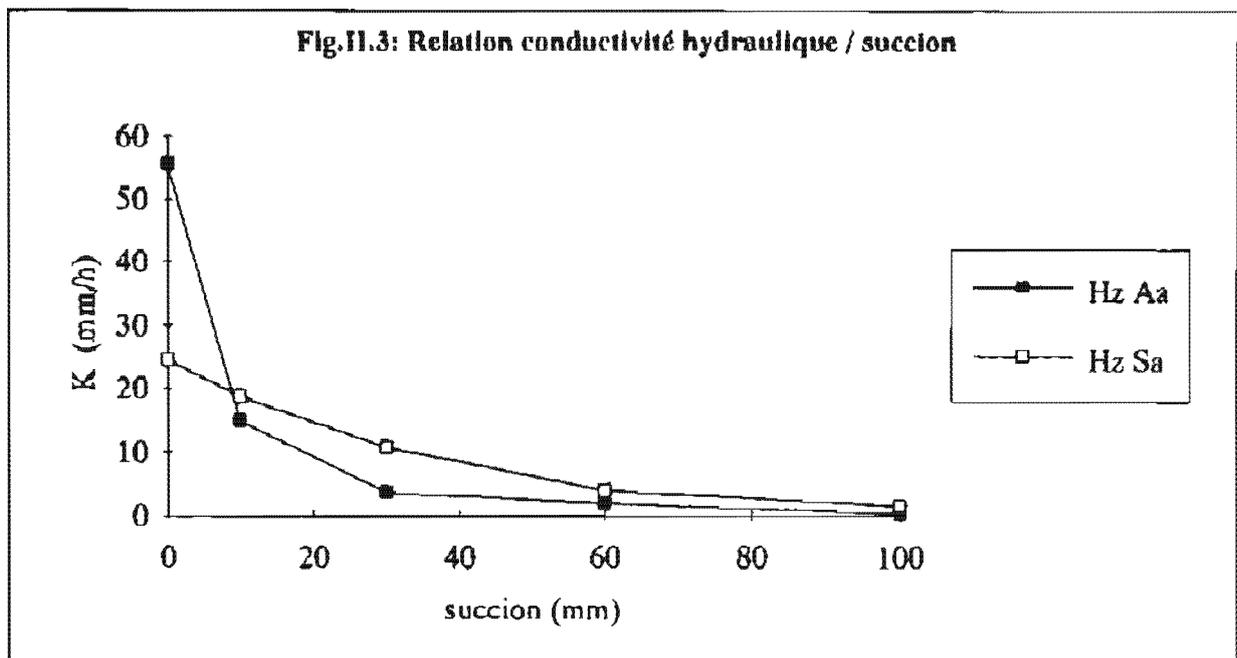
D'autre part, la saturation complète n'a pas été obtenue (environ 80 % de la porosité totale dans l'horizon Aa). Il est en effet délicat de maintenir la source au potentiel nul puisqu'au-delà l'eau est en surcharge et ne peut être retenue dans l'embase. De plus il est difficile de ne pas piéger des bulles d'air dans l'embase. Les valeurs de K à saturation ont donc été sous-estimées.

□ analyse des résultats

On remarque avant tout que la conductivité hydraulique est faible sur andosol cultivé (fig.11.2), ce qui classe ces sols parmi les matériaux moyennement filtrants selon la norme GEPPA (1981).



La forme générale de la courbe obtenue pour l'horizon Aa est exponentielle (fig.11.3). K diminue très rapidement lorsque la succion augmente (chute entre 0 et 10 mm).



La courbe plus "écrasée" obtenue sur l'horizon Sa illustre la prédominance d'une porosité très fine et continue, qui limite fortement la conductivité à saturation mais permet une conductivité non négligeable à des succions plus fortes.

Dans des domaines proches de la saturation, la conductivité hydraulique est donc plus forte dans l'horizon de surface. En conditions naturelles nous nous trouvons en présence d'un sol "stratifié". Le régime d'infiltration est d'abord contrôlé par la couche superficielle, mais quand le front d'humidification pénètre dans la couche à porosité plus fine, le régime diminue et tend vers celui de cette dernière.

Vers 10-30 mm il y a inversion de cette tendance (WEYLAND (1990) l'avait observé sur le même type de sol vers 80 mm). Aux succions fortes la conductivité hydraulique semble donc meilleure dans l'horizon Sa.

Cependant dans les deux horizons les mouvements de l'eau deviennent très vite négligeables ce qui conduit VAKSMANN (1987) à affirmer qu'on ne peut envisager l'utilisation de la loi de Darcy pour quantifier les flux, l'erreur relative sur le calcul devenant trop grande par rapport aux quantités d'eau mises en jeu.

□ conductivité hydraulique sous couverture

Des mesures effectuées par GOUBAND (1992) sur les horizons superficiels des mêmes parcelles montrent:

- ◆ sous kikuyu, une augmentation significative de la conductivité hydraulique à saturation par rapport au sol nu,

- ◆ sous lotier, une aptitude du sol à l'écoulement de l'eau beaucoup plus faible.

Mais il faut rester prudent quant à l'interprétation de ces résultats étant donnée la très forte variabilité intra-traitement observée.

L'ensemble des auteurs s'accorde pourtant à reconnaître une augmentation notable de la conductivité à saturation des horizons superficiels sous couverture par rapport au sol nu (GARLOCK, 1981; BOWKER, 1991; MONIMEAU, 1991; BURLE, 1993; LAL, 1989). Cet effet bénéfique des couvertures s'explique par une amélioration de la structure du sol (augmentation de la macroporosité). BURLE (1993) note même une amélioration due à la couverture dans l'horizon Sa, et ce pour toutes les succions (annexe 11).

On note cependant que:

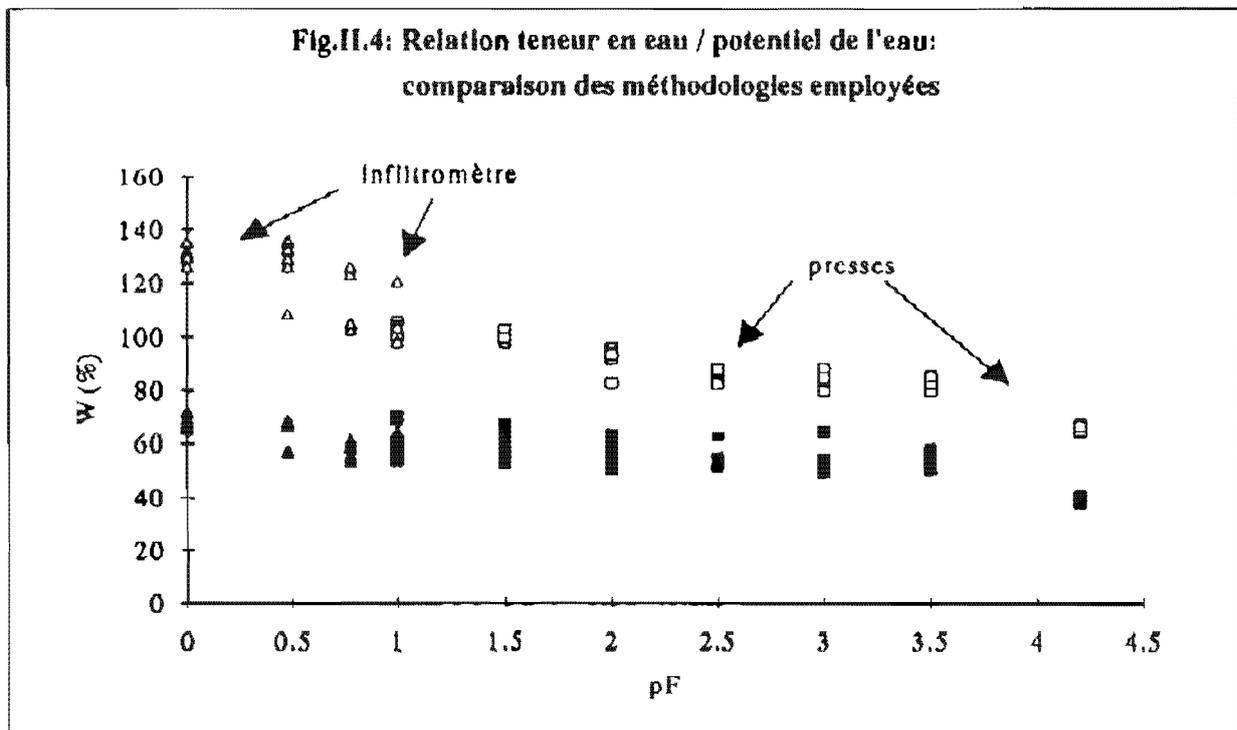
- ◆ les modifications de structure et donc de conductivité hydraulique dues aux couvertures apparaissent plus ou moins rapidement, surtout dans les horizons profonds (LOW, 1972). Or dans notre cas les couvertures ne sont implantées que depuis trois ans,

- ◆ aux succions fortes, succions rencontrées au champs pendant la saison sèche, on n'observe pas de différence significative entre sol nu et couverture.

Si cette influence des ouvertures sur la conductivité hydraulique à saturation conditionne la part d'eau infiltrée et donc le stock d'eau du sol, elle n'a que peu de conséquences sur les flux profonds (fortes succions).

4- CONCLUSION

L'étude des caractéristiques hydrodynamiques du site nous a permis d'aborder la relation teneur en eau / potentiel de l'eau *in situ* (infiltrométric) et en laboratoire (presses). Dans la première méthode il y a remplissage des vides (sorption), dans l'autre il y a vidange (désorption). Il paraît donc délicat de mettre en relation les deux types de données (phénomènes d'hystérèse). On observe cependant (fig.II.4) une relativement bonne conjonction expérimentale, et cela dans des conditions proches de la saturation où l'hystérèse est peu marquée. Elle nous permet de conclure que si pour les deux méthodes la dispersion des résultats est très forte, leur validité n'est pas remise en cause, les ordres de grandeur étant semblables.



Nous avons ainsi pu mettre en évidence que pour des succions rencontrées au champs au cours d'une saison sèche, l'horizon Sa se démarque de l'horizon Aa par:

- ◆ des valeurs d'humidité plus fortes,
- ◆ une conductivité hydraulique meilleure.

Ce comportement semble intéressant pour l'alimentation en eau des horizons culturaux (approvisionnement par les couches profondes très hydratées), ce qui pourrait confirmer l'hypothèse

de remontées capillaires importantes en saison sèche (VAKSMANN, 1987). Cependant, compte tenu des faibles valeurs de conductivité hydraulique mesurées sur andosol, il semble que ces flux profonds soient négligeables par rapport aux apports superficiels (notamment la rosée).

L'effet des couvertures se traduit par une amélioration structurale du substrat qui facilite l'écoulement à saturation. Mais cet effet n'est décelable que dans l'horizon superficiel.

III. MISE EN PLACE DU SUIVI ET ETALONNAGE DES APPAREILS

1- MESURE DE L'HUMIDITE VOLUMIQUE: LA SONDE TDR

1-1 Principe

Le principe de la méthode repose sur la détermination de la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques le long d'une sonde introduite dans le sol. Cette vitesse dépend de la constante diélectrique (K_a) du matériau traversé: plus la constante est forte, plus la vitesse sera faible.

Dans le sol les constantes diélectriques sont les suivantes: 1 pour l'air, 2-3 pour les particules et 80 pour l'eau. La transmission de l'onde le long d'une sonde enterrée dépendra donc en grande partie de la teneur en eau du sol.

1-2 Matériel

Le matériel utilisé est constitué:

- ◆ d'une sonde, formée de deux tiges en acier inoxydable introduites dans le sol. Elle permet la conduction de l'onde électromagnétique.

- ◆ d'une tête de lecture amovible et reliée au corps de la machine par un câble coaxial. Elle assure la transmission des ondes entre la sonde et le générateur.

- ◆ d'un processeur incorporant le générateur d'ondes et l'analyseur.

Les impulsions émises par le générateur sont réfléchies à l'extrémité des tiges et reviennent vers l'analyseur. Un dispositif horloge mesure le temps écoulé entre l'émission et la réception du signal.

La vitesse de propagation V de l'onde électromagnétique dans un milieu de constante diélectrique K_a se calcule par:

$$V = c / \sqrt{K_a} \quad \text{sachant que:} \quad V = 2L / T \text{ d'où } K_a = (cT / 2L)^2$$

c : vitesse de la lumière dans le vide; L : longueur du parcours; T : temps de parcours.

L'appareil calcule directement le K_a du sol par cette relation et donne l'humidité du sol correspondante par l'intégration d'une courbe d'étalonnage $\theta = f(K_a)$. L'humidité mesurée correspond alors à une moyenne de l'humidité sur la longueur des aiguilles.

En pratique le contact entre les aiguilles et le sol environnant doit être le plus étroit possible. En effet si des cavités se forment le long des tiges, elles se remplissent soit de gaz, soit d'eau, ce qui conduit à une sous-estimation de la mesure dans le premier cas et une sur-estimation dans le second. Un grand soin doit donc être apporté à l'installation des aiguilles.

1-3 Protocole

Nous avons utilisé des aiguilles de 20 cm de long sachant que l'enracinement du haricot ne s'étend pas à l'horizon Sa. Elles ont été installées verticalement dans le rang et dans l'inter-rang (fig.I.5). Pour des raisons de disponibilité du matériel, les relevés n'ont été effectués qu'une seule fois par semaine.

Ce matériel nous a permis d'accéder aisément aux valeurs d'humidité volumique *in situ*. Il présente cependant deux inconvénients majeurs par rapport à la sonde neutronique:

- ♦ il moyenne l'humidité sur la profondeur d'implantation des aiguilles (ce qui ne permet pas d'obtenir les profils d'humidité),
- ♦ l'installation d'aiguilles trop longues pose des problèmes de parallélisme faussant les mesures. Nous n'avons donc pas pu évaluer l'évolution de l'humidité au delà de 20 cm.

1-4 Etalonnage

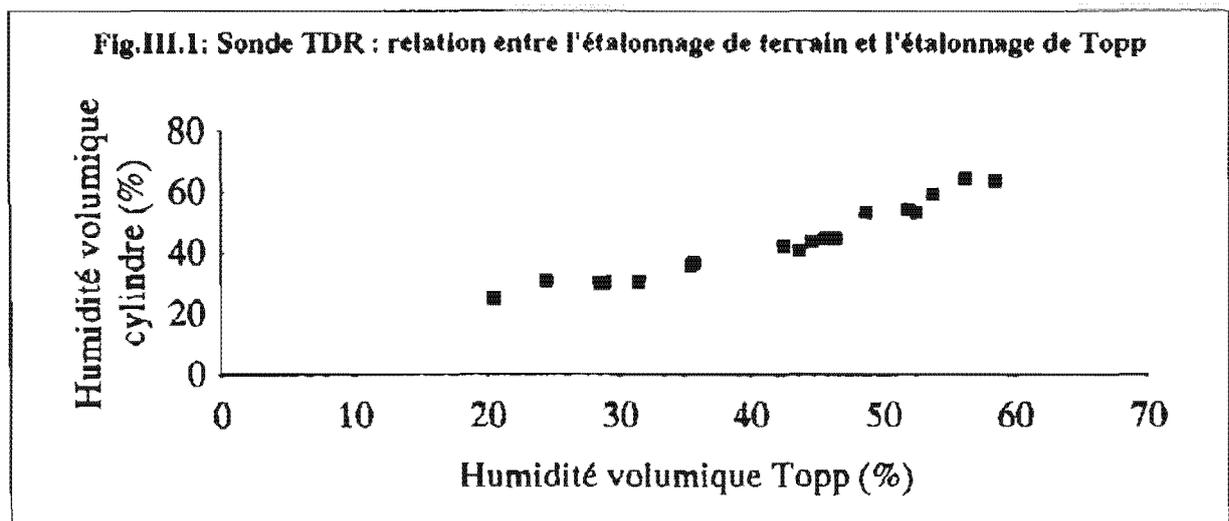
En partant de quatre sols minéraux, avec une gamme de texture allant du sable à l'argile, TOPP et al. (1980) proposent la relation "universelle" suivante:

$$\theta_v = -5.3.10^{-2} + 2.92.10^{-2} K_a - 5.5.10^{-4} K_a^2 + 4.3.10^{-6} K_a^3$$

avec une erreur d'estimation de 1.3 %.

Cependant, la sonde TDR n'ayant jamais été utilisée sur andosol, nous avons réalisé un étalonnage de terrain pour vérifier la validité de cette relation. Les valeurs données par l'appareil ont été comparées à des mesures d'humidité volumiques obtenues par prélèvement au cylindre à proximité immédiate des aiguilles. Vingt prélèvements ont ainsi été effectués dans une gamme d'humidité volumique comprise entre 25 et 65% (annexe 12).

La corrélation avec l'étalonnage de Topp (fig.III.1 et annexe 12) étant bonne ($R^2=0.94$), nous avons relevé au cours du suivi la valeur de K_a donnée par la sonde TDR et effectué systématiquement la correction Topp pour obtenir l'humidité volumique.



2- MESURE DE L'ETAT ENERGETIQUE DE L'EAU DANS LE SOL: LA TENSIOMETRIE

2-1 Le tensiomètre à bougie

Le principe et la description du tensiomètre à bougie sont rappelés en annexe 13.

La mesure s'effectue par un capteur de dépression portatif. Contrairement au mode opératoire proposé par le constructeur, nous avons pris la mesure dans un volume d'air maintenu constant au sommet de la canne (méthode préconisée par THONY *et al*, 1988).

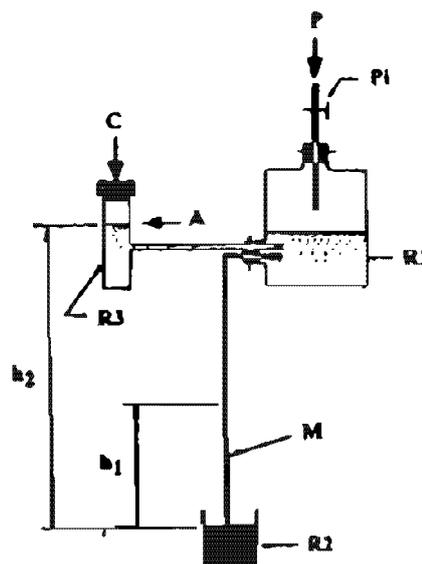
□ Protocole

Nous avons installé des tensiomètres à 30, 50, 70 et 100 cm de profondeur dans le rang et dans l'inter-rang (fig.I.4). Les relevés ont été effectués deux fois par semaine pour permettre un suivi précis des profils tensiométriques. La fréquence a été augmentée à trois relevés par semaine durant la phase critique pour l'alimentation en eau du haricot: période formation et grossissement-remplissage des gousses (M'RIBU, 1985).

□ Etalonnage

Un étalonnage du capteur de pression a été réalisé au moyen du dispositif de laboratoire (fig.III.2) préconisé par THONY *et al* (1988). Il se compose principalement d'un réservoir R1 partiellement rempli d'eau dégazée, d'un manomètre à mercure M comportant un réservoir R2 et d'un petit réservoir R3 communiquant avec R1 et sur lequel s'adapte le capteur de pression C.

Fig.III.2: Dispositif d'étalonnage du capteur de pression



En agissant sur la pression de l'air dans R1 (pompe à vide manuelle P), on peut imposer au capteur différentes valeurs de pression. Après établissement de la pression désirée et contrôlée par le manomètre à mercure, le volume d'air dans R1 est isolé de la pompe à vide par une pince de Mohr Pi.

D'après ce dispositif, si h_A est la pression imposée au capteur (exprimée en hauteur d'eau par rapport à la pression atmosphérique P_0), on a:

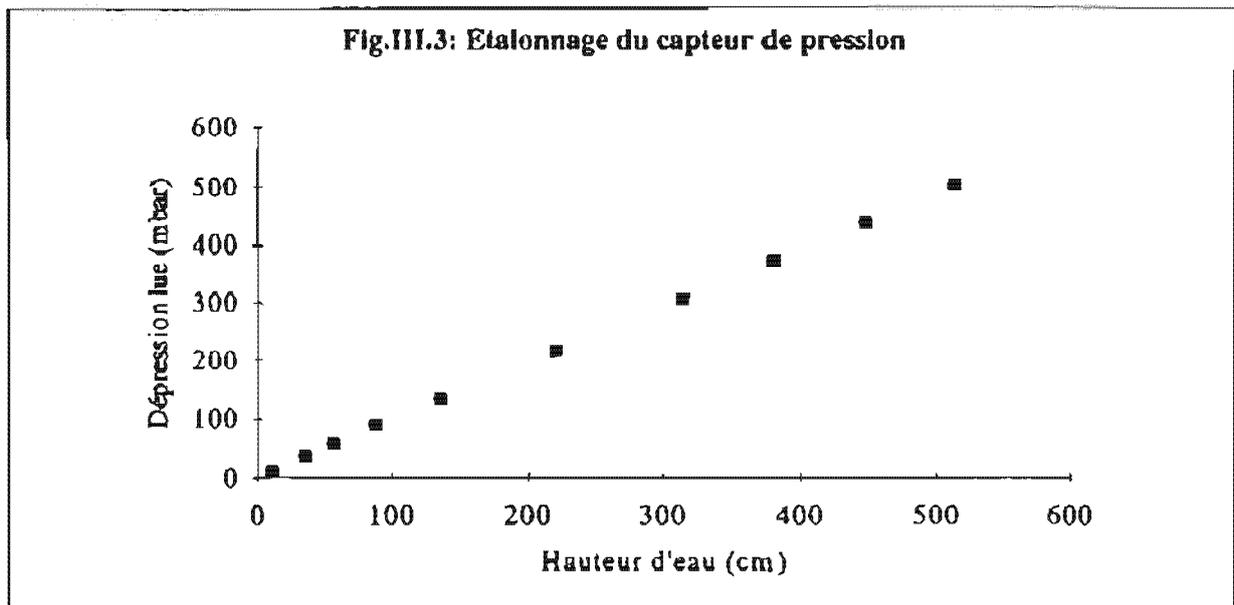
$$h_A = h_1 (1 - \rho_{Hg} / \rho_w) - h_2$$

ρ_{Hg} : masse volumique du mercure (13 600 kg/m³)

h_1 : dénivellation du mercure dans le manomètre h_2 : niveau d'eau dans R3

le niveau de référence étant le plan de la surface libre dans le réservoir à mercure.

Les résultats montrent que la relation d'étalonnage (fig.III.3) peut être approchée par une droite de pente $A=0.98$ avec $R^2=1$ (annexe 14) et permettent de conclure à l'excellente linéarité de la réponse du capteur de pression. Nous avons donc corrigé toutes les mesures de terrain par le coefficient A obtenu par étalonnage.



Ce type de matériel, de manipulation aisée, nous a permis un suivi régulier des profils de charge hydraulique sur les horizons profonds (> 30 cm). Son seul inconvénient est la gamme de succions mesurables: 0 à 850-900 mbar (pF 2.9). En saison sèche les horizons superficiels atteignent fréquemment des états énergétiques dépassant les 900 mbars. Or c'est principalement dans ces horizons que se développe l'enracinement du haricot. Nous avons donc fait appel à un autre type de matériel.

2-2 Le tensiomètre résistif

□ Principe et description

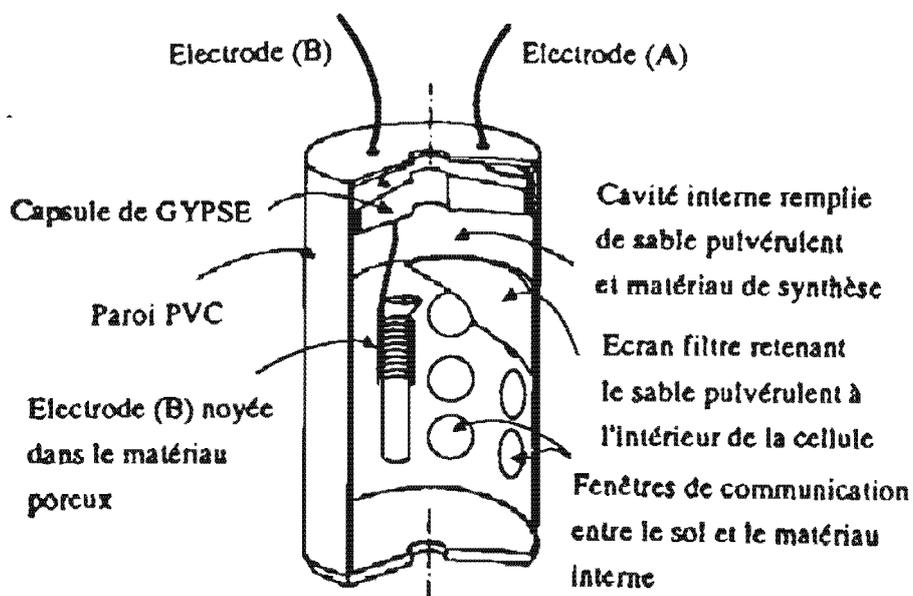
Développé depuis la fin des années 70, ce capteur résulte d'une combinaison entre le tensiomètre classique (limité à 850 mbar) et le bloc de gypse (dont la durée de vie est relativement faible).

La cellule dite "Watermark" (fig.III.4) fait intervenir deux électrodes noyées dans un milieu reconstitué (sable mélangé à un matériau de synthèse) dont les caractéristiques de porosité sont spécifiques et parfaitement connues. Au dessus de ce sable se trouve un petit disque de gypse qui contribue, par équilibre ionique, à la suppression de l'influence du sel sur la mesure.

Les variations de potentiel du sol se retrouvent intégralement au niveau du sable contenu dans la cellule et offrent une résistance variable (à l'image d'un condensateur dont on ferait varier la résistance de son diélectrique), fonction donc des gradients de potentiel vrais.

L'ensemble est maintenu dans une membrane poreuse synthétique encastrée dans un morceau de tube en PVC. Les fils issus des électrodes peuvent être conduits jusqu'à la surface où se fait la mesure par l'intermédiaire d'une canne qui facilite le positionnement des cellules dans le sol.

Fig.III.4: Schéma du capteur Watermark



La mesure s'effectue par un capteur électronique portatif qui intègre la relation résistance / potentiel ainsi qu'une correction relative à la température.

Ce type d'appareil permet d'après le constructeur des mesures fiables de 0 à 2 bars et paraît donc adapté aux horizons superficiels.

□ Protocole

Nous avons installé des capteurs Watermark à 10 et 20 cm de profondeur dans le rang et dans l'inter-rang (fig.1.4). Les relevés ont lieu en même temps que les tensiomètres classiques.

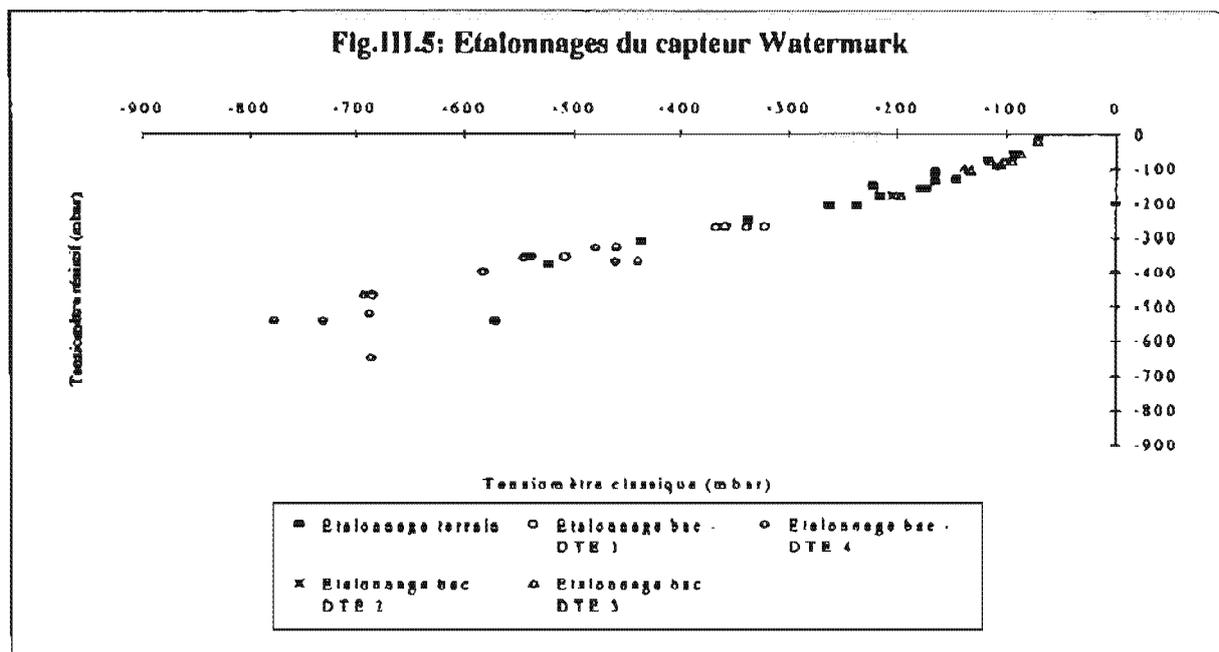
□ Etalonnage

Pour vérifier la bonne corrélation entre les mesures tensiométriques classiques et celles obtenues grâce aux capteurs Watermark nous avons réalisé un premier étalonnage de terrain en disposant un tensiomètre classique à proximité immédiate d'un des capteurs Watermark et à profondeur identique (10 cm).

Le suivi parallèle de ces deux capteurs correspond à une gamme de succion comprise entre -100 et -450 mbar. Il nous a permis de mettre en évidence:

- ◆ un temps de réponse aux variations de potentiel du sol semblable pour les deux capteurs,
- ◆ un écart relativement constant entre les réponses des deux capteurs, la cellule Watermark sous-estimant systématiquement les valeurs réelles du potentiel.

Cet étalonnage de terrain a été complété par un étalonnage "de laboratoire" pour vérifier la relation obtenue précédemment dans une gamme de succions plus large (-70 à -880 mbar). Le principe de l'étalonnage est le même. Nous avons prélevé du sol sur la parcelle sol nu pour en remplir un caisson, dans lequel nous avons installé un capteur Watermark (le même que lors de l'étalonnage de terrain) et quatre tensiomètres classiques. Le système étant à l'abri des précipitations nous avons pu obtenir l'évolution des réponses des capteurs en phase de dessèchement du sol.



Ces étalonnages présentent cependant des lacunes que nous n'avons pu combler faute de temps:

- ◆ en phase d'assèchement on peut penser que l'eau sortant du tensiomètre à bougie fausse la mesure donnée par le tensiomètre résistif,

- ◆ ils ne portent que sur l'un des vingt capteurs utilisés et ne permettent donc pas de vérifier que tous les capteurs répondent de manière identique,

- ◆ ils ne permettent pas d'évaluer la fiabilité des capteurs Watermark aux fortes succions puisqu'alors les tensiomètres classiques "décrochent" (un véritable étalonnage de laboratoire, sous presse par exemple, serait nécessaire).

Nous avons malgré tout corrigé l'ensemble des valeurs mesurées sur tensiomètre résistif avec les résultats des régressions d'étalonnage (annexe 14) afin d'obtenir des profils tensiométriques cohérents.

3- DETERMINATION DE LA ZONE D'EXTRACTION RACINAIRE:

PROFILS

Des profils racinaires ont été effectués une seule fois, les 9 et 18 juin (récolte). On estimera que le volume d'extraction racinaire du haricot est constant à partir de la mi-floraison (début du suivi).

3-1 Description (fig.III.6)

□ en sol nu:

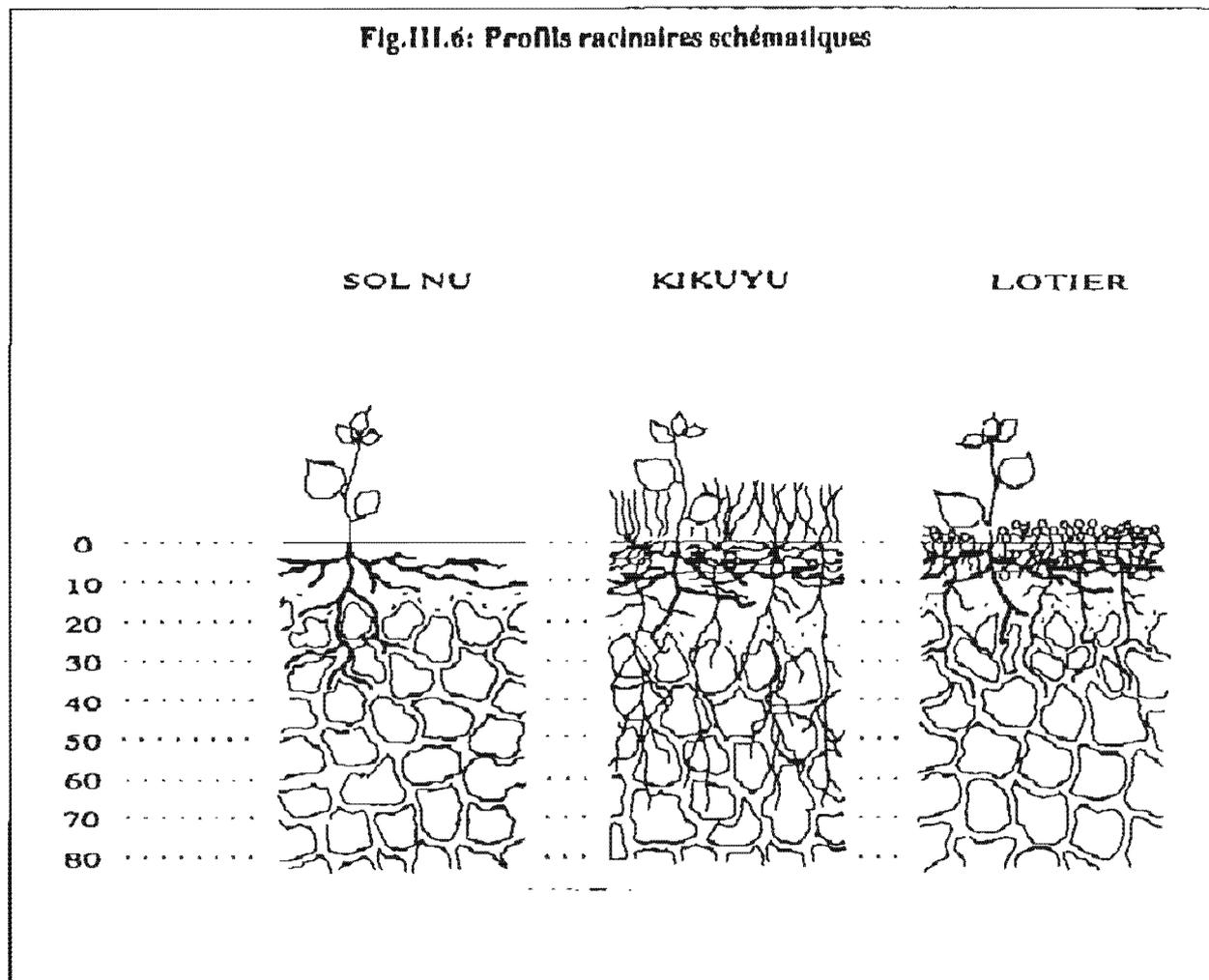
Dans l'horizon superficiel Aa, le haricot présente des racines bien blanches sur lesquelles les agrégats restent collés, indiquant la présence de poils absorbants. La ramification est forte et le chevelu racinaire homogène, favorisé par la structure fine (petite mottes peu cohérentes) de cet horizon. Des nodosités sont visibles. L'activité biologique est très faible.

La transition avec l'horizon Sa (10-20cm) est hétérogène, l'interface se caractérisant par des poches de Aa qui descendent dans l'horizon Sa. Ceci peut être lié à l'histoire culturale de la parcelle (précédent canne récent) et résulter d'un ancien passage d'outil ?

Dans l'horizon Sa les mottes sont centimétriques à décimétriques. On observe de nombreuses anciennes racines de canne peu décomposées (aération plus faible dans cet horizon), noires et subérifiées, dès 25 cm et jusqu'à plus de 40 cm de profondeur. Les racines de haricot, colonisant la moindre discontinuité entre mottes (comme d'anciens passages de racines de canne), descendent sous forme de pivot jusque vers 30 cm de profondeur, et en un réseau assez dense de petites racines jusqu'à 40 cm.

Dans l'inter-rang, le chevelu racinaire semble surtout concentré dans l'horizon Aa.

Fig.III.6: Profils racinaires schématiques



□ sous kikuyu

L'horizon superficiel présente une structure grumeleuse. L'activité biologique y est très importante (vers blancs, plus ou moins attaqués par *Beauveria*, champignon entomopathogène, vers de terre, oeufs d'escargot ...) ce qui contraste avec le sol nu.

On observe sur les 15 premiers centimètres un véritable tapis formé par les thalles, stolons et racines du kikuyu ainsi que de nombreux terricules de verre de terre. C'est dans cet "horizon" ou juste au dessous que se développe l'enracinement du haricot. Les deux ou trois pivots sont pratiquement horizontaux. Nous avons par exemple observé une racine de 30 cm de long qui ne descend que de 1 cm et seulement sur ses 10 derniers centimètres.

La transition avec l'horizon Sa (20-30 cm) est là encore hétérogène et à partir de 25 cm on n'observe plus aucune racine de haricot.

Dans l'horizon Sa le kikuyu forme de grosses racines qui descendent verticalement en perforant les mottes (contrairement au haricot sous sol nu). La ramification est moins dense à partir de 35-40 cm mais on observe encore des racines de kikuyu à 70 cm de profondeur.

sous lotier

La situation est proche de celle du kikuyu. L'horizon Aa présente une structure particulière à petites mottes et l'activité biologique y est très importante.

Le lotier présente sur les 10 premiers centimètres un chevelu racinaire très dense avec beaucoup de grosses nodosités. Le haricot forme 2-3 pivots racinaires qui se développent dans et souvent sous le tapis racinaire du lotier et d'où partent des ramifications très nombreuses et très fines.

La transition Aa-Sa (15-20cm) est là aussi irrégulière.

Dans l'horizon Sa massif on observe encore beaucoup d'anciennes racines de canne. Le chevelu racinaire du lotier est moins dense mais des racines très fines se développent en suivant les discontinuités entre mottes jusque vers 40-45 cm de profondeur. L'enracinement du haricot ne dépasse pas 25 cm.

3-2 Analyse

La couverture semble avoir un impact non négligeable sur l'enracinement du haricot. Il faut rappeler que le haricot est semé dans les couvertures déjà implantées. On peut donc, pour expliquer les différences observées, invoquer soit des phénomènes de compétition haricot-couverture, soit une certaine complémentarité entre les deux: création par la couverture de zones particulièrement favorables à l'enracinement du haricot.

On remarque aussi que la présence d'une couverture favorise l'activité biologique comme l'a observé BURLE (1993).

3-3 Conclusion

On entrevoit déjà un premier impact des plantes de couverture sur les modalités d'alimentation hydrique du haricot (fig.III.8). Elles semblent en effet réduire la profondeur d'extraction racinaire en la limitant à l'horizon superficiel Aa.

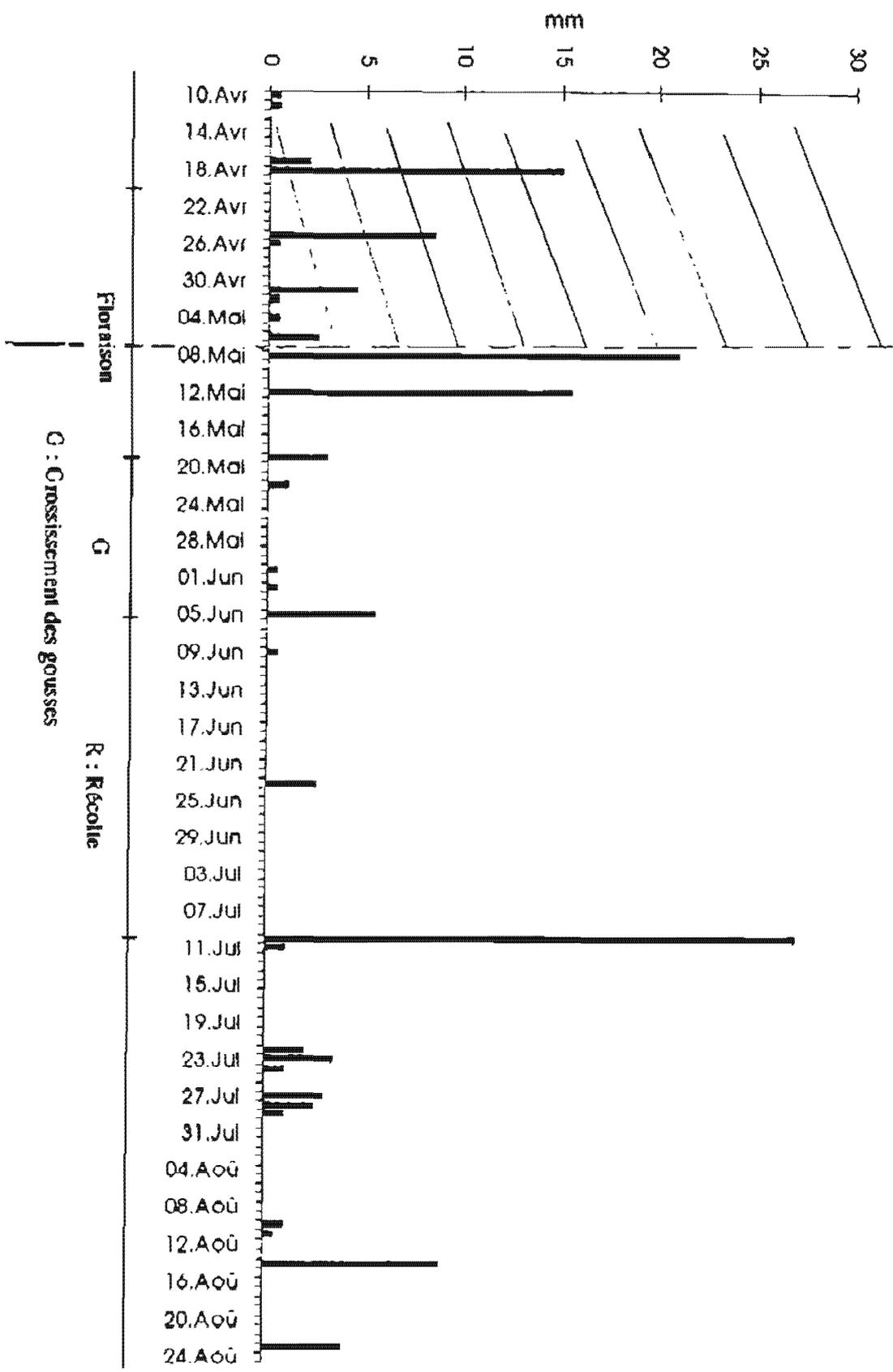


FIG. IV. - Calage du suivi

IV ANALYSE DU SUIVI ET SYNTHÈSE

1- CALAGE DU SUIVI

Pour des raisons pratiques, nous n'avons pas pu mettre en place le dispositif suffisamment tôt pour suivre le cycle complet du haricot. En tenant compte du temps d'équilibration de tous les tensiomètres, les mesures sont complètes et valables à partir du 7 mai, ce qui correspond à la mi-floraison sur l'ensemble des parcelles (fig.IV.1). Le stade critique du haricot est donc précisément suivi et les mesures se prolongent après la récolte jusque fin août.

Étant donnée la forte variabilité inter-annuelle des précipitations, il faudrait disposer de nombreuses données (au moins sur 10 ans) pour re-situer convenablement la saison sèche 93. Nous ne disposons de données que sur 6 ans. Néanmoins il semble que cette saison climatique soit relativement représentative de la région, aussi bien à travers la somme des précipitations qu'à travers leur répartition (annexe 15).

2- VARIABILITE ET REPRESENTATIVITE DES MESURES

La forte variabilité des mesures tensiométriques, en particulier à 10 et 20 cm, s'explique aisément par l'hétérogénéité de fonctionnement des horizons superficiels. Il faut cependant noter que lors d'étalonnages, SPAANS et BAKER (1992) ont mis en évidence des dysfonctionnements des capteurs Watermark:

- une réponse différente du même capteur selon le type de sol,
- une réponse différente d'un capteur à l'autre dans des conditions strictement identiques.

Bien que les capteurs utilisés au cours du suivi semblent réagir efficacement aux variations du milieu (après une forte pluie par exemple), il faudra rester prudent quant à l'interprétation des résultats aux fortes succions, d'autant plus que notre étalonnage n'a pas abordé ces potentiels.

Si l'on regroupe l'ensemble des résultats sur un graphe potentiel / teneur en eau (en attribuant la même teneur en eau à 10 et 20 cm de profondeur) on constate (fig.IV.2) que le nuage de points se trouve en dessous des valeurs obtenues sur mottes en laboratoire. Cet écart traduit un effet d'échelle lié au passage de valeurs établies sur mottes centimétriques à une mesure effectuée dans un volume au moins décimétrique. La sonde TDR prend en compte des vides d'ordres supérieurs (fissures...). Il y a cependant une réelle sous-estimation de l'humidité lorsque le contact aiguilles / sol est mauvais. C'est le cas pour le site sol nu - bas - rang où la structure "poudreuse" de l'horizon superficiel n'a pas permis l'adhérence des aiguilles au sol.

Fig.IV.3: Evolution à 20 cm - localisation des profils

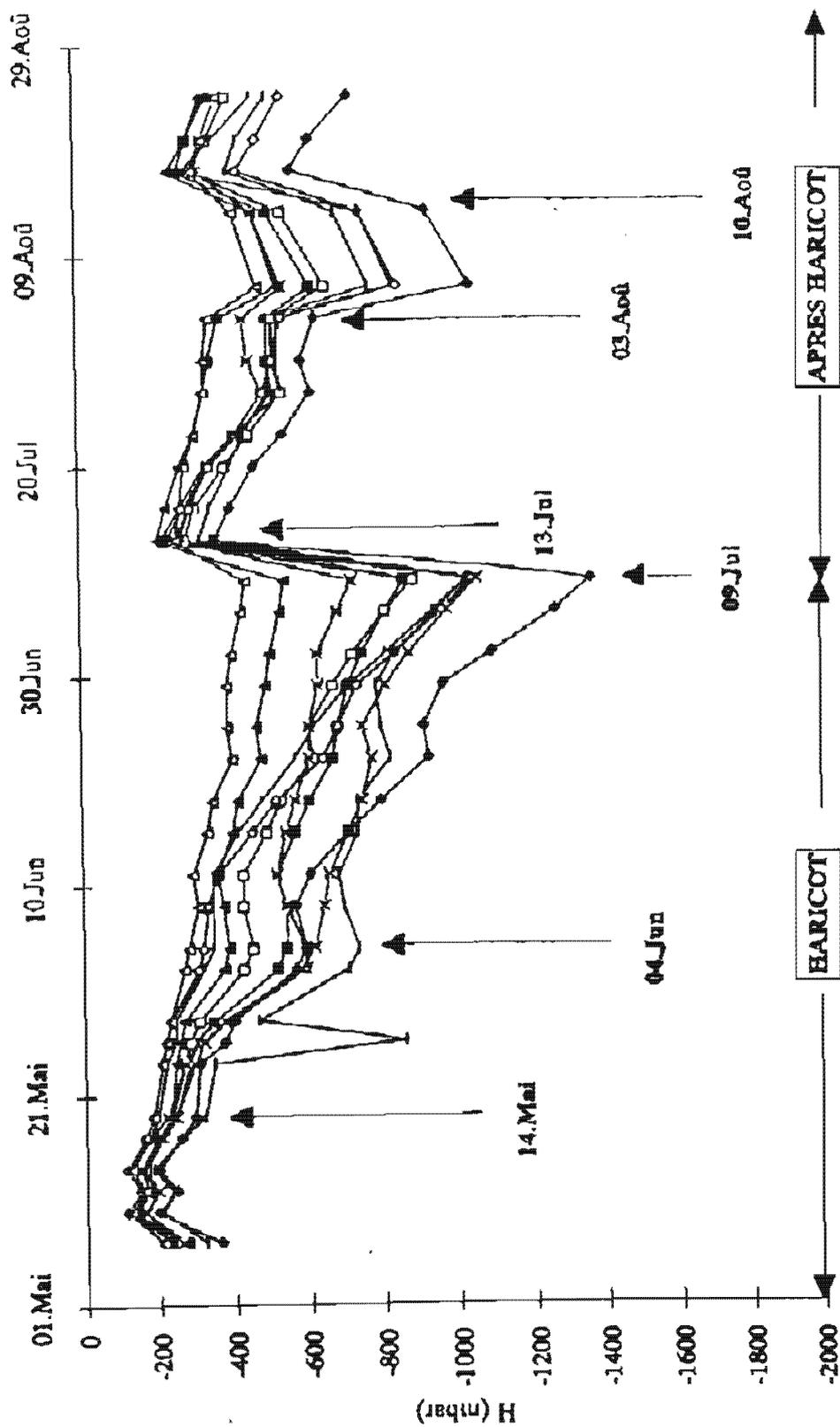
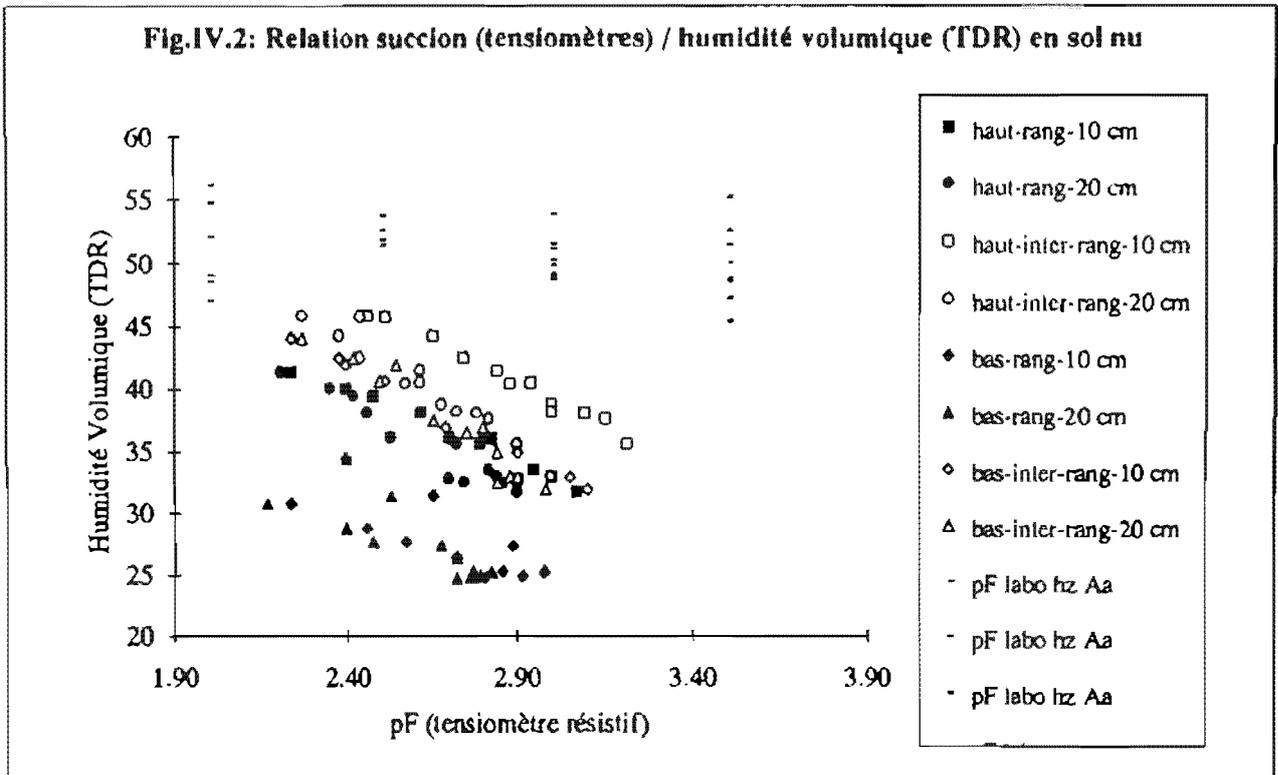


Fig.IV.2: Relation succion (tensiomètres) / humidité volumique (TDR) en sol nu



3- ANALYSE DU SUIVI PENDANT LE CYCLE DU HARICOT

Le début de la période (fin floraison - début grossissement de gousses) se caractérise par des précipitations relativement importantes qui homogénéisent les situations sur l'ensemble des parcelles. L'assèchement qui suit et devient prononcé en fin de cycle (récoltes en jaune et en sec) permet de mettre en évidence des différences de comportement selon les systèmes de culture.

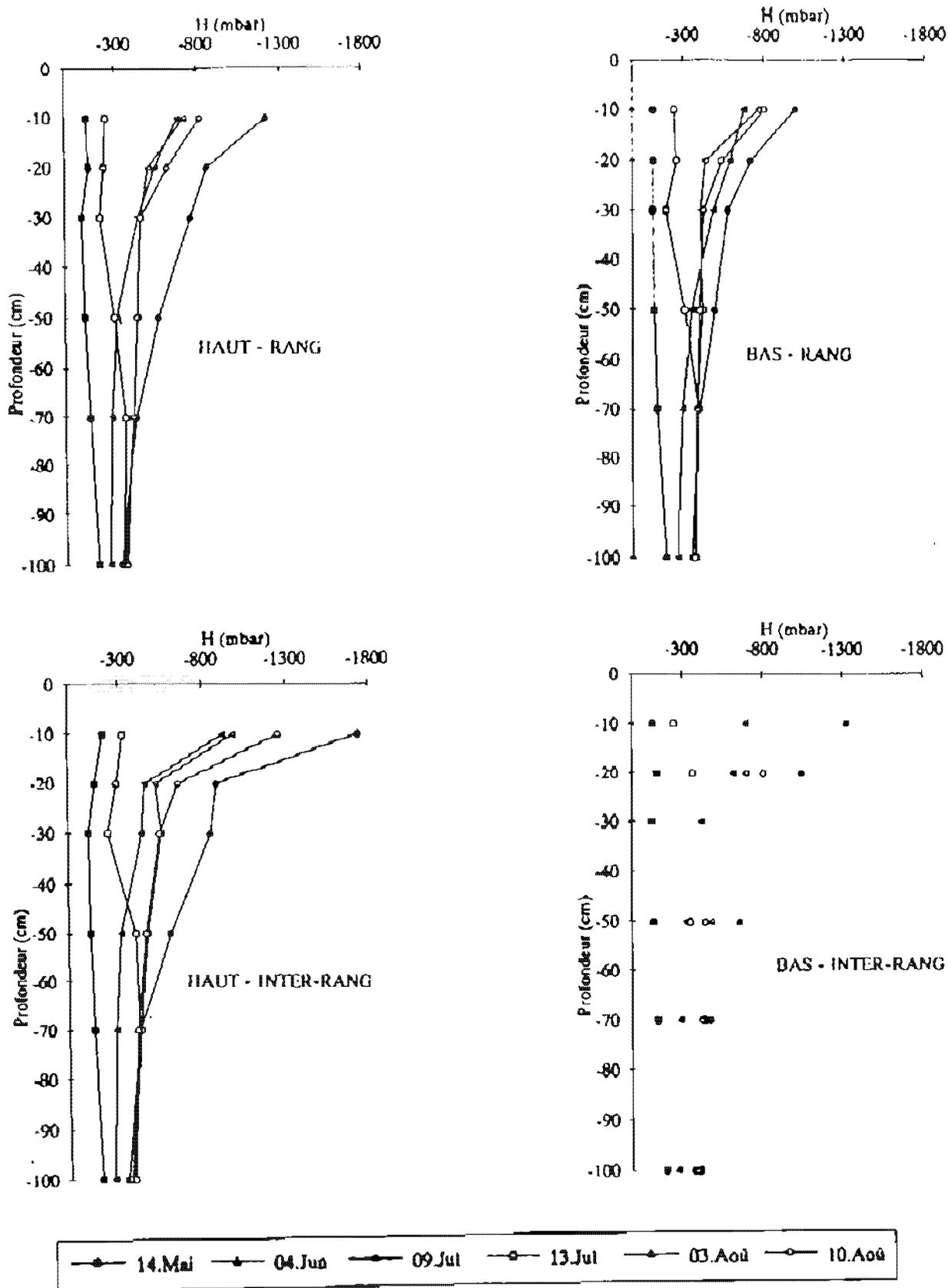
Pour clarifier la présentation des résultats nous avons choisi de ne représenter que trois profils tensiométriques par période "haricot" / "après haricot" (fig.IV.3).

3-1 Evolution en sol nu

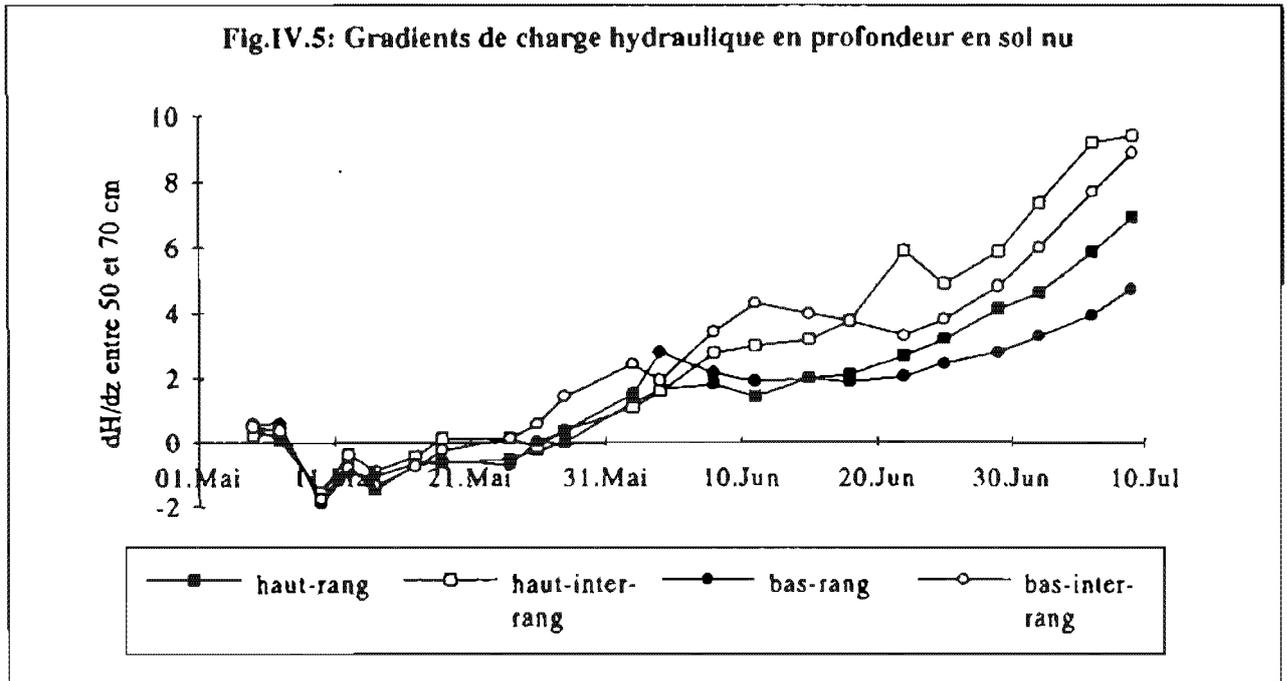
□ fonctionnement d'ensemble (fig.IV.4)

Le 14 mai la situation est homogène. Les profils droits des quatre sites de mesure (haut - rang; haut - inter-rang; bas - rang; bas - inter-rang) se superposent exactement.

Fig.IV.4: Profils tensiométriques en sol nu



L'évolution en assèchement se traduit par l'apparition d'un gradient de charge hydraulique ascendant sur 50 cm de profondeur. Au cours du cycle ce gradient descend progressivement pour atteindre 70 cm en fin de période. Ce phénomène est encore plus net dans l'inter-rang, (fig.IV.5)



□ fonctionnement rang / inter-rang (fig.IV.6)

En plus d'un assèchement plus poussé en profondeur, l'inter-rang se distingue du rang par une consommation plus importante sur les 20 premiers centimètres, en particulier sur le site haut (gradients plus forts).

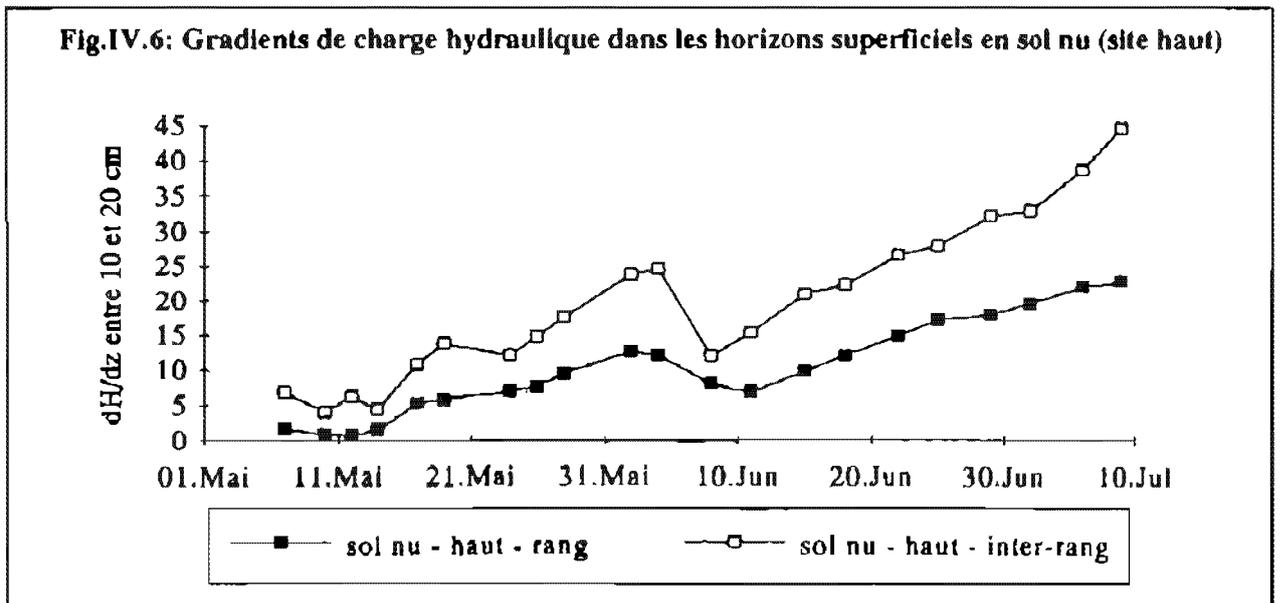
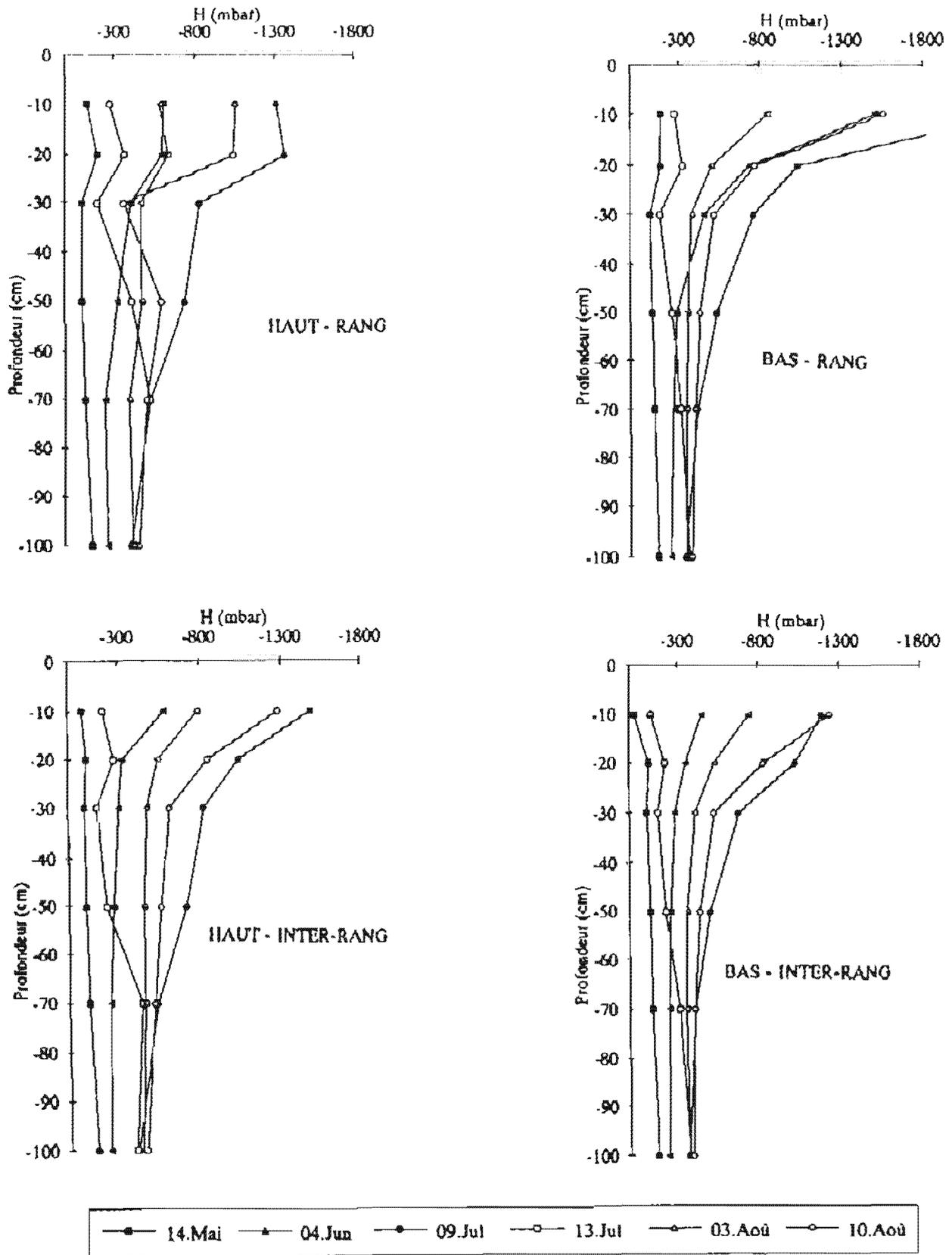


Fig.IV.7: Profils tensiométriques sous kikuyu



analyse

L'assèchement du profil s'explique, en l'absence de pluie, par l'évapotranspiration du haricot et l'évaporation directe du sol nu. Le gradient ascendant sur 50 cm illustre la consommation en eau du haricot dont l'enracinement s'étend sur 40 cm de profondeur dans le rang. Dans l'inter-rang les racines se concentrent dans l'horizon superficiel (20 premiers cm) ce qui explique les différences observées entre rang et inter-rang.

L'évaporation directe du sol nu semble très importante puisqu'en fin de période le gradient ascendant atteint 70 cm de profondeur, et ce de manière nette dans l'inter-rang.

3-2 Evolution sous kikuyu

fonctionnement d'ensemble (fig.IV.7)

Le 14 mai la situation est identique sur les quatre sites de mesure (profil droit). Cependant au cours de l'assèchement les sites haut et bas n'évoluent pas exactement de la même manière. Ces résultats plus variables qu'en sol nu peuvent s'expliquer par l'hétérogénéité de la couverture liée à des problèmes de répartition et d'efficacité des herbicides.

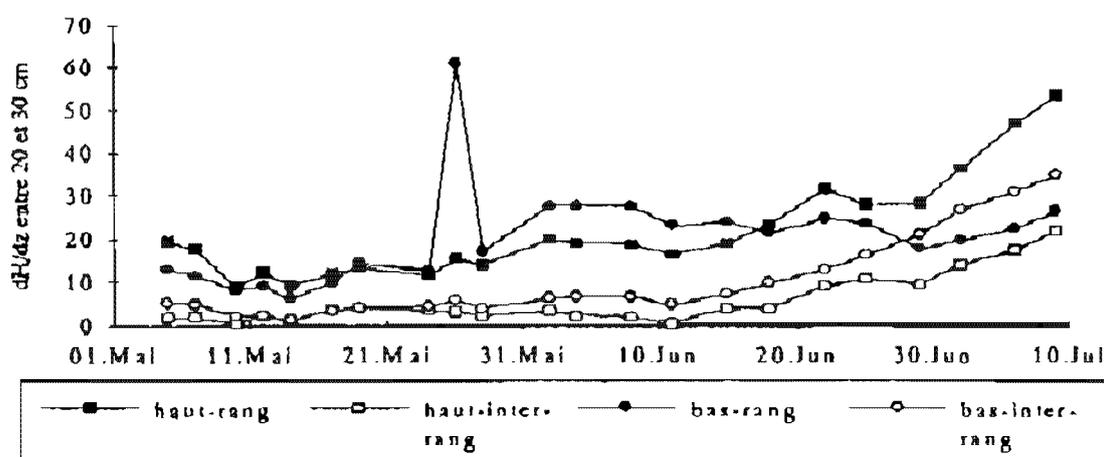
Dans le rang le gradient ascendant apparaît entre 50 (bas) et 70 cm (haut) et s'approfondit au cours de la période comme en sol nu.

fonctionnement rang / inter-rang

Dans l'inter-rang le gradient de charge hydraulique semble descendre plus lentement (30 cm de profondeur le 4 juin contre 50 à 70 cm dans le rang à la même date) mais en fin de période la situation en profondeur est la même que dans le rang. Les différences rang / inter-rang nettes jusqu'à 50 cm de profondeur en début de suivi s'atténuent ensuite pour se limiter aux horizons superficiels (20 - 30 cm).

Dans les couches superficielles la consommation est nettement plus importante dans le rang que dans l'inter-rang durant les mois de mai et juin. En fin de période il y a inversion de cette tendance sur le site bas. Cette observation peut-être reliée à la baisse de consommation du haricot (fin de récolte) parallèlement à la reprise de la couverture (fig.IV.8).

Fig.IV.9: Gradients de charge hydraulique dans les horizons superficiels sous kikuyu



□ analyse

L'assèchement s'explique, en absence de pluie, par l'évapotranspiration du haricot (enraciné sur 25 cm) et celle de la couverture (enracinée sur 70 cm), bien que limitée par les herbicides.

Si l'on superpose les profils obtenus sous kikuyu et en sol nu, il apparaît globalement que le fonctionnement est identique sauf dans l'inter-rang de kikuyu où la consommation est plus forte en sol nu.

En fin de suivi (9 juillet) le gradient ascendant très fort sous kikuyu illustre la reprise de la couverture (arrêt des traitements herbicides). Cette reprise très nette sur le site kikuyu - haut entraîne une consommation plus forte qu'en sol nu (gradients plus importants) alors qu'elle est équivalente pour le site bas.

En supposant que le haricot a consommé autant d'eau sur les deux parcelles, il semble donc que l'action de la couverture (consommation réduite par les herbicides et effet mulch limitant l'évaporation directe) soit équivalente à l'évaporation directe du sol nu.

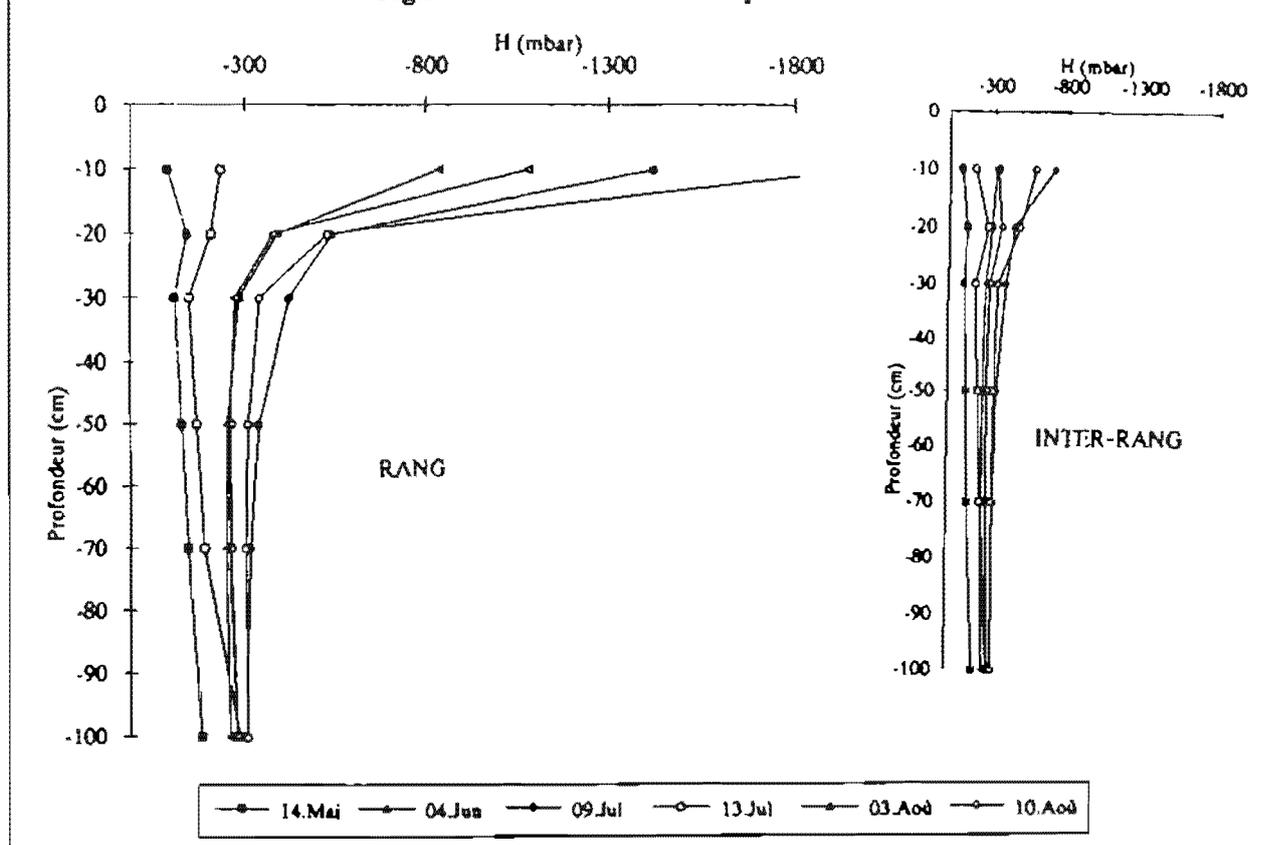
Le fonctionnement hydrique profond sur ces deux parcelles explique le peu d'intérêt des mesures d'humidité superficielles et les difficultés d'en tirer des conclusions.

3-3 Evolution sous lotier

□ fonctionnement d'ensemble (fig.IV.9)

Le gradient ascendant qui apparaît au cours de la période ne concerne que les 30 premiers centimètres. Il descend légèrement à 50 cm en fin de suivi. En profondeur les profils de charge sont droits.

Fig.IV.9: Profils tensiométriques sous lotier



□ fonctionnement rang / inter-rang

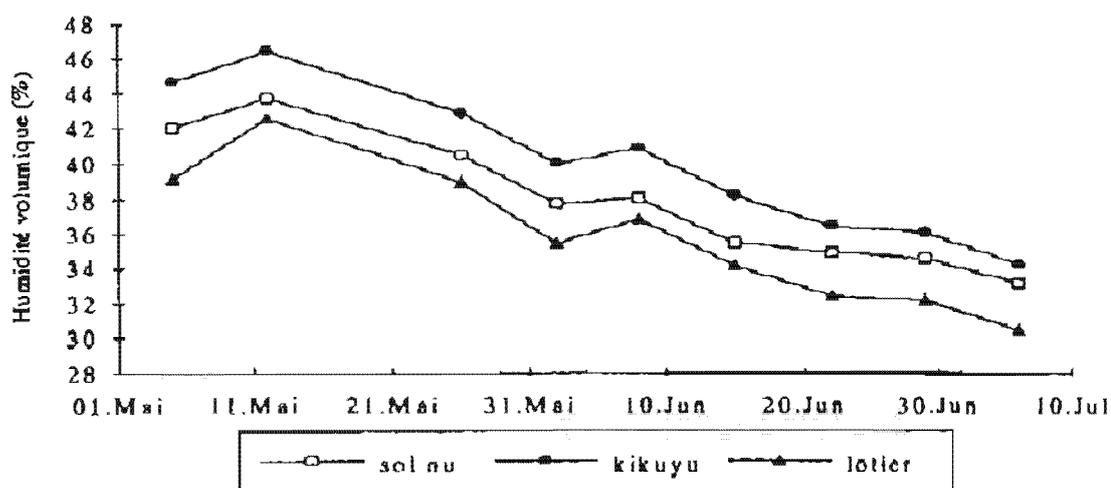
La différence rang / inter-rang est nette sur les 20 premiers centimètres (gradients plus forts dans le rang) mais cette différence persistant au cours de la saison sèche bien après la récolte on peut se demander s'il n'y a pas là un effet de variabilité spatiale ou un dysfonctionnement du Watermark à 10 cm (annexe 16).

□ analyse

Sous lotier le haricot s'enracine sur les 25 premiers centimètres d'où la consommation importante sur cette profondeur. Cette observation est à relier aux valeurs d'humidité globalement plus faibles que sur les autres sites (fig.IV.10). La couverture de lotier s'enracine jusque 40 cm de profondeur environ mais d'après les profils tensiométriques la consommation est faible en dessous de 30 cm. On peut supposer d'une part que l'essentiel des prélèvements d'eau est effectué par la partie superficielle du système racinaire de la couverture, d'autre part que l'action des herbicides limite considérablement cette consommation. En effet la légère descente du gradient à 50 cm en fin de période illustre la reprise de la couverture, bien que le phénomène soit moins marqué qu'en kikuyu.

L'effet mulch lié à la couverture du sol par le lotier réduit l'évaporation directe et explique les différences de comportement en profondeur avec le sol nu.

Fig.IV.10: Evolution moyenne de l'humidité sur 20 cm



3-4 Bilan de la période

Nous avons pu mettre en évidence, à travers les profils tensiométriques, deux grands types de fonctionnement hydrique:

- ♦ un fonctionnement en profondeur en sol nu qui montre qu'en période sèche l'évaporation directe est loin d'être négligeable. La situation identique sous kikuyu prouve que la consommation du kikuyu contrôlé aux herbicides équivaut à cette évaporation.

- ♦ un fonctionnement plus en surface sous lotier qui montre que l'effet mulch créé par la présence de la couverture est efficace puisqu'il limite l'assèchement en profondeur.

Par l'association de cet effet mulch et du contrôle par herbicides, les couvertures ne semblent donc pas pénaliser la consommation en eau du haricot, ce qui est confirmé par les rendements obtenus cette année (annexe 17). On n'obtient pas de différence significative entre parcelles avec et sans couverture. Seul un retard du cycle du haricot en sol nu qui n'est pas imputable au système de culture mais à des problèmes de levée explique les différences de récolte.

4- ANALYSE DU SUIVI APRES HARICOT

Cette période débute par une pluie importante (28 mm le 10 juillet) et est plus régulièrement humide que la précédente. Le total des précipitations atteint en effet:

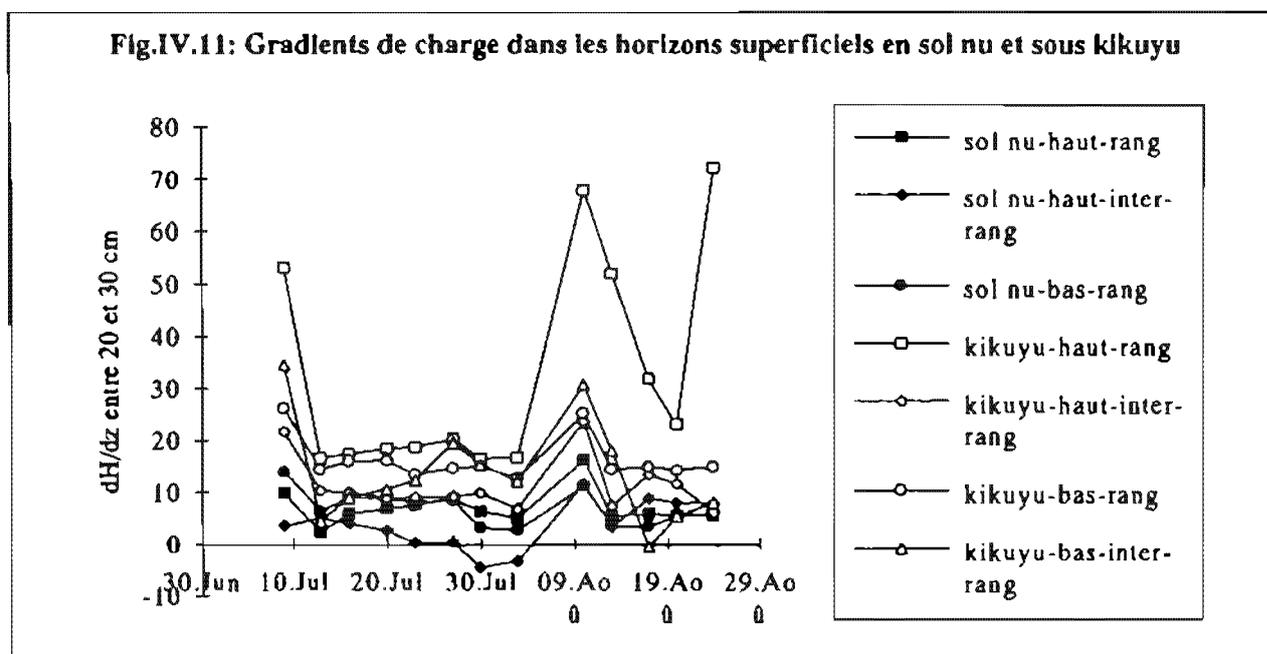
56mm répartis sur 12 jours de pluies soit environ **30 %** de la période, contre

50 mm répartis sur 9 jours de pluie soit environ **15 %** de la période pendant le suivi sous haricot.

4-1 Description du fonctionnement

En sol nu et sous kikuyu l'influence de la pluie de 28 mm est sensible sur 50 à 70 cm de profondeur. Le stock d'eau, considérablement réduit par l'assèchement marqué en fin de cycle du haricot et par la reprise des couvertures, se reconstitue. Sous lotier, étant donné l'assèchement limité en profondeur pendant la période précédente, l'influence de la pluie est moindre. Le stock d'eau étant encore important en profondeur avant la pluie on peut supposer qu'une partie de l'eau a ruisselé sur cette parcelle.

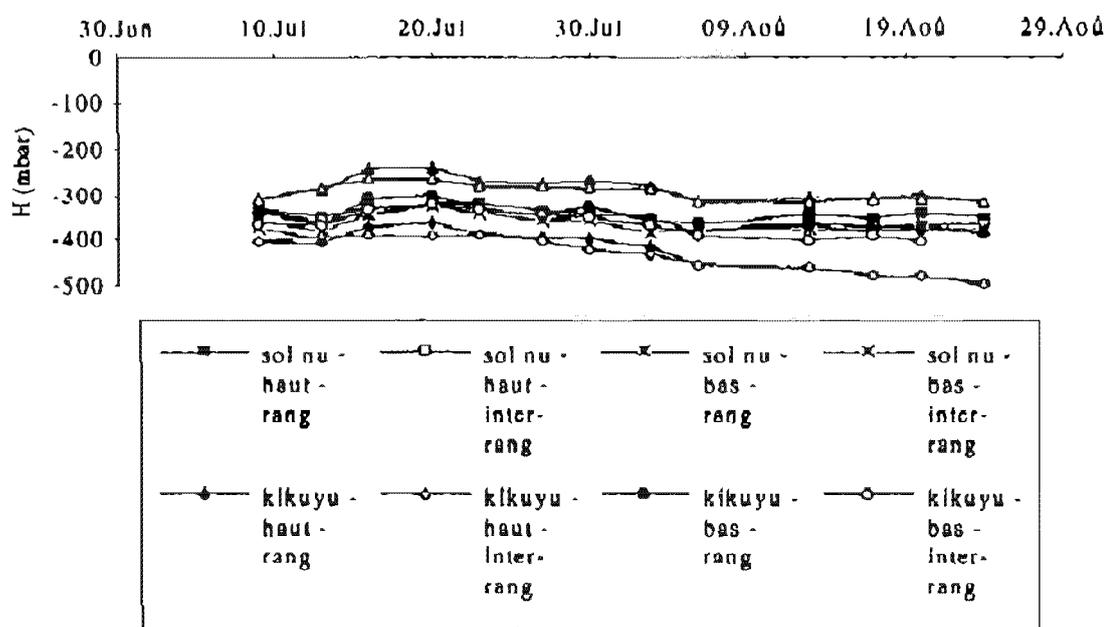
Sur l'ensemble de la période les gradients de charge hydraulique ne sont visibles que sur 30 cm de profondeur. Ils semblent plus importants sous kikuyu qu'en sol nu (fig.IV.11).



En profondeur le sol nu se comporte comme le site kikuyu - bas. Par contre le site kikuyu - haut semble s'assécher plus d'après les succions atteintes (fig.IV.12).

Sous lotier le comportement est exactement le même que pendant la culture du haricot (même forme des profils, même gamme de succions). L'assèchement des horizons superficiels se poursuit (35% d'humidité volumique le 8 septembre sous lotier à comparer à 30 % sur les autres parcelles) et l'effet mulch semble toujours protéger les couches profondes de l'évaporation (succions plus faibles qu'en sol nu).

Fig.IV.12: Evolution comparée de la charge hydraulique en profondeur (100 cm)



4-2 Bilan de la période

En conditions plus humides les différences de comportement liées au système de culture sont moins nettes, bien que les couvertures ne soient plus contrôlées par les herbicides, ce qui est en accord avec les observations de LAL *et al* (1989).

Cependant il semble que la reprise du kikuyu amorcée en fin de cycle du haricot se traduise par une consommation en eau qui dépasse l'évaporation directe du sol nu (gradients plus forts dans les horizons superficiels, succions plus fortes en profondeur).

Sous lotier la consommation de la couverture dans les horizons superficiels semble équivalente à l'évaporation en sol nu. Par contre l'effet mulch continue de protéger les couches profondes de l'assèchement (succions plus faibles qu'en sol nu).

5- SYNTHÈSE

Par l'observation des profils racinaires nous avons pu mettre en évidence un premier effet des plantes de couverture sur la culture. Sous kikuyu et sous lotier les racines du haricot se concentrent préférentiellement dans les couches superficielles alors qu'en sol nu elles progressent dans l'horizon Sa.

L'analyse des profils tensiométriques pendant le cycle du haricot permet de conclure que les couvertures ne pénalisent pas la consommation en eau de la culture, ce qui aboutit à des rendements équivalents sur les trois parcelles. Il semble donc que le contrôle des couvertures par les herbicides soit bien maîtrisé. La consommation hydrique limitée qui en découle, associée à un effet de protection contre l'évaporation par la couverture du sol permettent d'expliquer l'équilibre obtenu.

La reprise des couvertures après la récolte du haricot se traduit globalement par un assèchement des couches enracinées qui dépasse l'assèchement dû à l'évaporation en sol nu. Les succions atteintes et les gradients de charge hydraulique sont en effet plus importants sous couverture. La culture suivante (tomate) sera plantée dès le 15 octobre (récolte en janvier économiquement très intéressante) mais auparavant les couvertures seront fauchées puis herbicidées, ce qui devrait limiter les conséquences de l'écart observé en fin de suivi.

Le suivi tensiométrique nous a aussi permis de mettre en évidence deux fonctionnements complètement différents selon la plante de couverture utilisée et qui sont à mettre en relation avec les profils racinaires observés: La couverture de kikuyu fait fonctionner le sol sur une grande profondeur puisqu'elle puise de l'eau jusqu'à 70 cm environ. A l'opposé l'approvisionnement en eau du lotier se fait préférentiellement dans les couches superficielles. Si l'effet mulch permet alors de protéger les couches profondes de l'assèchement, il y maintient une réserve en eau qui n'est pas utilisée.

Nous avons tenté de quantifier par la loi de Darcy les flux d'eau observés sous l'enracinement du kikuyu (à 85 cm) et sous celui du lotier (à 50 et 85 cm) en les comparant avec ceux obtenus aux mêmes profondeurs en sol nu. Les résultats obtenus (annexe 18) permettent de confirmer les observations de VAKSMANN (1987). En effet l'erreur liée à l'estimation de la conductivité hydraulique par infiltrométrie (forte variabilité des résultats) et à l'extrapolation de ces résultats à des succions plus fortes est trop importante par rapport aux flux calculés.

CONCLUSION

Le suivi tensiométrique de l'eau dans le sol au cours de la saison sèche s'est révélé être un outil efficace pour dégager une typologie des fonctionnements hydrodynamiques liés aux systèmes de culture. Il nous a amenés à conclure que, malgré des fonctionnements différents liés aux modes d'enracinement de l'association culture / plante de couverture, la gestion des couvertures est suffisamment bien maîtrisée pour qu'il n'y ait pas d'effet néfaste sur l'alimentation hydrique du haricot.

On remarque que la complexité du problème posé tenait dans la part qui doit être faite entre:

- ◆ la limitation de l'assèchement par la couverture (effet mulch),
- ◆ l'assèchement dû à la consommation de la couverture.

Par ailleurs, ce travail présentait un intérêt méthodologique lié à l'utilisation:

- ◆ de la sonde TDR sur andosol,
- ◆ de tensiomètres résistifs pour aborder les fortes succions.

L'utilisation de ces matériels suggère quelques critiques d'ordre méthodologie:

◆ il est regrettable qu'il n'y ait pas eu plus de répétitions, en particulier en lotier compte tenu de la forte hétérogénéité spatiale. La lourdeur du dispositif nous empêchait de les envisager mais il serait bon de confirmer les résultats sur d'autres années, en intégrant en particulier des saisons sèches plus marquées.

◆ il aurait été intéressant d'effectuer le suivi sur l'ensemble du cycle de culture, en particulier sur les premiers stades de la culture où l'on peut penser que les phénomènes de compétition culture / couverture sont importants.

◆ il est dommage de ne pas avoir suivi l'humidité sur une plus grande profondeur, ce qui nous aurait permis de confirmer et éventuellement de quantifier les résultats obtenus par tensiométrie. On peut même envisager l'idée d'un bilan hydrique qui permettrait d'intégrer les résultats acquis sur les horizons superficiels (où l'action de la couverture est très nette) aux observations faites en profondeur au cours de cette étude. Il faudrait pour cela effectuer le bilan sur des parcelles où les couvertures sont implantées depuis longtemps. Le net effet des couvertures sur les mouvements d'eau dans le sol dépend en effet des influences d'une augmentation de l'infiltration et de la rétention en eau d'une part, de l'utilisation de l'eau par cette couverture d'autre part.

BIBLIOGRAPHIE

ALMEIDA F.S., RODRIGUES B.N., 1985. Guia de herbicidas: contribucao para o uso adequado em plantio direto e convencional. Londrina (Brésil) GTZ p 341-399.

BEAUMONT A., LAPEYRONNIE J., TESSIER D., 1989. Techniques d'étude de la porosité et du contenu en eau de mottes préparées à différents pF. Station de Science du Sol, INRA Versailles, 14 p.

BOWKER D.E., 1991. Permanent vineyard floor cover: farming the environment. In Proc., 1991 Calif. Weed Conf.

BURLE D., 1993. Effets des couvertures végétales permanentes associées au géranium sur la fertilité des andosols de l'La Réunion. Rapport de DITA, ENITA Bordeaux, 50 p.

CLOTHIER B., WHITE I., 1981. Measurement of sorptivity and soil water diffusivity in the field. Soil Science Society of America Journal, 45 : 241-245.

FONTAR X., THOMAS L., 1992. Etude des effets allélopathiques d'une couverture de kikuyu (*Pennisetum clandestinum*) sur géranium, cultures vivrières et certaines plantes adventices. Mémoire de fin d'étude, ESA Angers, 153 p.

GARLOCK D. H., 1982. The effects of permanent cover cropping on a nonirrigated wine grape vineyard in the Napa Valley. In Proc., 1982 Calif. Weed Conf., San Diego.

GENERE B., 1985. Elaboration d'un programme multilocal de recherches agroclimatiques sur la canne à sucre à la Réunion. Thèse de doctorat-Ingénieur, ENSA Montpellier, 115 p.

GENERE B., 1985. Réseau multilocal de mesures climatiques à la Réunion: pour une connaissance fiable du méso-climat et l'appui à l'expérimentation agronomique. Agron. Trop., 40 (3) : 202-210.

GENERE B., NATIVEL R., 1988. Analyse quantitative des pluies de Colimaçons. Fiche d'essai n°01, IRAT Réunion, 14 p.

GOUBAND F., 1992. Fonctionnements hydrodynamiques superficiels d'andosols cultivés de la Réunion. Incidences d'itinéraires techniques anti-érosifs. Rapport de DAA, ENSA Montpellier / CIRAD Réunion, 61 p.

HILLEL D., 1975. Soil and water, physical principles and processes. Academic Press pub., 288 p.

HILLEL D., 1988. L'eau et le sol. Académie Louvain-la-Neuve 1988, 257 p.

HUMEAU L., 1993. Etude des effets allélopathiques du kikuyu (*Pennisetum clandestinum* Hochst.) sur la tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) et deux plantes adventices : *Cyperus rotundus* L. et *Bidens pilosa* L.. Mémoire de maîtrise, Chimie et Biologie Végétales, Université de La Réunion, Faculté des Sciences, 24 p.

LAL R., 1989. Conservation tillage for sustainable agriculture: tropics versus temperate environments, *adv. in Agron.*, 42 : 86-197.

LOW A.J., 1972. Improvements in the structural state of soils under leys. *J. Soil Sci.*, 6 : 179-199.

LUC J.P., 1978. Caractérisation hydrique des sols. Utilisation des mesures d'humidité et de charge in situ, comparaison avec les mesures de laboratoire. Thèse USTL, 163 p.

MICHELLON R., CHASTEL J-M., 1988. Recherches sur les systèmes de production agricole dans les Hauts de l'Ouest. Cinq années de recherches agronomiques 1984-1988, CIRAD Réunion, p 97-111.

MICHELLON R., PERRET S., ROEDERER Y., 1991. Conservation et gestion des sols et des cultures. Rapport Annuel CIRAD 1991, p 81-84.

MONIMEAU A., 1991. Travail minimum avec couverture permanente du sol dans les systèmes de culture à base de géranium des Hauts de l'Ouest de la Réunion. Effets sur les caractéristiques physicochimiques des andosols, intérêts agronomiques. Rapport de DAT ESAT, CNEARC / CIRAD Réunion, 95p.

MONNIER G., STENGEL P., FIES J.C., 1973. Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux; Application à l'analyse des systèmes de porosité du sol. *Annales Agronomiques*, 24 (5) : 533-545.

PERRET S., 1992. Etude de propriétés physiques, hydriques et mécaniques de sols andiques de la Réunion. Facteurs naturels et anthropiques d'évolution des horizons culturaux, Implications agronomiques et écologiques. Thèse de doctorat, ENSA Montpellier / CIRAD Réunion, 280 p.

PERROUX K.M., WHITE I., 1988. Designs for disc permeameters. *Soil Science Society of America Journal*, 52 (5) : 1205-1215.

PHILLIPS S., 1985. O plantio direto no mundo, situação actual e perspectivas. Cooperativa agro-pecuária apati. *Anais do 3º encontro nacional de plantio direto*, p 192-199.

RAUNET M., 1988. Carte morphopédologique au 50 000ème. Département de la Réunion. CIRAD / Région Réunion, 4 feuilles.

RAUNET M., 1991. Le milieu physique et les sols de l'île de la Réunion; conséquences pour la mise en valeur agricole. Conseil Régional / CIRAD Réunion, 438 p.

ROSELLO V., 1984. Les sols bruns des Hauts (Île de la Réunion). Caractérisation minéralogique et microstructurale de matériaux andosoliques, reconnaissance expérimentale de leur comportement. Thèse de doctorat de spécialité, Université Paris VII, 200 p.

THONY J.L., 1990. Infiltromètres à succion contrôlée (sorptionimètres). Notice d'utilisation provisoire. Institut de Mécanique de Grenoble, groupe Hydrologie, mai 1990, 9 p.

THIONY J.L., VACHAUD G., VAUCLIN M., 1988. Analyse critique de mesures tensiométriques par capteur de pression portatif. Bulletin du G.F.H.N. Milieux poreux et transferts hydriques, nov 88 (24) : 37-60.

TOPP G.C., DAVIS J.L., ANNAN A.P., 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. Water resources research, 16 (3) : 574-582.

VAKSMANN M., 1987. Etude du fonctionnement hydrique des andosols et des sols andiques de l'île de la Réunion. Thèse de doctorat USTL / CIRAD Réunion, 157 p.

WOODING R.A., 1968. Steady infiltration from a shallow circular pond. Water Resource Research, 4 : 1205-1215.

ANNEXES

PARTIE I.

- 1 Carte pluviométrique de la Réunion (avec localisation des Hauts de l'Ouest)
- 2 Pluviométrie comparée de deux sites de la zone "sous le vent"
- 3 Carte morpho-pédologique de la Réunion (avec localisation des Hauts de l'Ouest)
- 4 Itinéraire technique suivi pour la culture du haricot avec et sans couverture

PARTIE II.

- 5 L'eau dans le sol (rappels théoriques)
- 6- Schéma des presse à membrane et cellule à plaque de céramique
- 7 Résultats pF: variabilité (tableau de tous les résultats)
- 8 L'infiltromètre à succion contrôlée
- 9 Infiltrométrie - résultats et variabilité
10. Exemple de calcul graphique du K (infiltré)
- 11 Conductivité hydraulique des horizons Aa et Sa en sol nu et sous couverture (d'après BURLE, 1993)

PARTIE III.

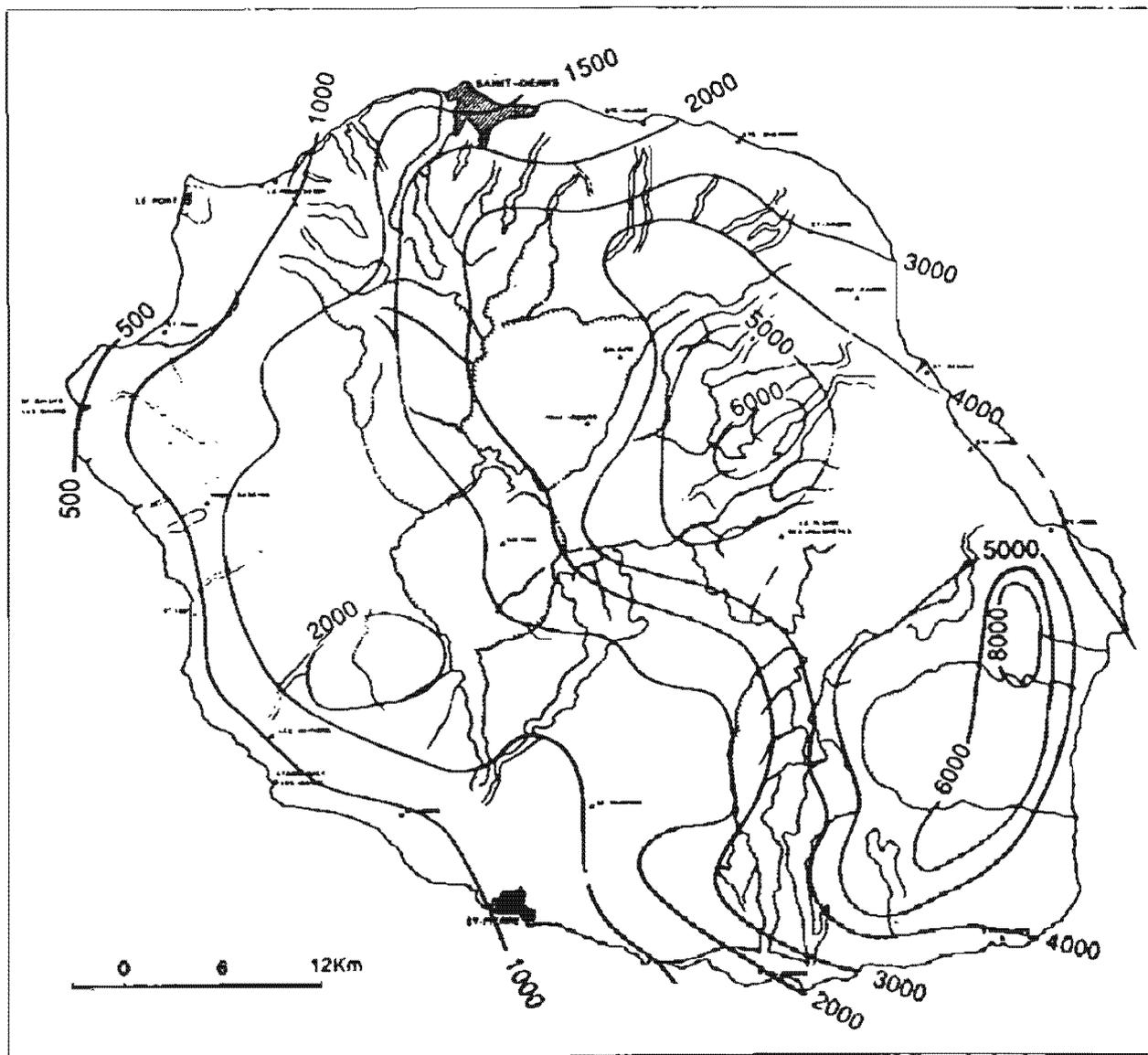
- 12 Etalonnage TDR - Résultats et statistiques
- 13 Le tensiomètre à bougie
- 14 Etalonnages des tensiomètres

PARTIE IV.

- 15 Pluviométries comparées
- 16 Gradients de charge hydraulique dans les horizons superficiels sous lotier
- 17 Rendements en haricot (1993)
- 18 Essai de quantification des flux par la loi de Darcy - Exemple

PLUVIOMETRIE MOYENNE ANNUELLE (en mm) - PERIODE 1958 - 1980

(d'après RAUNET, 1991)

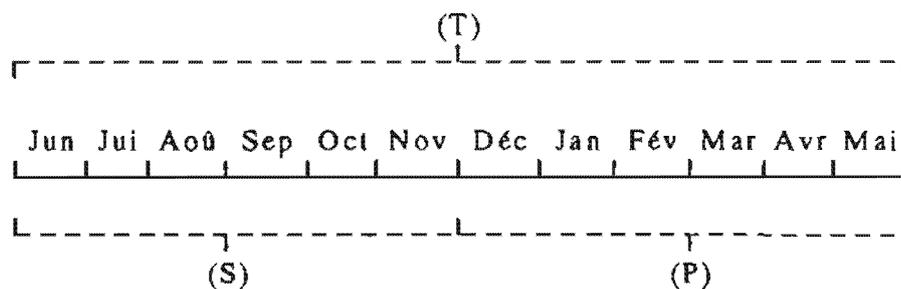


PLUVIOMETRIE COMPAREE DE DEUX SITES DE LA ZONE "SOUS LE VENT"

T : pluviométrie totale (en mm de juin à mai inclus)

S : pluviométrie saison sèche (en mm de juin à novembre inclus)

P : pluviométrie saison humide (en mm de décembre à mai inclus)



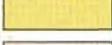
	Ligne Paradis (120 m)			Collinaçons (800 m)		
	T	S	P	T	S	P
1966-67	879	430	449	1450	1265	185
1967-68	1263	707	556	1552	1112	440
1968-69	936	578	358	1408	1006	402
1969-70	1114	843	271	1588	1426	162
1970-71	658	575	83	1388	1345	43
1971-72	1217	918	299	1429	1154	275
1972-73	1662	1295	367	1674	1301	373
1973-74	715	279	436	1333	1086	247
1974-75	1457	967	490	1633	1152	481
1975-76	871	556	315	1258	1023	235
1976-77	1304	1008	296	1453	1288	165
1977-78	716	522	194	1001	815	186
1978-79	1413	1083	330	1339	1085	254
1979-80	2325	1707	618	1172	716	456
1980-81	1250	897	353	1365	1144	221
1981-82	805	563	242	1746	1405	341
1982-83	880	268	612	936	527	409
1983-84	729	377	352	1073	824	249
1984-85	839	642	197	1569	1409	160
MEDIANE	936	642	352	1408	1144	249

LEGENDE

I - LANDES ERICOIDES DE HAUTE ALTITUDE

-  - Placages cendreux à andosols perhydratés cryptopodzoliques, saupoudrages de lapilli à andosols vitriques, rocailles et dalles affleurantes, cônes de scories...

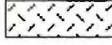
II - COULEES DE LAVE A MATELASSAGE CENDREUX QUASI CONTINU

-  - Sols faiblement ferrallitiques andiques (non perhydratés) sur altérites et cendres mélangées (reptation et colluvionnement).
-  - Sols bruns andiques sur cendres
-  - Andosols désaturés non perhydratés chromiques sur cendres
-  - Andosols désaturés perhydratés chromiques sur cendres (avec ou sans "avoune").
-  - Andosols désaturés perhydratés chromiques cryptopodzoliques sur cendres, à "mascareignite".

III - COULEES DE LAVE FAIBLEMENT ALTEREES A RECOUVREMENT CENDREUX PEU EPAIS ET DISCONTINU (NOMBREUX AFFLEUREMENTS)

-  - Sols bruns sur "gratons" désagrégés
-  - Sols bruns andiques sur cendres
-  - Andosols désaturés non perhydratés sur cendres
-  - Andosols désaturés perhydratés cryptopodzoliques sur cendres

IV - COULEES DE LAVE NON ALTEREES, SANS RECOUVREMENT CENDREUX

-  - Sols peu évolués humifères (litière) sur "gratons" légèrement désagrégés
-  - Coulées brutes et cônes de scories.

V- COULEES DE LAVE ALTEREES, SANS RECOUVREMENT CENDREUX

-  - Relief de dissection, à sols peu évolués sur matériau altéritique remanié colluvionné et à reliques ferrallitiques.
-  - Planèzes découpées résiduelles à sols ferrallitiques épais
-  - Planèzes à sols faiblement ferrallitiques
-  - Planèzes à sols bruns non ferruginisés
-  - Planèzes à sols bruns ferruginisés et sols ferrallitiques
-  - Planèzes à vertisols et affleurements caillouteux.

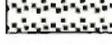
VI - "TUFS" DE SAINT-GILLES

-  - Sols bruns peu épais et sols vertiques

VII - ZONES EFFONDREES DES CIRQUES A MATERIAUX DETRITIQUES

-  - Zones à ravinement très actif ("bad-Lands) et "llets" à sols bruns ou andosols caillouteux.

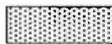
VIII - CÔNES DE DEJECTION ("ALLUVIONS A GALETS")

-  - Cônes "anciens" à sols caillouteux faiblement ferrallitiques
-  - Cônes "anciens" à sols caillouteux vertiques
-  - Cônes récents à sols sablo-caillouteux andiques
-  - Cônes récents à sols sablo-caillouteux peu évolués.

IX - CUVETTES LITTORALES A ENNOYAGE ALLUVIAL ARGILO-LIMONEUX

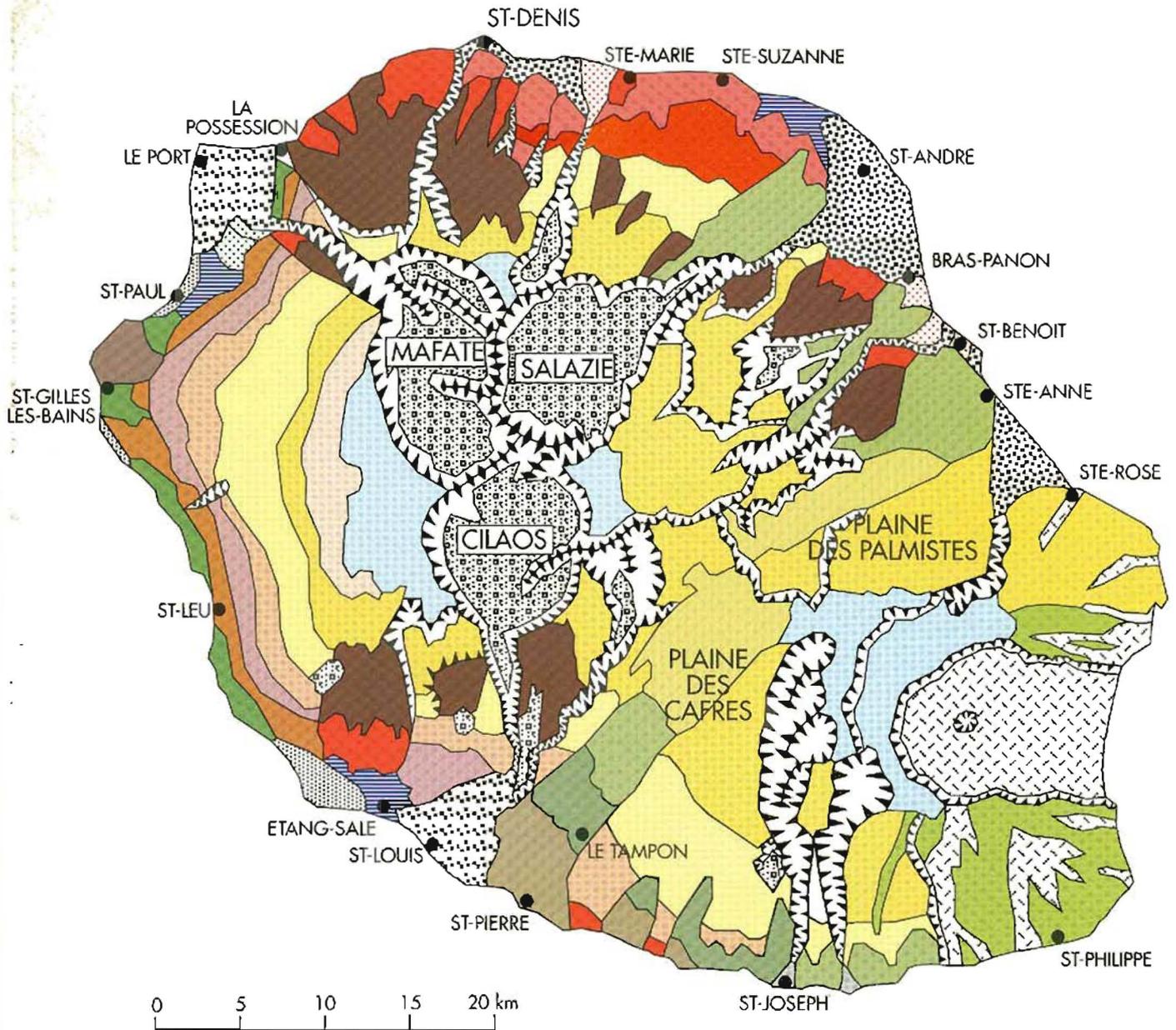
-  - Sols argileux plus ou moins hydromorphes

X - SABLES LITTORAUX (CORDONS SABLEUX EOLIENS)

-  - Régosols et sols peu évolués sableux (basaltiques ou madréporiques)

XI - "REMPARTS"

-  - Lithosols et placages colluvionnés brunifiés ou andiques.



IRAT
 M. RAUNET
 1989

ILE DE LA REUNION

CARTE MORPHO-PEDOLOGIQUE

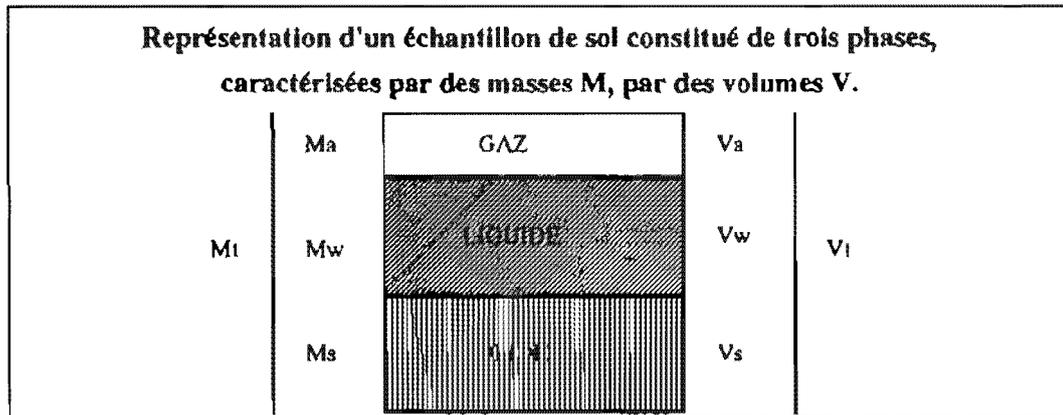
**ITINERAIRE TECHNIQUE SUIVI POUR LA CULTURE DU HARICOT
AVEC ET SANS COUVERTURE**

	Sol nu	Kikuyu	Lotier
Préparation du terrain	Paraquat après tomate Sarclage et mise en andains	Fauche du fourrage selon le précédent cultural	
Semis	<p align="center">Le 15 Mars 1993 avec la variété Marlat</p> au semtout après sillonnage à 70 cm d'écartement avec bine-tout (soit 84 kg de semences par ha respectivement) à la canne planteuse à 70 cm d'écartement à raison de 3 grains par poquet tous les 20 cm environ, complété en 1993 par une ligne supplémentaire semée un interligne sur deux (soit 125 ou 136 kg par ha : respectivement avec kikuyu ou lotier)		
Insecticide	Diazinon localisé au semis à la dose de 1000 g par ha		
Fumure localisée	40-80-80 sous forme de 10-20-20 appliquée en 2 fois (semis et levée) complétée selon les traitements par 5 t par ha de compost de géraniun		
Protection phytosanitaire en cours de culture	<ul style="list-style-type: none"> - Appâts à la levée contre les noctuelles préparé avec du Lindane ou Endosulfan et molluscicide - Traitement contre la graisse : cuivre + manébe + zinébe au stade 2 feuilles trifoliées (720 g + 240 g + 240 g par ha) et au stade début floraison puis 10 jours plus tard (à dose réduite de moitié) associé alors à un traitement contre la pyrale à l'endosulfan (250 g par ha) ou à la deltaméthrine (5 g par ha) - Traitement éventuel contre la pourriture grise : vinclozoline en Mai 1993 		
Lutte contre les adventices	Nitroféne + Dinoterbe : 900 g + 1500 g par ha en post semis, puis en cours de culture, en dirigé paraquat : 250 g par ha	Ioxynil (365 g/ha) en plein le 19 Mars Arrachage manuel des adventices en fin de cycle sur le rang	
Maîtrise de la couverture		Méfluidide 100 g par ha le 10 Mars 1993 suivi de paraquat 400 g par ha en dirigé avant semis Fluazifop-p-butyl sur les taches qui redémarrent 60 g par ha au maximum	Bentazone en plein (144 g par ha) le 15 Avril
Récolte	Un mois avant maturité : une à deux récoltes en jasse en Juin ou Juillet ; puis une récolte en sec en Juillet ou Août		

L'EAU DANS LE SOL (RAPPELS THEORIQUES)

1 Caractérisation du réservoir sol

Le sol est un système à trois phases: sol, air, eau (HILLEL, 1975; LUC, 1978)



Cette représentation conduit à la définition de paramètres d'état:

la masse volumique du sol sec ou densité apparente (g / cm^3): $\rho_d = M_s / V$

la masse volumique du solide ou densité réelle (g / cm^3): $\rho_s = M_s / V_s$

la porosité totale (%): $n = V_v / V = (V_a + V_w) / V = 1 - \rho_d / \rho_s$

l'indice des vides (%): $I_v = V_v / V_s = \rho_s / \rho_d - 1$

l'indice d'eau (%): $I_w = V_w / V_s$

le degré de saturation (%): $S = I_w / I_v * 100$

la teneur en eau pondérale (%): $W = M_w / M_s * 100$

la teneur en eau volumique (%): $\theta = V_w / V * 100 = W * \rho_d$

(pour l'eau du sol, on admet: $\rho_w = M_w / V_w = 1 g / cm^3$.)

Cette caractérisation du réservoir sol envisage uniquement les rapports internes au système, entre masses et volumes des trois phases en présence. Pour connaître l'évolution du système sous l'effet de contraintes externes, c'est-à-dire aborder le fonctionnement hydrodynamique du sol, il faut prendre en considération l'état énergétique de l'eau.

2 Etat énergétique de l'eau dans le sol

L'état hydrique du sol peut être caractérisé par son potentiel matriciel, qui exprime les forces de rétention de l'eau dans le sol, essentiellement les forces d'adsorption et capillaires.

On appelle h , succion capillaire, la pression effective de l'eau, définie comme la différence entre la pression de l'eau et la pression atmosphérique. Elle est exprimée en hauteur d'eau (cm) et :

$$h = (P_w - P_0) / \rho_w g$$

h étant un terme négatif et pouvant prendre des valeurs importantes, on utilise plutôt:

$$\text{le potentiel capillaire } \Psi = -h \quad \text{et} \quad pF = \log_{10} [\Psi].$$

Si z est la distance à la surface de l'élément de volume considéré, l'axe Oz étant dirigé positivement vers le bas, l'énergie potentielle de position vaut $-z$. On définit alors H , charge hydraulique, égale à l'énergie potentielle totale de l'eau et:

$$H = h - z.$$

Les gradients de charge hydraulique sont les moteurs de tous les transferts dans le sol, l'eau s'écoulant dans le sens des potentiels décroissants. Corrélativement, le système sol-eau est en équilibre quand l'énergie potentielle est en tout point identique (LUC, 1978).

3 Ecoulement de l'eau dans le sol

La loi de Darcy, conçue à l'origine pour l'écoulement à l'état saturé, est généralisable à l'écoulement en sol non saturé par:

$$q = -K(\theta) dH / dz$$

q : flux ; z : cote ; K : conductivité hydraulique

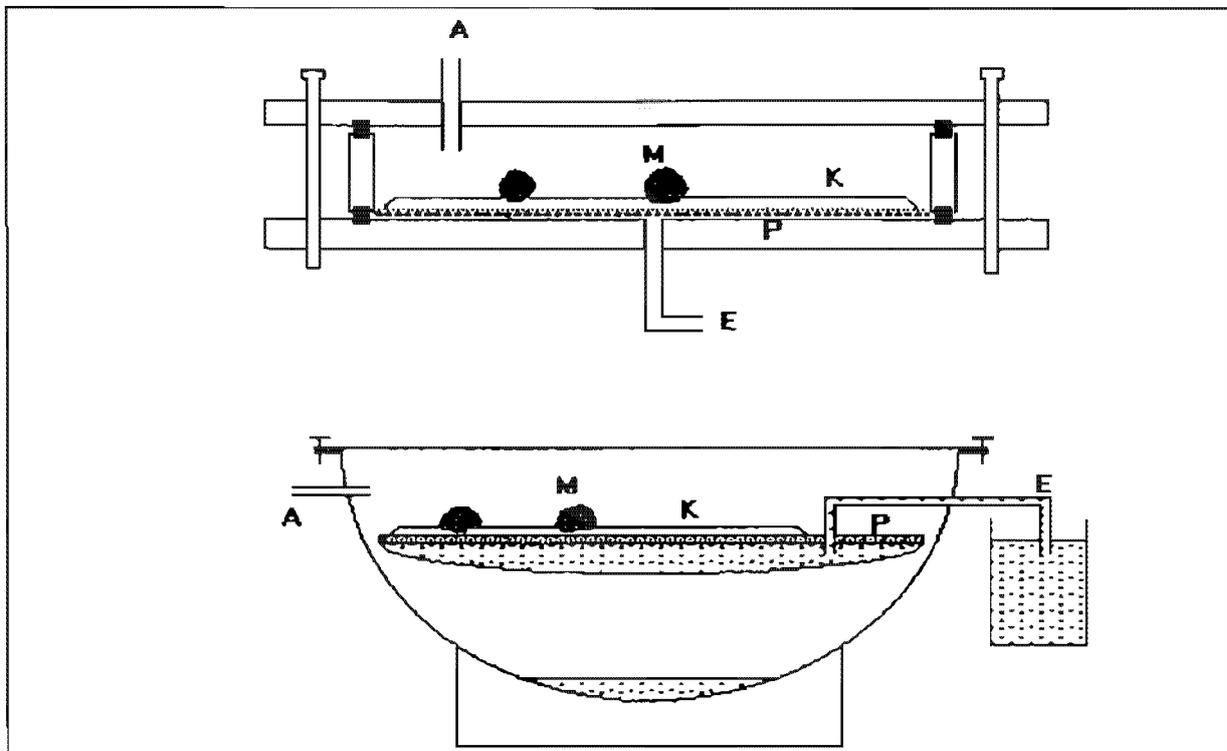
En introduisant l'équation de continuité pour un écoulement unidirectionnel vertical, dans le cas d'un fluide incompressible: $dq / dt = -dq / dz$, on obtient l'équation de l'écoulement en milieu non saturé:

$$dq / dt = d / dz [K(\theta) dH / dz]$$

La différence la plus importante entre les écoulements saturés et non saturés concerne la conductivité hydraulique: maximale à saturation, elle décroît au fur et à mesure que le sol devient non saturé, c'est-à-dire que les pores se vident, des plus gros aux plus petits.

SCHEMAS DE PRESSE A MEMBRANE ET CELLULE A PLAQUE DE CERAMIQUE

A : arrivée d'air sous pression, M : échantillons de sol (mottes), K : lit de kaolin,
P : plaque de céramique ou membrane de cellulose, E : évacuation de l'eau.



RESULTATS pF

Horizon Aa

pF	Statistiques	W	θ	Iv	Iw	n
1 10 répétitions	moyenne	63.58	58.64	1.92	1.72	0.66
	écart-type	6.31	2.44	0.20	0.17	0.02
	coeff. variation (%)	9.92	4.16	10.47	9.92	3.64
1.5 10 répétitions	moyenne	58.58	55.70	1.84	1.58	0.65
	écart-type	4.87	2.38	0.15	0.13	0.02
	coeff. variation (%)	8.31	4.27	8.13	8.31	2.79
2 6 répétitions	moyenne	55.52	51.29	1.92	1.50	0.66
	écart-type	5.18	3.63	0.20	0.14	0.02
	coeff. variation (%)	9.33	7.07	10.19	9.33	3.52
2.5 4 répétitions	moyenne	55.31	52.40	1.85	1.49	0.65
	écart-type	4.84	1.02	0.29	0.13	0.03
	coeff. variation (%)	8.74	1.95	15.86	8.74	5.24
3 7 répétitions	moyenne	52.97	50.66	1.82	1.43	0.64
	écart-type	5.22	1.69	0.20	0.14	0.02
	coeff. variation (%)	9.85	3.34	10.94	9.85	3.61
3.5 8 répétitions	moyenne	52.93	49.88	1.87	1.43	0.65
	écart-type	2.87	3.10	0.18	0.08	0.02
	coeff. variation (%)	5.41	6.21	9.52	5.41	3.29
4.2 5 répétitions	moyenne	38.93	37.49	1.83	1.05	0.64
	écart-type	1.22	4.39	0.29	0.03	0.04
	coeff. variation (%)	3.12	11.70	15.76	3.12	5.65

Horizon Sa

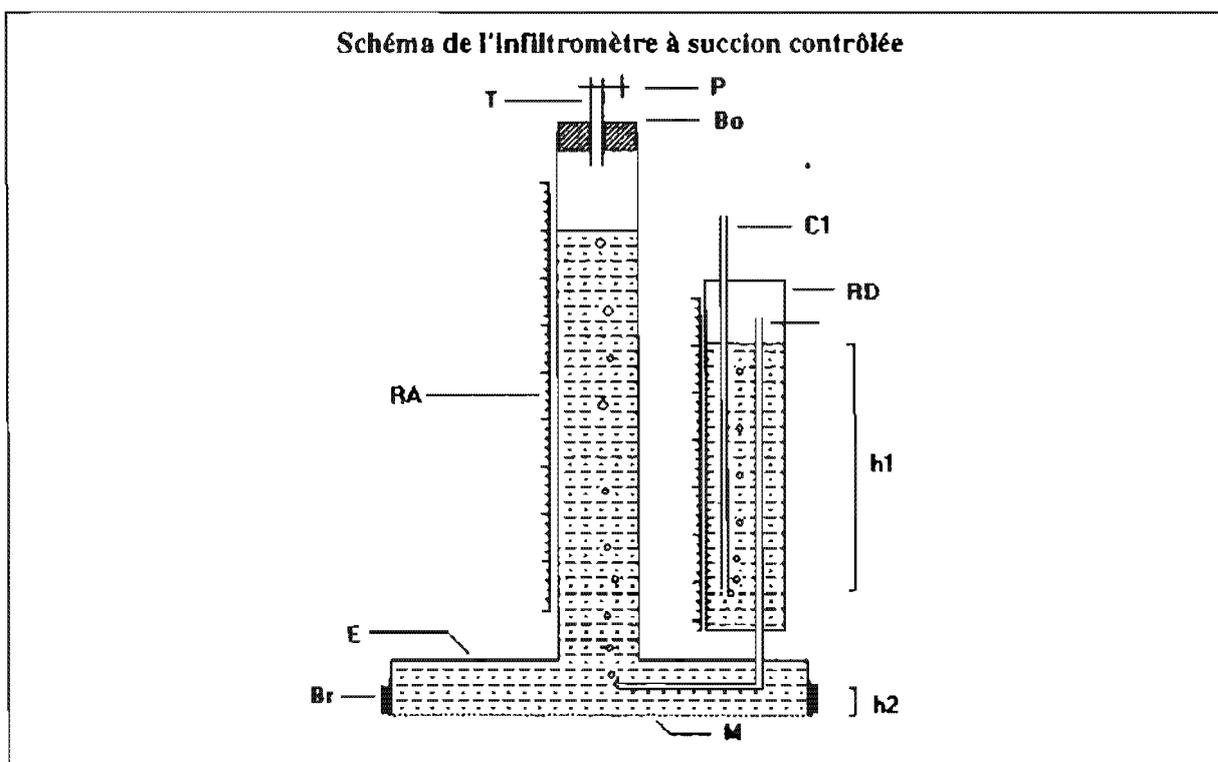
pF	Statistiques	W	θ	Iv	Iw	n
1 5 répétitions	moyenne	102.61	68.66	3.04	2.77	0.75
	écart-type	2.27	0.71	0.11	0.06	0.01
	coeff. variation	2.21	1.03	3.61	2.21	0.90
1.5 5 répétitions	moyenne	99.98	67.13	3.02	2.70	0.75
	écart-type	1.81	0.91	0.10	0.05	0.01
	coeff. variation	1.82	1.36	3.32	1.82	0.81
2 7 répétitions	moyenne	90.24	63.18	2.86	2.44	0.74
	écart-type	5.55	2.00	0.17	0.15	0.01
	coeff. variation	6.15	3.17	5.95	6.15	1.59
2.5 7 répétitions	moyenne	85.13	60.85	2.78	2.30	0.74
	écart-type	2.75	1.30	0.13	0.07	0.01
	coeff. variation	3.23	2.13	4.79	3.23	1.28
3 7 répétitions	moyenne	84.07	60.03	2.78	2.27	0.74
	écart-type	3.32	1.47	0.09	0.09	0.01
	coeff. variation	3.95	2.44	3.27	3.95	0.87
3.5 7 répétitions	moyenne	83.03	58.25	2.86	2.24	0.74
	écart-type	2.24	2.87	0.21	0.06	0.02
	coeff. variation	2.70	4.93	7.30	2.70	2.04
4.2 5 répétitions	moyenne	65.93	53.36	2.34	1.78	0.70
	écart-type	1.20	0.96	0.04	0.03	0.00
	coeff. variation	1.82	1.80	1.88	1.82	0.56

L'INFILTROMETRE A SUCCION CONTROLLEE

□ dispositif

Le dispositif expérimental, conçu par le groupe d'hydrologie de l'Institut de Mécanique de Grenoble (THONY, 1990) d'après CLOTHIER et WHITE (1981) et PERROUX et WHITE (1988), se compose de trois infiltromètres S1, S2, S3. Ils permettent de réaliser *in situ* des essais d'infiltration sous charge négative h_0 constante.

Un infiltromètre S_i comporte une embase E de rayon r_i en contact avec le sol, sur laquelle est tendue une membrane conductrice M, un réservoir d'alimentation Ra gradué (rayon R) qui peut être bouché à son sommet et un réservoir de dépressurisation Rd en communication avec l'air et l'embase grâce à deux tubes capillaires respectivement C1 et C2.



On définit:

h_1 : hauteur d'eau surmontant l'extrémité A de C1,

h_2 : dénivellation entre l'extrémité B de C2 et le plan de la membrane M.

La pression de l'eau au niveau de M, exprimée en hauteur d'eau par rapport à la pression atmosphérique, détermine la succion imposée et $h_0 = h_2 - h_1$.

Le positionnement de A par rapport au niveau constant de l'eau dans Rd permet de faire varier la succion imposée de 0 à -200 mm.

calcul de K

Si Δh représente la variation de niveau d'eau par rapport au niveau initial dans Ra, le flux d'infiltration cumulé est donné par:

$$I_{cum} = V_{cum} / \pi r^2 = \Delta h \pi R^2 / \pi r^2$$

Le flux $q_{0,\infty}$ correspondant au régime permanent d'infiltration est donné par la pente du tracé $I_{cum}(t)$ qui devient linéaire au bout d'un certain temps. Or d'après l'équation de WOODING (1968), $q_{0,\infty}$ varie linéairement avec $1/r$ et K correspond à l'ordonnée à l'origine de la droite $q_{0,\infty} = f(1/r)$.

protocole

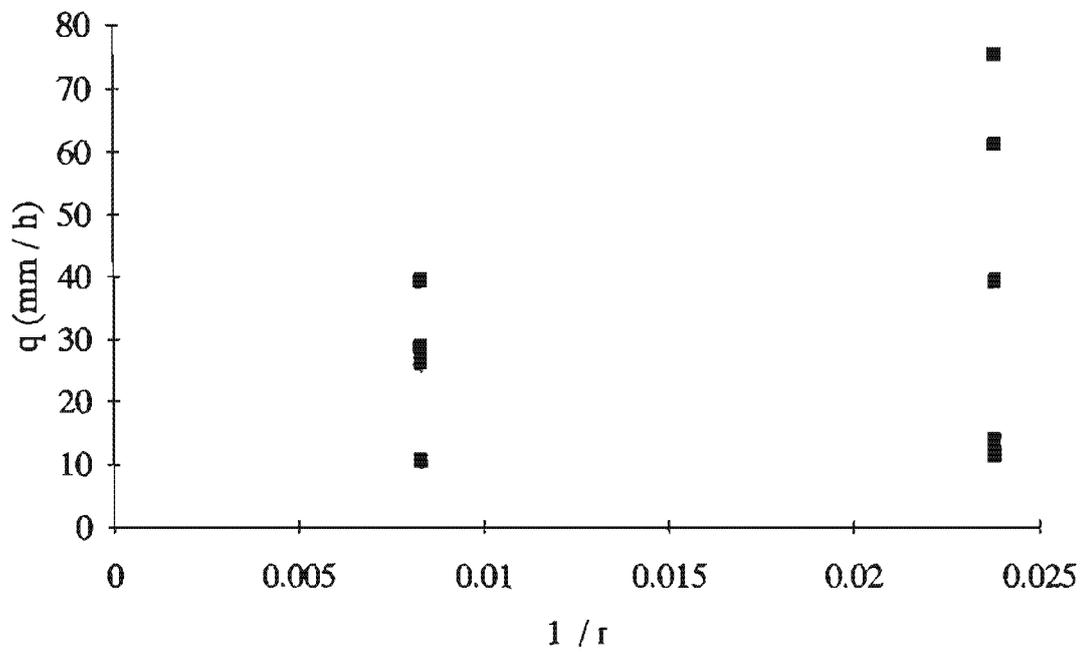
Seuls deux infiltromètres sont utilisés: S1 (R=17 mm; $r_1=120$ mm; $h_2=10$ mm) et S2 (R=17 mm; $r_2=40$ mm; $h_2=50$ mm).

On aplanit une petite surface (en évitant cependant de tasser le sol) sur laquelle on dépose une éponge humectée pour améliorer le contact de l'embase avec le sol et éviter le colmatage de la membrane. On y applique alors l'infiltromètre préalablement réglé à la succion voulue et on relève les variations de niveau d'eau à pas de temps court (15") à long (5') selon l'importance du flux observé. Lorsque les variations de volume d'eau deviennent constantes, le régime permanent est atteint, on peut alors arrêter les mesures.

La variabilité des résultats diminuant avec la succion imposée, on préconise 6 répétitions par rayon à saturation, 4 à la succion -10 mm, 3 aux suctions -30, -60 et -100 mm.

INFILTROMETRIE

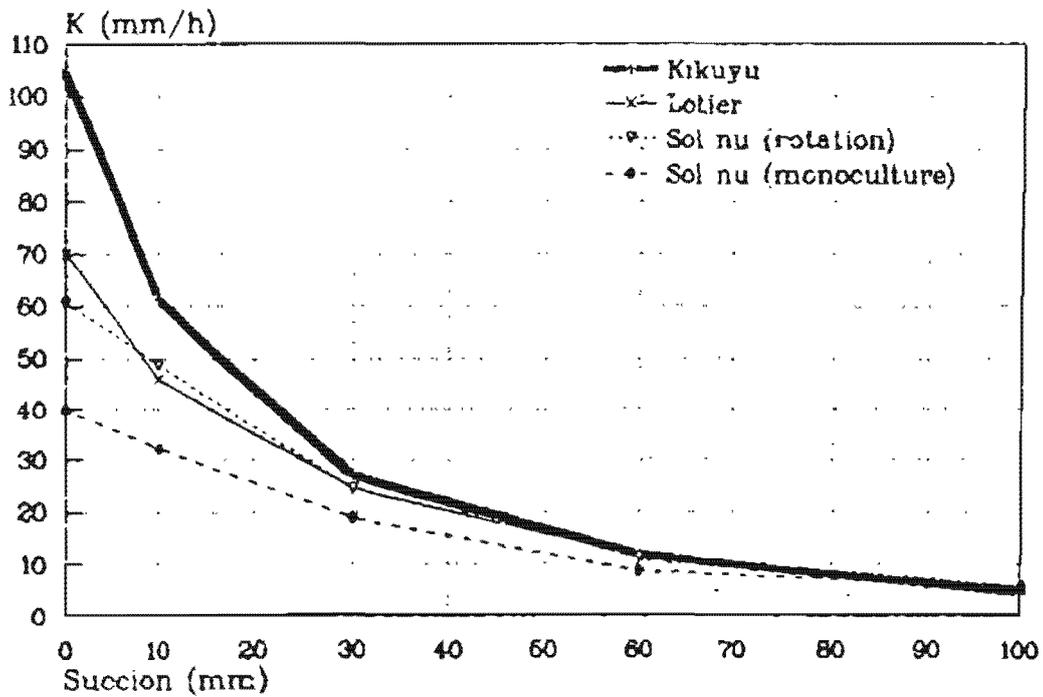
Exemple de calcul de K
(horizon Sa - succion : 10 mm)



CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE DES HORIZONS AA ET SA
EN SOL NU ET SOUS COUVERTURE

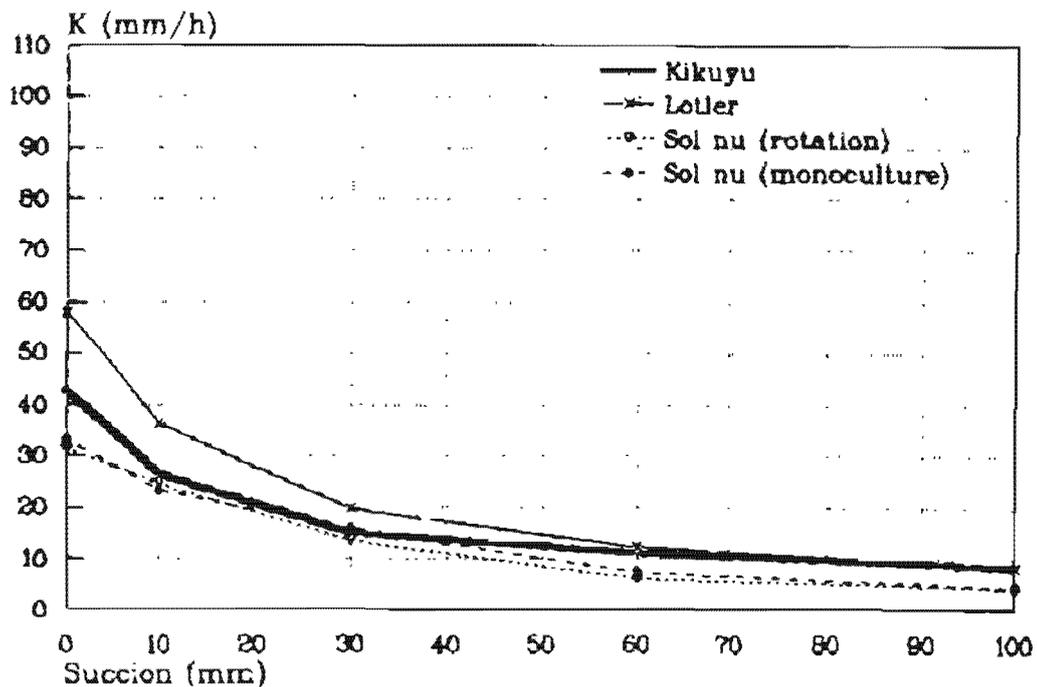
(d'après BURLE, 1993)

HORIZON A

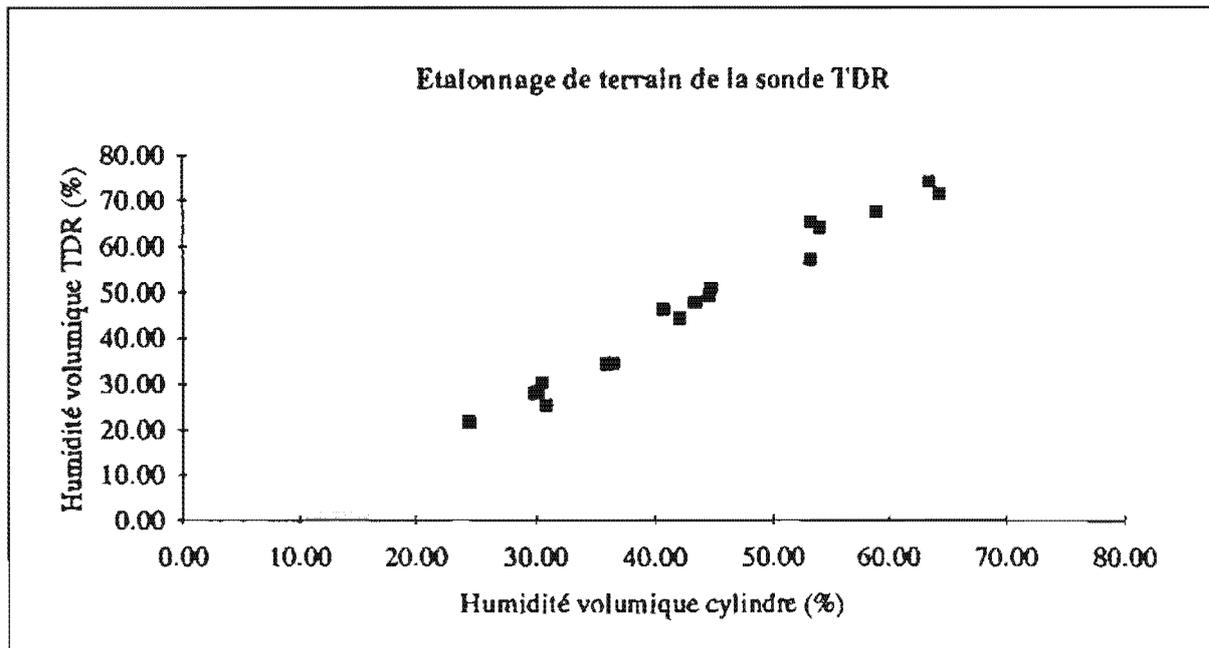


HORIZON B

(Zone enracinement des plantes de couverture)



ETALONNAGE DE LA SONDE TDR



Statistique de la régression

NOMBRE D'OBSERVATIONS : 18

NOMBRE DE VARIABLES : 2

MATRICE DE CORRELATIONS

NO	NOM	MOYENNE	ECART-TYPE ECHANTILLONNAGE	MATRICE DE CORRELATIONS		
				\bar{r}_{cy}	\bar{r}_{cy}	\bar{r}_{topp}
1	\bar{r}_{cy}	43.346	12.195	1.0000		
	\bar{r}_{topp}	41.634	11.441	0.9679	1.0000	

VARIABLE EXPLIQUÉE : \bar{r}_{topp}

VAR. COEFF. DE REGRESSION ECART-TYPE Fil. 16 ; PROBABIL.
 \bar{r}_{cy} 0.9660 0.0598 237.247 0.00

TERME CONSTANT : 2.2738

ECART-TYPE RESIDUEL : 2.964
 R^2 : 0.9368
 R MULTIPLE : 0.9679

TABLEAU D'ANALYSE DE VARIANCE

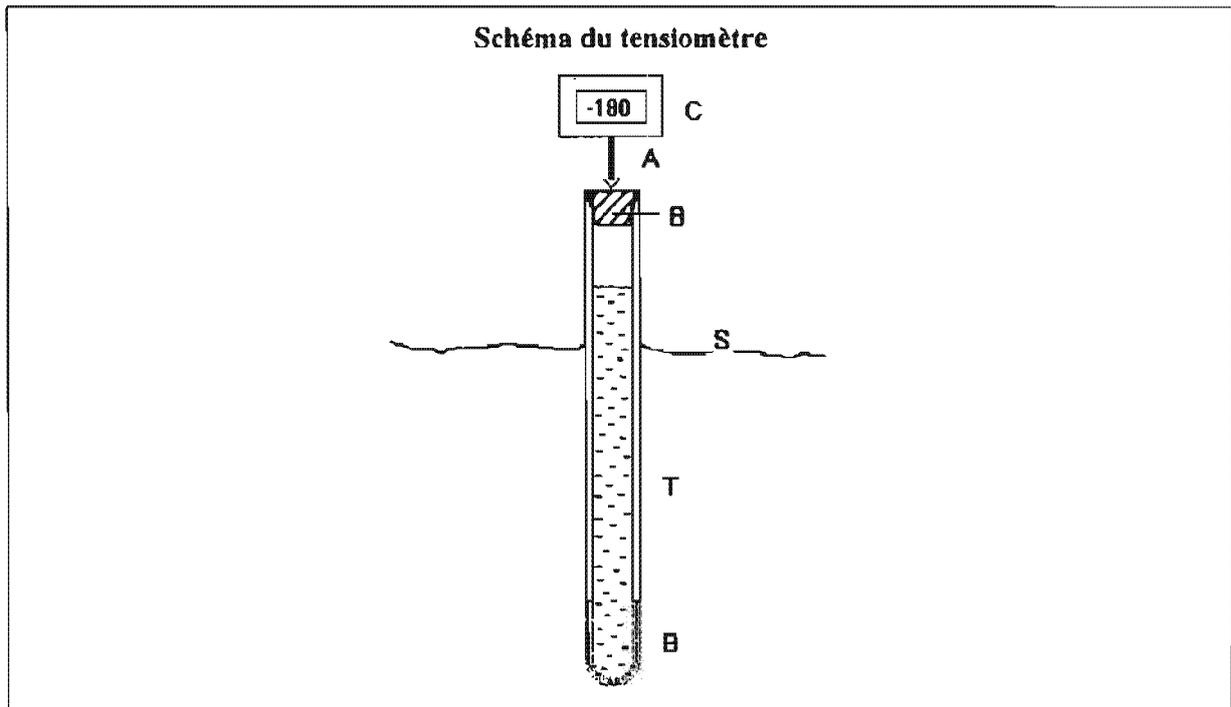
SOURCE	SCE	D.D.L.	CARRÉS MOYENS	F	PROBA(X)
TOTAL	2228.341	17			
REGRESSION	2084.746	1	2084.7461	237.246	0.00
RESIDUELLE	140.598	16	8.7875		

LE TENSIOMETRE A BOUGIE

Le tensiomètre est constitué d'un tube creux de plexiglass T et d'une capsule de céramique poreuse B (bougie). L'ensemble est rempli d'eau dégazée et déminéralisée, et peut être relié à un dispositif manométrique C.

Au contact bougie-sol, il s'établit un équilibre entre pression de l'eau du sol, pression de l'eau et de l'air de la canne. La mesure de la pression de l'eau ou de l'air contenus dans la canne permet d'avoir accès à la pression de l'eau du sol (charge hydraulique) à la côte de la bougie.

On peut donc évaluer la succion matricielle en soustrayant à la charge hydraulique la part de charge gravitaire liée à la différence de niveau entre la hauteur d'eau présente dans la canne et la surface du sol S.



La mesure s'effectue par un capteur électronique de dépression portatif (C), relié à une aiguille creuse A qui perce un bouchon de néoprène B.

ETALONNAGES DES TENSIOMETRES

A: CAPTEUR DE PRESSION - Statistique de l'étalonnage

NOMBRE D'OBSERVATIONS : 10

NOMBRE DE VARIABLES : 2

MATRICE DE CORRELATIONS

NO	NOM	MOYENNE	ECART-TYPE ECHANTILLONNAGE	MATRICE DE CORRELATIONS		
				H	a	Lect
1	B	220.538	182.881	Lect	1.0000	1.0000
VAR. EXPLIQUEE :		Lect	216.000	177.758		

VARIABLE EXPLIQUEE : Lect

VAR. COEFF. DE REGRESSION ECART-TYPE F(1, 9) PROBA(%)

H 0.9766 0.0014 496478.063 0.00

ECART-TYPE RESIDUEL = 1.230

R**2 = 1.0000

R MULTIPLE = 1.0000

TABLEAU D'ANALYSE DE VARIANCE

SOURCE	SC	D.D.L.	CARRES MOYENS	F	PROBA(%)
TOTALE	750940.000	10			
REGRESSION	750926.375	1	750926.3750	496478.031	0.00
RESIDUELLE	13.613	9	1.5125		

B: CELLULE DITE "WATERMARK" - Statistique de l'étalonnage

NOMBRE D'OBSERVATIONS : 61

NOMBRE DE VARIABLES : 2

MATRICE DE CORRELATIONS

NO	NOM	MOYENNE	ECART-TYPE ECHANTILLONNAGE	MATRICE DE CORRELATIONS		
				DTE	W3	W2
1	DTE	-305.445	235.005	DTE	1.0000	
VAR. EXPLIQUEE :		W3	-233.770	W2	0.9791	1.0000

VARIABLE EXPLIQUEE : W3

VAR. COEFF. DE REGRESSION ECART-TYPE F(1, 59) PROBA(%)

DTE 0.7943 0.0212 1360.807 0.00

TERME CONSTANT : 5.7977

ECART-TYPE RESIDUEL = 09.591

R**2 = 0.9587

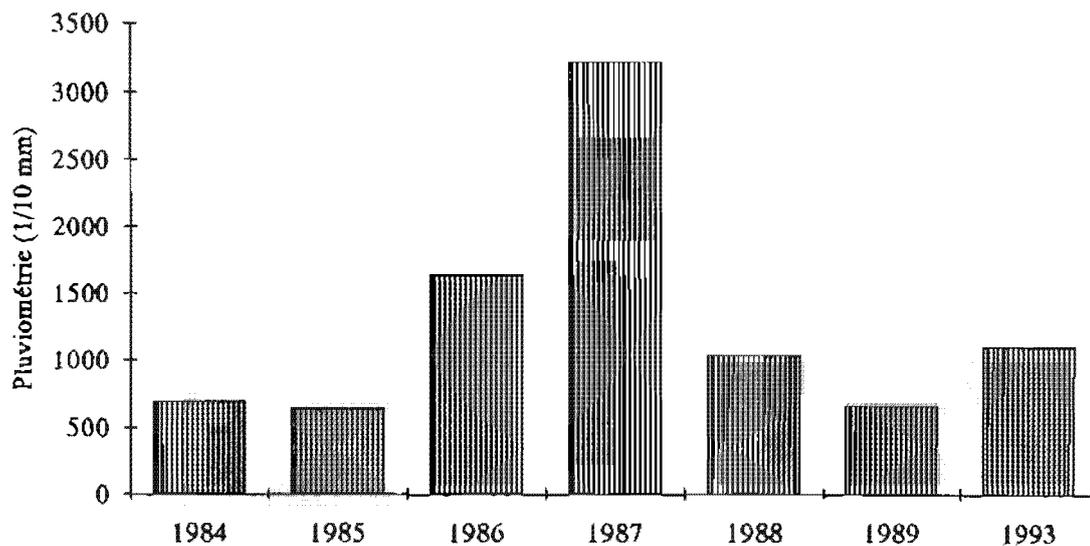
R MULTIPLE = 0.9791

TABLEAU D'ANALYSE DE VARIANCE

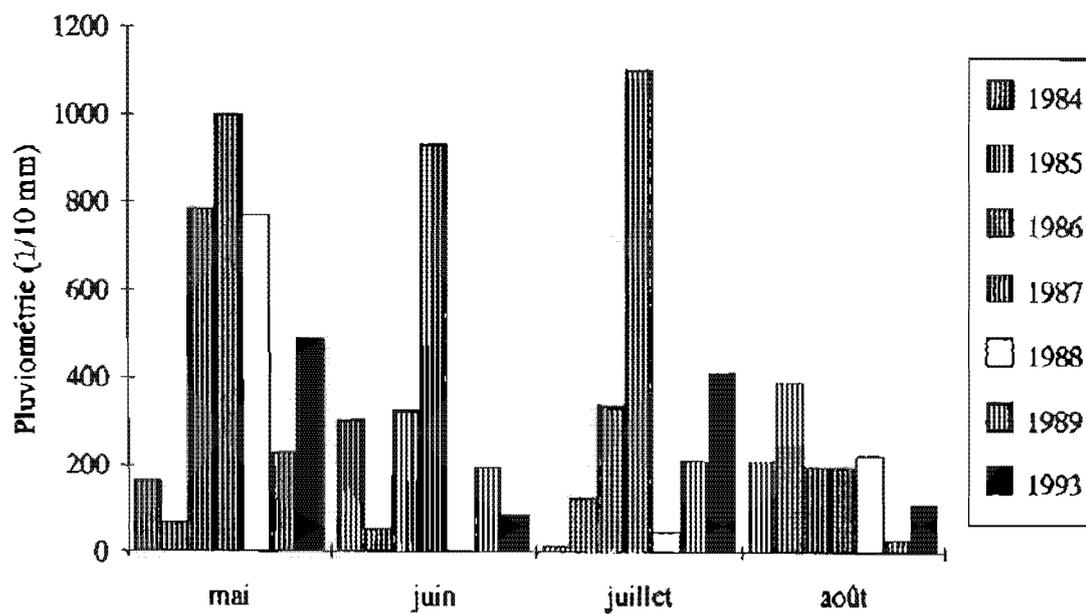
SOURCE	SC	D.D.L.	CARRES MOYENS	F	PROBA(%)
TOTALE	228151.750	60			
REGRESSION	228140.105	1	228140.1050	1360.807	0.00
RESIDUELLE	9764.579	59	165.501		

PLUVIOMETRIES COMPAREES

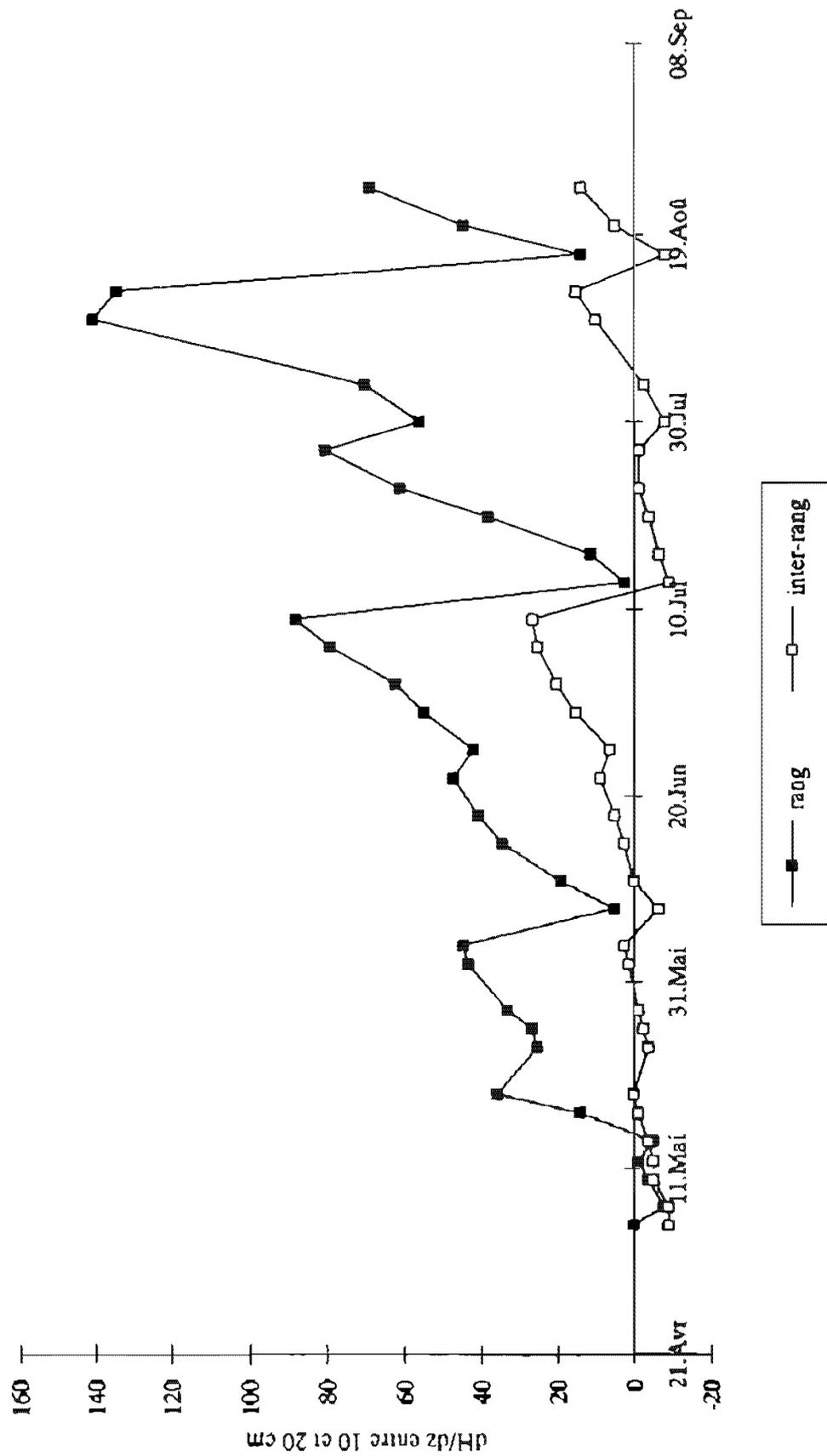
Total sur quatre mois (mai à août)



Total par mois



GRADIENTS DE CHARGE HYDRAULIQUE DANS LES HORIZONS SUPERFICIELS SOUS LOTIER



Culture précédente en saison chaude	Fumure organique	Densité à la récolte* (10 ³ /ha)			Nombre de gousses par pied			Nombre de grains par gousse			Poids moyen d'un grain en g (à 83 % MS)		
		Sol no	Kikuyu	Lotier	Sol no	Kikuyu	Lotier	Sol no	Kikuyu	Lotier	Sol no	Kikuyu	Lotier
Sans	Avec	101	186	178	5.46	2.21	2.49	3.83	3.78	2.89	0.49	0.39	0.52
	Sans	92	203	185	5.26	2.11	2.29	3.66	2.68	3.12	0.54	0.57	0.50
Tomate	Avec	103	198	191	7.89	3.81	3.38	3.52	3.33	3.16	0.56	0.55	0.54
	Sans	91	197	204	3.15	3.24	3.63	3.35	3.00	3.20	0.60	0.59	0.50
Maïs	Avec	138	127	166	5.20	4.51	3.36	3.85	3.22	3.21	0.53	0.54	0.62
	Sans	83	176	179	6.11	4.03	3.10	3.87	3.13	3.09	0.54	0.56	0.53

* Densité un mois avant récolte

Effets des couvertures, du précédent cultural et d'un apport de matière organique sur les composantes du rendement du haricot (variété Marlat) dans les systèmes vivriers Théo, 1993)

Site: KIKUYU - BAS - RANG				Flux à 85 cm				
DATE	05.Mai	07-Mai-93	10.Mai	12.Mai	14.Mai	17.Mai	19.Mai	24.Mai
H70	-198	-195	-155	-159	-150	-157	-167	-198
H100	-213	-210	-197	-187	-173	-176	-183	-199
H85	-205	-203	-176	-173	-162	-166	-175	-198
h85	-120	-118	-91	-88	-77	-81	-90	-113
dH/dz	-0.48	-0.50	-1.39	-0.91	-0.77	-0.65	-0.53	-0.02
K(h85)	3.15E-14	7.01E-14	1.38E-10	3.30E-10	8.22E-09	2.06E-09	1.86E-10	2.27E-13
Q(mm/j)	3.64E-13	8.41E-13	4.60E-09	7.21E-09	1.53E-07	3.23E-08	2.38E-09	1.20E-13
Site: KIKUYU - BAS - INTER - RANG				Flux à 85 cm				
DATE	05.Mai	07-Mai-93	10.Mai	12.Mai	14.Mai	17.Mai	19.Mai	24.Mai
H70	-202	-202	-148	-153	-141	-154	-169	-186
H100	-220	-215	-199	-187	-173	-173	-178	-198
H85	-211	-208	-174	-170	-157	-164	-174	-192
h85	-126	-123	-89	-85	-72	-79	-89	-107
dH/dz	-0.62	-0.41	-1.68	-1.15	-1.06	-0.64	-0.29	-0.40
K(h85)	6.38E-15	1.32E-14	2.69E-10	8.05E-10	2.87E-08	4.63E-09	2.50E-10	1.31E-12
Q(mm/j)	9.46E-14	1.31E-13	1.08E-08	2.21E-08	7.31E-07	7.07E-08	1.77E-09	1.25E-11

Site: LOTIER - INTER - RANG				Flux à 85 cm				
DATE	05.Mai	07-Mai-93	10.Mai	12.Mai	14.Mai	17.Mai	19.Mai	24.Mai
H70	-211	-213	-149	-161	-139	-169	-168	-190
H100	-236	-238	-212	-201	-182	-187	-195	-214
H85	-224	-226	-181	-181	-160	-173	-182	-202
h85	-139	-141	-96	-96	-75	-88	-97	-117
dH/dz	-0.84	-0.82	-2.07	-1.34	-1.44	-0.93	-0.89	-0.79
K(h85)	1.76E-16	9.15E-17	3.71E-11	2.98E-11	1.18E-08	3.08E-10	2.58E-11	7.55E-14
Q(mm/j)	3.56E-15	1.81E-15	1.84E-09	9.57E-10	4.08E-07	6.85E-09	5.52E-10	1.43E-12

Site: LOTIER - RANG				Flux à 85 cm				
DATE	05.Mai	07-Mai-93	10.Mai	12.Mai	14.Mai	17.Mai	19.Mai	24.Mai
H70	-222	-236	-179	-176	-152	-170	-182	-207
H100	-244	-244	-229	-212	-187	-186	-198	-214
H85	-233	-240	-204	-194	-169	-178	-190	-211
h85	-148	-155	-119	-109	-84	-93	-105	-126
dH/dz	-0.75	-0.26	-1.66	-1.18	-1.20	-0.55	-0.53	-0.23
K(h85)	1.19E-17	1.66E-18	4.55E-14	8.43E-13	8.61E-10	7.21E-11	2.34E-12	6.85E-15
Q(mm/j)	2.16E-16	1.04E-17	1.81E-12	2.39E-11	2.48E-08	9.53E-10	3.00E-11	3.72E-14

ESSAI DE QUANTIFICATION DES FLUX PAR LA LOI DE DARCY

Statistique de régression de la relation K(h)

CARACTERISTIQUES DES ESTIMATIONS FOURNIES PAR LE MODELE

OBSERVATION	X	Y OBSERVE	Y ESTIME	RESIDUS	INTERVALLE DE CONFIANCE DE Y (95%)	
005	100.0000	4.5103	4.4336	0.0767	1.2415	1.6227
004	50.0000	4.0726	4.4773	-0.4047	4.1238	4.8263
003	20.0000	10.7399	10.5137	0.2262	10.1284	10.9113
002	10.0000	18.7427	18.5313	0.2114	18.2523	18.9229
001	0.0000	24.5770	24.7132	-0.1362	24.1284	25.2321

Exemple de résultats

Site: SOL NU - HAUT - RANG					Flux à 85 cm			
DATE	05.Mai	07.Mai-93	10.Mai	12.Mai	14.Mai	17.Mai	19.Mai	24.Mai
H70	-226	-240	-167	-183	-151	-173	-189	-210
H100	-244	-245	-225	-218	-196	-193	-204	-225
H85	-235	-242	-196	-200	-173	-183	-197	-218
h85	-150	-157	-111	-115	-88	-98	-112	-133
dH/dz	-0.58	-0.17	-1.91	-1.16	-1.49	-0.65	-0.50	-0.49
K(h85)	6.71E-18	8.70E-19	4.39E-13	1.37E-13	2.90E-10	1.95E-11	3.45E-13	9.38E-16
Q(mm/j)	9.39E-17	3.63E-18	2.02E-11	3.82E-12	1.03E-08	3.05E-10	4.17E-12	1.10E-14
Site: SOL NU - HAUT - INTER - RANG					Flux à 85 cm			
DATE	05.Mai	07.Mai-93	10.Mai	12.Mai	14.Mai	17.Mai	19.Mai	24.Mai
H70	-216	-229	-168	-179	-150	-168	-179	-213
H100	-240	-243	-223	-214	-187	-188	-203	-223
H85	-228	-236	-196	-197	-168	-178	-191	-218
h85	-143	-151	-111	-112	-83	-93	-106	-133
dH/dz	-0.79	-0.47	-1.85	-1.17	-1.23	-0.67	-0.79	-0.33
K(h85)	5.16E-17	5.38E-18	5.07E-13	3.80E-13	1.16E-09	6.73E-11	1.89E-12	7.73E-16
Q(mm/j)	9.76E-16	6.01E-17	2.25E-11	1.06E-11	3.42E-08	1.08E-09	3.58E-11	6.10E-15