Modélisation de l'absorption hydrique racinaire pour des cultures associées

Alain Mollier

▶ **To cite this version:**

Alain Mollier. Modélisation de l'absorption hydrique racinaire pour des cultures associées. Sciences du Vivant [q-bio]. 1995. hal-02851281

HAL Id: hal-02851281
https://hal.inrae.fr/hal-02851281

Submitted on 7 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

TH - HC39

UNIVERSITE PARIS XI

CNRS. Laboratoire d'Ecologie Végétale

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Unité de Science du Sol
d'Avignon.

Unité d'Agropédoclimatologie
de la Zone Caraïbe

INRA
STATION DE SCIENCE DU SOL
19 SEP. 1995
Domaine Saint Paul - Site Agroparc
84914 AVIGNON CEDEX 9

MEMOIRE

pour l'obtention du

DIPLOME D'ETUDES APPROFONDIES

Spécialisation : ***Ecologie Générale et Production Végétale***

MODELISATION DE L'ABSORPTION HYDRIQUE RACINAIRE POUR DES CULTURES ASSOCIEES

Présenté par **Alain MOLLIER**

Maîtres de stage :
M. Laurent BRUCKLER
M. François LAFOLIE
M. Harry OZIER-LAFONTAINE

Enseignants responsables :
M. B. SAUGIER
M. R. BARBAULT

Soutenu le 7 septembre 1995.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier MM Laurent BRUCKLER et François LAFOLIE pour m'avoir permis de réaliser ce stage dans de très bonnes conditions. Je leur dois beaucoup pour mon initiation à la recherche. Leur esprit pédagogique et leur remise en question continuelle par un suivi étroit de mon travail, m'ont apporté une motivation permanente. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma reconnaissance et de mon amitié.

L'essentiel de l'expérimentation de terrain a été réalisée au sein de la station Agropédoclimatique du centre INRA de la Zone Caraïbe. Je dois une sincère reconnaissance à M Harry OZIER-LAFONTAINE qui est toujours resté disponible pour répondre à mes questions malgré la distance et ses nombreuses occupations.

Je remercie également Claude DOUSSAN pour ses conseils et ses nombreuses informations sur les avancées récentes de la modélisation de l'absorption racinaire.

Le bon déroulement des manipulations de laboratoire et l'analyse des résultats ont été possibles grâce à Michel BOURLET, Dalila MOHRATH, Patrick BERTUZZI et Jean Claude GAUDU. Le dynamisme et les compétences de cette équipe ont largement contribué à l'aboutissement de mon travail.

Je voudrais également remercier sincèrement toute l'équipe de l'unité de Science du Sol, ainsi que l'ensemble des collègues en thèse ou en stage qui ont assuré une ambiance très agréable.

Mes remerciements s'adressent aussi à Michèle MAXMILIEN et Georgette PUECHLONG du service de documentation qui m'ont toujours fourni les documents désirés en des temps record.

Grosses bises à Véronique et merci pour son soutien de tous les instants.

Merci à tous !

1. INTRODUCTION 1

1.1. Position du problème 1

1.2. Les objectifs et les moyens 2

2. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE DES MODELES D'ABSORPTION DE L'EAU PAR LES RACINES 2

2.1. Généralités 2
2.1.1. La demande climatique 2
2.1.2. L'offre du milieu 3
2.1.3. Les racines en tant que capteurs 3

2.2. Le cas des cultures associées 11
2.2.1. Définitions 11
2.2.2. Pourquoi des cultures associées ? 11
2.2.3. Synthèse bibliographique des modèles d'absorption hydrique par les cultures associées 12

3. DESCRIPTION DU MODELE DE TRANSFERT D'EAU SOL - RACINES UTILISE DANS LE CAS DE CULTURES ASSOCIEES 13

3.1. Principe 13

3.2. Rappel des principales hypothèses 14

3.3. Les variables et les paramètres d'entrée du modèle 15

3.4. Contenu des fichiers de sortie du modèle 15

4. MATERIEL ET METHODES 15

4.1. Acquisition des variables et des paramètres d'entrée du modèle 15
4.1.1. Analyse du sol 16
4.1.2. La conductivité hydraulique à saturation 17
4.1.3. La courbe de rétention $\psi(\theta)$ 17
4.1.4. La relation conductivité hydraulique - potentiel matriciel K(h) 18

4.2. Acquisition des données de terrain pour le fonctionnement du modèle et la confrontation avec le modèle 20
4.2.1. Choix de l'association 20
4.2.2. Suivi de la culture 21

5. RESULTATS ET DISCUSSION 22

5.1. La comparaison modèle / expérience 22
5.1.1. La simulation et ses prévisions 22
5.1.2. La comparaison des prévisions du modèle à l'expérience 23

5.2. Les scénarios de simulation 27
5.2.1. Position du problème 27
5.2.2. Résultats et discussion 28

6. CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES 31

1. Introduction

1.1. Position du problème

Deux grands types de systèmes de cultures se sont développés dans le monde agricole:

- les *monocultures* basées sur l'utilisation d'une seule espèce, ou d'une seule variété, voire même aujourd'hui d'un seul hybride afin de simplifier les techniques de conduite de cette culture.
- les *cultures associées* qui se réfèrent à des techniques plus complexes qui visent à associer sur une même parcelle, et sur une même période plusieurs espèces. Les cultures associées auraient l'avantage de réduire les dommages causés par les maladies et les ravageurs (Browning et Frey, 1969), et d'autre part, d'exploiter plus efficacement les ressources du milieu par rapport aux cultures pures (Trenbath, 1974; Willey, 1979 ;Haynes, 1980; Wallace, 1990).

Bien que les systèmes de cultures associées aient été les premiers types de culture (Francis, 1986), l'étude de leur fonctionnement reste encore peu développée comparativement aux monocultures, alors que des problèmes de compétition interspécifiques s'y développent.

La compétition à l'échelle d'un peuplement végétal peut se définir comme l'ensemble des processus d'interaction entre les plantes qui limitent la capacité de chacune d'elle à utiliser les ressources du milieu, comparativement à des situations où elles en seraient les seules bénéficiaires.

La maîtrise des besoins en eau des cultures associées nécessite la connaissance d'une part des processus de transfert dans le continuum sol-plante-atmosphère et d'autre part de la compétition au niveau aérien et souterrain pour les ressources en eau et en éléments minéraux. Les études sur le système racinaire des plantes sont moins développées que celle sur le système aérien, notamment celles qui concernent les plantes cultivées au champ (Greenwood *et al*, 1982). Ceci est peut-être dû aux difficultés théoriques et expérimentales (observation et quantification destructives des systèmes racinaires, difficulté de la résolution des équations différentielles non linéaires décrivant le transport de l'eau dans le sol avec des fonctions puits réparties spatialement, séparation entre transpiration et évaporation directe du sol, *etc.*)

Une enquête sur les articles publiés dans *Experimental Agriculture* ces trois dernières années (1992 à 1994) montre que 10% des articles sont consacrés aux cultures associées et pas un seul sur les interactions souterraines. Dans *Agroforestery Systems* il y a 8% des articles qui traitent des interactions souterraines dans des situations de cultures associées (Ong, 1995).

A l'échelle des systèmes racinaires les conditions qui vont jouer sur la compétitivité de chaque système en conditions limitantes en eau vont dépendre :

- de la disponibilité et de la mobilité de l'eau du sol (conductivité hydraulique en milieu non saturé et courbe de rétention)
- de la répartition de la demande climatique (ETM) affectée à chaque espèce
- des aptitudes physiologiques et des "stratégies morphogénétiques" mises en oeuvre au niveau des espèces (distribution spatiale des racines).

1.2. Les objectifs et les moyens

L'étude des mécanismes impliqués dans la compétition pour le prélèvement d'eau devrait aboutir à une meilleure connaissance théorique des interactions entre les plantes et à un suivi hydrique plus rigoureux des cultures associées.

La présente étude portera sur l'absorption hydrique par les cultures associées, où des phénomènes de compétition inter-spécifiques vont apparaître. Il s'agira ici de tester un modèle de prélèvement hydrique racinaire dans une situation de culture associée. Les prévisions du modèle seront confrontées aux résultats d'une expérimentation conduite sur une association culturale Maïs-Sorgho pratiquée dans la zone Caraïbe et conduite en 1994.

A partir de ce nouveau modèle, nous testerons l'effet de l'écartement entre les rangs de la culture, et l'effet d'une demande climatique contrastée sur l'évolution temporelle de l'état hydrique des plantes de l'association. De telles simulations pourraient servir d'outil d'aide à la décision pour la conduite d'itinéraires techniques si les prévisions du modèle restituent assez bien les mesures de terrain.

2. Synthèse bibliographique des modèles d'absorption de l'eau par les racines

2.1. Généralités

L'eau se déplace spontanément d'un point où l'énergie potentielle est plus élevée vers un point où elle est la plus basse (Hillel, 1974). Elle se déplace donc continuellement dans la direction des énergies décroissantes afin que le système atteigne un état d'équilibre (état où l'énergie potentielle est uniforme dans tout le système). Le potentiel hydrique d'un système est égal, mais de signe opposé au travail qu'il faut fournir pour extraire une quantité infinitésimale de l'eau du système et la ramener à l'état de l'eau libre. Ce concept est issu des deux premières lois de la thermodynamique.

2.1.1. La demande climatique

Dans le continuum sol-plante-atmosphère (CSPA), les surfaces soumises à l'évaporation et à la transpiration vont perdre de l'eau et par conséquent leur potentiel hydrique va s'abaisser. Un gradient de potentiel s'établit le long du CSPA et est à l'origine des flux d'eau depuis le sol vers la surface foliaire et la surface du sol.

La transpiration est définie par le transfert de l'eau hors des cellules foliaires. Elle s'accompagne d'une vaporisation, et comprend la diffusion de vapeur à travers des structures cellulaires particulières : les stomates. La vapeur diffuse ensuite à travers des couches limites dont les caractéristiques diffèrent de celles de l'atmosphère et dépendent en partie du végétal, notamment de la géométrie des surfaces de transpiration.

Le moteur de ces flux (transpiration et évaporation) dépend des caractéristiques climatiques (rayonnement intercepté, température, déficit de saturation en humidité du milieu et du vent) et des caractéristiques du couvert (LAI leaf aera index ou Indice Foliaire, état physiologique de la feuille, géométrie du couvert et conductance stomatique) qui déterminent une demande climatique maximale ETM.

L'évapotranspiration maximale (ETM) d'un couvert végétal est la valeur de l'évapotranspiration, quand les conditions d'alimentation hydrique sont optimales, c'est-à-dire quand l'humidité du sol correspond à un potentiel matriciel quasiment nul dans la zone racinaire et

qu'il n'y a pas d'anoxie. Dans ces conditions la résistance stomatique est minimale et la résistance de l'espace poreux de la plante intervient. L'évapotranspiration maximale peut être reliée à l'évaporation potentielle par des coefficients culturaux empiriques (Parcevaux *et al.*, 1990).

L'absorption hydrique définie par le passage de l'eau dans la racine depuis la surface racinaire, est considérée actuellement comme un phénomène passif (Weatherley, 1975; Touraine et Grignon, 1981; Passouria, 1988) ayant pour origine le gradient de potentiel hydrique entre le sol et le xylème. Les transferts d'eau dans la plante basés sur l'analogie électrique offrent l'intérêt majeur de permettre d'utiliser un même formalisme, reposant sur les mêmes relations phénoménologiques, pour exprimer la continuité du processus physique dans le système sol-plante-atmosphère (Molz, 1981).

2.1.2. L'offre du milieu

La satisfaction de la demande évaporative par les plantes va dépendre de la disponibilité de l'eau du sol pour les plantes c'est-à-dire de l'intensité des forces retenant l'eau dans le sol, mais aussi de la vitesse avec laquelle cette eau est extraite du sol par les plantes (Passouria, 1982). Certains auteurs (Gardner, 1960; Greacen, 1976) pensent que la limite d'absorption d'eau par les racines est atteinte lorsque le sol est encore humide. Les concepts statiques de capacité au champ et de point de flétrissement permanent n'ont pas de réel sens physique car ils sont basés sur l'hypothèse que les processus dans le sol sont statiques (Hillel, 1975). D'autres (Newman, 1969; Hansen, 1974; Taylor et Klepper, 1975) proposent au contraire qu'il faut atteindre un dessèchement important (-150 m), pour que les flux d'eau en provenance du sol soient limitants.

2.1.3. Les racines en tant que capteurs

L'architecture racinaire

La distribution spatiale des racines va conditionner le niveau d'absorption des ressources en eau et en éléments minéraux du sol, et ceci d'autant plus que leur mobilité sera faible (Taylor & Klepper, 1978). Pour décrire la morphologie du système racinaire, nous pouvons distinguer deux approches : d'une part l'analyse de la variation des densités racinaires dans le sol, d'autre part des études de la structure du système racinaire. La première approche aboutit à la réalisation de profils racinaires ou de cartes bi-dimensionnelles parfois mises en relation avec des caractéristiques du sol (Tardieu & Manichon, 1986). Cette description, souvent liée à des méthodes destructives d'observation, rend compte à un moment donné de l'état de l'enracinement.

La deuxième approche basée sur l'étude de la structure du système racinaire prend en compte les liaisons entre les racines : le système racinaire n'est plus envisagé comme un "nuage de densité", mais comme un arbre (Pagès & Ariès, 1988). Cette étude introduit une dimension morphogénétique dans la description. Le modèle SARAH de simulation de la croissance, du développement et de l'architecture des systèmes racinaires élaboré par Pagès et Ariès (1988) s'appuie sur des connaissances biologiques sur la morphogenèse des systèmes racinaires.

Les facteurs qui agissent sur la croissance et la répartition des racines dans le profil sont nombreux et interagissent :

Les facteurs liés à la plante concernent la répartition des assimilats de la photosynthèse foliaire entre les parties aériennes et souterraines. Un coefficient de répartition entre ces deux compartiments variable suivant les plantes considérées a été proposé (Baret *et al.*, 1992; Klepper, 1990). Ce coefficient est fonction du stade de développement de la plante évalué par le PARc, Rayonnement Photosynthétiquement Actif cumulé (Vincent et Gregory, 1989). Certains facteurs environnementaux peuvent aussi influencer cette répartition. Par exemple un stress hydrique peut favoriser l'allocation de biomasse aux racines (Fernandez & Mc Cree, 1989).

Les facteurs liés au sol : l'impédance (ou résistance) mécanique opposée aux racines agit sur la croissance racinaire. Généralement les racines qui rencontrent une résistance mécanique ont tendance à s'allonger moins vite (Tardieu, 1994). L'équation de Lockhart (1965) modifiée par un terme relatif à l'impédance permet de prévoir l'expansion des cellules de la zone d'élongation racinaire :

Le taux d'allongement racinaire au cours du temps :

$$\frac{dl}{ldt} = \Phi(P - (Y + \sigma))$$

Φ l'extensibilité des parois cellulaires, P la pression cellulaire de turgescence, Y le seuil de turgescence au dessus duquel il y a allongement irréversible des parois cellulaires par rupture de liaisons entre la cellulose et l'hémicellulose (Tardieu, 1994), σ terme relatif à l'impédance.

Les caractéristiques du sol qui vont déterminer l'impédance mécanique sont :

La texture : des différences de texture du sol induisent des différences de pénétrabilité racinaire. Par exemple l'enracinement du Soja peut être réduit de moitié dans des limons par rapport à des argiles pour des conditions hydriques similaires (Maertens, 1986).

La densité apparente et la teneur en eau : Klepper (1990) estime qu'à une humidité donnée, la densité apparente indique la pénétrabilité des racines dans le sol de façon significative. Pour Eavis (1972) la densité apparente et la teneur en eau sont les deux facteurs essentiels de la pénétrabilité du sol. Mais ces relations établies par des mesures pénétrométriques ne sont pas toujours révélatrices de la pénétrabilité du sol par les racines. En effet Klepper (1990) et Tardieu (1994), considèrent que les mesures du pénétromètre surestiment souvent la force nécessaire aux racines pour rentrer dans le sol (pas de flexibilité, pas de mucilage, pas de détours possibles).

La fissuration des sol à la suite d'un dessèchement peut devenir propice à la croissance racinaire (Tardieu, 1994).

L'aération du sol caractérisée par la proportion d'air dans le volume poral du sol va contribuer à la respiration des racines (Klepper, 1990). Ce facteur est étroitement dépendant de la teneur en eau du sol (Hillel, 1974).

La température du sol : selon Klepper (1990) certains traits morphologiques sont liés à la température : diamètre, longueur et angle de croissance des racines secondaires par rapport à la racine verticale. La température du sol affecterait en effet le métabolisme.

La chimie du sol : bien que souvent pas prise en compte dans les modèles de croissance et de développement racinaire, certains éléments du sol influent sur ces processus. Klepper (1990) montre qu'après application d'engrais contenant NO_3^- sur le blé, la ramification et l'élongation sont augmentées; la présence de calcium est essentielle pour la croissance des radicelles; la raréfaction du phosphore renforce l'abondance de poils absorbants.

Après avoir présenté comment se répartissaient les puits racinaires dans le sol, nous allons faire dans le paragraphe suivant une revue bibliographique des modèles d'absorption racinaire existants.

Les modèles d'absorption hydrique :

- Analogie avec la loi d'Ohm

L'absorption de l'eau par le système racinaire peut être décrite en termes de flux, de résistances et de chutes de potentiel. Sur des pas de temps relativement longs (24 heures), la quantité d'eau transpirée correspond généralement à la quantité d'eau absorbée. Dans ces conditions, le flux d'eau à travers la plante est conservatif (absorption = transpiration).

Les mouvements d'eau peuvent être décrits par analogie avec la loi d'Ohm : Différence de potentiel hydrique divisée par une résistance (Van Den Honert, 1948) :

$$\text{Flux} = \Delta\psi / R$$

$\Delta\psi$ (m) est la chute de potentiel entre deux points considérés et R la résistance ($m.s.m^{-1}$) correspondante.

De façon synthétique pour le continuum sol-plante-atmosphère, nous pouvons écrire:

$$Absorption = \frac{\Psi_s - \Psi_r}{R_{sr}} = \frac{\Psi_r - \Psi_f}{R_p} = \frac{\Psi_f - \Psi_a}{R_s + R_a} = Transpiration$$

ψ_s, ψ_r, ψ_f, et ψ_a étant respectivement les potentiels hydriques (m) dans la zone racinaire, à la surface des racines, des feuilles, et de l'air; Rsr, Rp, Rs et Ra ($m.s.m^{-1}$) les résistances du passage sol - racines, de la plante, stomatique, et de la couche aérodynamique (fig 1).

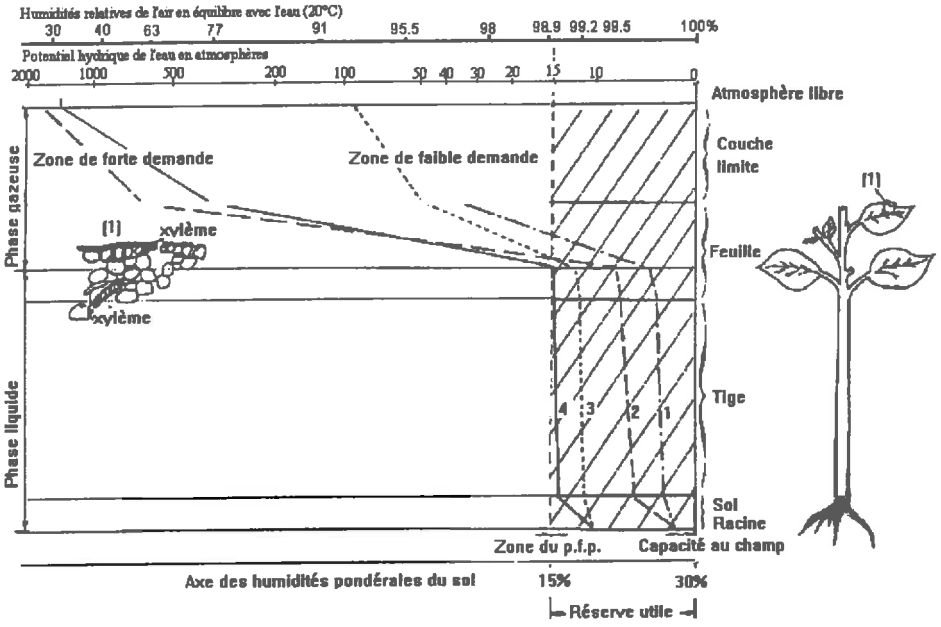


Figure 1 Schéma donnant les valeurs du potentiel hydrique dans les différentes parties du système CSPA, ainsi que la correspondance approximative entre ces valeurs et les humidités relatives :
Courbe 1, sol humide, faible évaporation
Courbe 2, sol humide, forte évaporation
Courbe 3, sol sec, faible évaporation
Courbe 4, sol sec, forte évaporation (Katerji et Cruiziat, 1985).

Dans ce système, la plante peut être réduite à un ensemble de résistances en série. Deux axes deux recherches se sont développés :

- le premier orienté vers la localisation et l'analyse des différentes résistances rencontrées, notamment Rsr et Rp.

- le second orienté vers l'étude du transfert hydrique à l'échelle de la plante entière :

$$\text{Transpiration} = \frac{\Psi_s - \Psi_f}{R_{sp}}$$

Les résistances hydrauliques :

L'ensemble des résistances sur le CSPA peut se décomposer en la résistance du sol, la résistance de l'interface sol-racine, la résistance radiale d'absorption de la racine, la résistance de conduction xylèmique et la résistance stomatique.

La résistance la plus grande sur le CSPA est souvent Rsr (Hillel, 1974). Elle est étroitement dépendante de la distribution spatiale des racines. Une hypothèse souvent rencontrée dans les modèles d'absorption racinaire est la répartition homogène des racines dans le sol. Dans de telles conditions, ces modèles se réfèrent à une densité racinaire exprimée en longueur, en volume, ou en masse de racine par Unité de volume de sol. Ainsi Gardner (1960) propose pour le taux d'extraction racinaire spécifique (m^3/m de racine / jour) :

$$Q = K(\psi_s - \psi_r) / (8.07 - \ln(L_v))$$

K la conductivité du sol ($m.s^{-1}$), ψs le potentiel matriciel du sol (m), ψr le potentiel hydrique à la surface des racines (m) et L_v la densité de longueur de racine (m / m^3 de sol). Une augmentation de la densité des racines dans un horizon donné aura pour effet d'améliorer l'extraction dans ce niveau. Une extension du système racinaire en profondeur et/ou en largeur devrait aboutir à mettre à la disposition de la plante un volume de sol et d'eau de plus en plus grand.

En phase de dessiccation, la qualité des contacts entre le sol et les racines diminue, entraînant une forte augmentation de la résistance sol - racines Rsr (Katerji et Cruziat 1985).

La résistance la plus importante dans la plante se situe dans la zone entre les racines et le collet. Il existe également une résistance importante au niveau de la zone de transition entre la feuille et l'atmosphère où l'eau passant de l'état liquide à l'état vapeur est évacuée par un lent processus de diffusion (fig. 2 et tableau I).

Tableau I Résistance relative (en %) dans les différents organes de la plante (Black, 1974)

Espèces	Racines	Tige	Pétiole	Feuille	Source
Tournesol	50.2	12.4	9.7	27.7	Black, 1974
"	51.1	24.5		24.5	Boyer, 1971
"	54.6	22.7		22.7	Jensen *et al.*, 1961
"	72.0	8.0		20.0	Neumann *et al.*, 1974 *
Maïs	50-70	15-25		15-30	Neumann *et al.*, 1974 *
Soja	75.8	6.2		18.1	Boyer, 1971
Tomate	57.0	24.0		18.0	Jensen *et al.* 1961

(*) Pétiole inclus dans les feuilles.

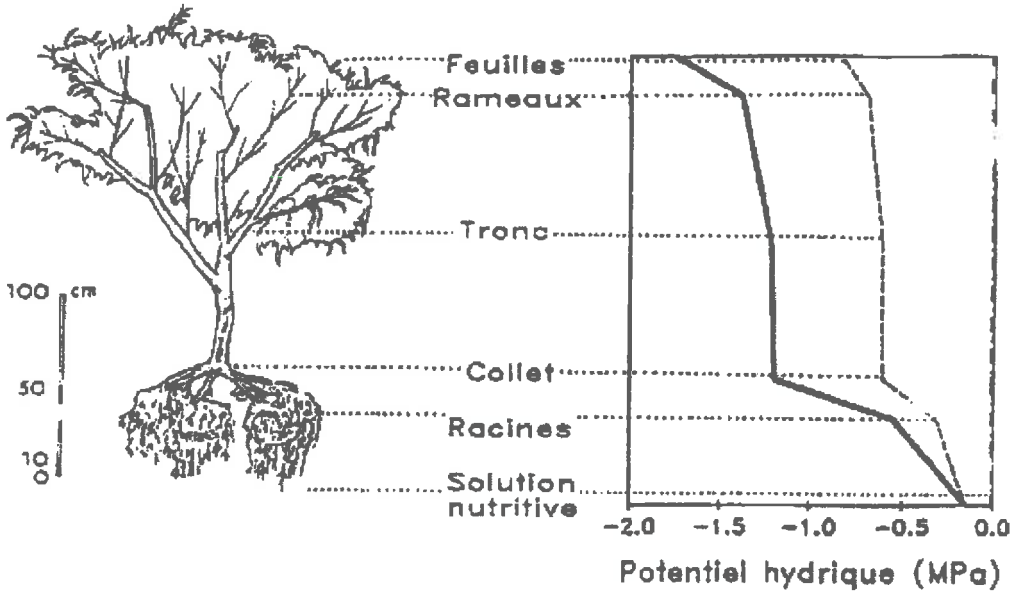


Figure 2 Gradients de potentiels hydriques résultant des résistances hydrauliques moyennes estimées chez des pêcher de 3 et 4 ans placés en solution nutritive (Simonneau, 1992).

L'importance de chacune des résistances sera variable selon l'échelle de l'étude. Ainsi pour avoir un aperçu de l'ensemble des modèles d'extraction racinaire, nous allons considérer différentes échelles de temps et d'espace.

- Les modèles microscopiques d'extraction de l'eau par le système racinaire

Gardner a été le premier en 1960 à proposer un modèle d'extraction d'eau par le système racinaire. Les transferts d'eau vers les racines sont modélisés de la façon suivante :

Chaque racine est assimilée à un cylindre de rayon constant, de longueur infinie et de capacité d'absorption uniforme le long de chacune d'elles. Les flux sont considérés comme étant radiaux. En deux dimensions nous pouvons écrire :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(rD\frac{\partial \theta}{\partial r}\right)$$

θ est la teneur en eau volumique, D la diffusivité, t le temps et r la distance radiale entre le sol et l'axe de la racine.

Par résolution en condition de flux permanent :

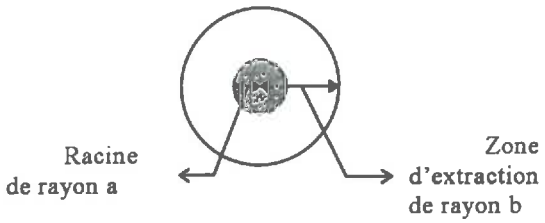
$$\psi - \psi_0 = \Delta\psi = \frac{q}{4\pi K}\left(\ln\frac{4Dt}{r^2} - \gamma\right)$$

q = flux à la surface de la racine ($m.s^{-1}$), r = rayon de la racine (m), $\gamma = 0.57722$ constante d'Euler. $\Delta\psi$ le gradient de potentiel matriciel ($m.s^{-1}$) entre la zone de contact racine - sol et différents points du sol.

Cette formule est analogue à celle de la diffusion entre deux cylindres creux, à la constante d'Euler près (Taylor et Keppler, 1975) :

$$\psi - \psi_0 = \Delta\psi = \frac{q}{4\pi K} \ln\left(\frac{b^2}{a^2}\right)$$

$b = 2\sqrt{Dt}$



Le rayon maximal du cylindre extérieur est limité par la densité racinaire. Il peut être considéré comme étant égal à la moitié de la distance moyenne entre deux racines voisines. Le terme b recouvre donc une notion de densité racinaire. Ce modèle fait ressortir que la différence de potentiel hydrique entre la racine et le sol est directement proportionnelle au régime d'extraction et inversement proportionnelle à la conductivité hydraulique K. Ce modèle a été repris et amélioré par exemple en considérant la diffusivité comme une variable (Mc Coy *et al.*, 1982).

En fait le modèle proposé ici repose sur les hypothèses que les racines sont distribuées uniformément et que le potentiel hydrique du sol est uniforme dans la zone radiculaire. En réalité, le système racinaire est rarement, voire jamais uniforme en profondeur. Il en est de même pour le sol dont les caractéristiques et les propriétés physiques varient avec la profondeur.

- Les modèles macroscopiques d'extraction d'eau par le système racinaire :

Pour représenter les flux d'eau du sol vers la plante, une autre approche prenant en considération le système racinaire dans son ensemble a été développée. Pour une revue détaillée de ces modèles on se référera à l'article de Molz (1981). Le principe est de répartir la transpiration entre les couches de sol proportionnellement à la fraction du système racinaire présente dans cette couche. L'essentiel des modèles rencontrés dans la littérature combine l'équation de Darcy-Richards (Richards, 1931) qui décrit les transferts hydriques dans le sol en condition non saturée et un terme de prélèvement racinaire $q_{rac.}(z,t)$.

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = \mathrm{div}\left[K_S \,\mathrm{grad}(\psi)\right] - q_{rac.}(z,t)$$

$q_{rac.}(z,t)$ est le volume d'eau extrait par unité de volume de sol à la profondeur z et au temps t.

De nombreux auteurs ont cherché à modéliser ce terme de façon plus ou moins empirique (Van Bavel *et al.*, 1968; Molz *et al.*, 1970; Nimah et Hanks, 1973a et 1973b; Feddes *et al.*, 1976). Tous ces termes sont construits de la même manière. L'absorption d'eau est alors le plus souvent calculée à partir de la différence de potentiel hydrique sol-racine, parfois pondérée par des facteurs correctifs tenant compte de la résistance au transfert d'eau dans le sol et/ou la plante (étroitement dépendante de la teneur en eau), d'une constante estimée, de la densité racinaire. Le sol est discrétisé en couches successives pour rendre compte de l'hétérogénéité du système racinaire. Voici quelques exemples de $q_{rac.}(z,t)$ construits sur des modèles mécanistes :

ψ_{rac}, ψ_s potentiels racinaire et du sol, z profondeur de la couche, K(θ) la conductivité hydraulique :

Auteur(s)	Module de prélèvement racinaire	Paramètres
Gardner (1964)	$q_{rac.}(z,t) = \hat{A}(\psi_{rac} - \psi_s - z)K(\theta)L$	$\hat{A}$ une constante estimée L longueur de racine / unité de volume
Nimah et Hanks (1973a et 1973b)	$q_{rac.}(z,t) = \frac{[\psi_{rac.} - \psi(z,t) - \pi(z,t)].RDF(z).K(\theta)}{\Delta x.\Delta z}$	π potentiel osmotique, RDF fraction de racines actives, Δx distance entre la surface racinaire et le point de mesure de ψ(z,t) et π(z,t).
Feddes *et al.* (1974,1976); Neuman *et al.* (1975)	$q_{rac.}(z,t) = \frac{K(\theta)(\psi_s - \psi_r)}{b(z)}$	b(z) fonction empirique représentant la géométrie du système racinaire.
Hillel *et al.* (1975)	$q_{rac.}(z,t) = \frac{\psi_s - \psi_r}{R_s + R_r}$ avec $R_s = \frac{1}{\hat{A}KL}$	R_s résistance du sol R_r résistance des racines
Raats (1976)	$q_{rac} = T\delta^{-1}\exp\left(\frac{-z}{\delta}\right)$	T taux de transpiration par unité de surface de sol δ paramètre tel que l'intégrale de l'absorption racinaire sur l'ensemble de la zone racinaire soit égale à T Formule empirique
Herkelrath *et al.* (1977b)	$q_{rac} = \frac{\theta}{\theta_{sat}}\rho l(\psi_s - \psi_{rac})$	θ, et θ_{sat} teneur en eau volumiques actuelle et à saturation ρ perméabilité racinaire par unité de longueur de racine l longueur de racine par unité de volume de sol.
Rowse *et al.* (1978)	$q_{rac.}(z,t) = \Delta z \cdot L \cdot \frac{\psi_s - \psi_r}{R_s + R_r}$ $R_s = \frac{1}{4\pi K}\ln\frac{r_s^2}{r_r^2}$	r_r rayon de la racine r_s rayon de la zone d'extraction racinaire Formule semi-empirique.
Van Genuchten & Hoffman (1984)	$q_{rac.} = \frac{q_{rac.max}}{1 + \left(\frac{ah + \pi}{\pi_{50}}\right)^3}$	$a = \frac{\pi_{50}}{h_{50}}$, π_{50} et h_{50} pressions osmotiques et matricielles qui réduisent l'extraction maximale de 50%. Une formule totalement empirique

Très souvent ces modèles nécessitent des calages pour les différents paramètres à partir de mesures de terrain (Molz, 1981). Par conséquent il est assez difficile de tester ces modèles. En effet il est assez difficile d'apprécier la part prise par le calage (avec tous les problèmes de mesure de terrain), dans les prévisions de ces modèles.

Les modèles de Nimah et Hanks et le modèle de Van Genuchten et Hoffman ont été testés (Cardon & Letey, 1992) dans différentes conditions. Le premier modèle est totalement insensible à la salinité et ne montre aucune réduction de la transpiration avec l'augmentation de la salinité de l'eau d'irrigation (dans les mêmes conditions de demande évaporative potentielle). Cette insensibilité à la salinité est due à la façon dont ce terme est incorporé à la fonction d'absorption. L'absorption est une fonction non linéaire de la teneur en eau du sol. Lorsque l'humidité du sol diminue, la conductivité hydraulique et le potentiel diminuent de façon exponentielle. Dans l'étude la salinité décroît linéairement et à donc moins de poids dans le calcul de l'absorption. A l'opposé, le second modèle est sensible à la salinité et montre une réduction de la transpiration avec l'augmentation de la salinité de l'eau. Bien que totalement empirique, ce dernier modèle reproduit mieux les phénomènes mesurés sur une culture de Maïs (Cardon & Letey, 1992).

Une critique majeure que nous pouvons émettre sur ces modèles, est qu'ils ne prennent pas en considération l'hétérogénéité spatiale et temporelle. Dans ces modèles de fonctionnement définis à l'échelle macroscopique certains auteurs emploient globalement le gradient de potentiel entre le sol et le feuillage affectant à la plante entière une résistance hydraulique globale (van Bavel, 1984). Plus souvent c'est le potentiel racinaire qui est retenu (Molz, 1981), mais la mesure de ce dernier est difficile à réaliser (Simonneau et Habib, 1991). L'utilisation d'un indice synthétique de caractérisation des enracinements permet d'apprécier l'hétérogénéité horizontale et verticale de la répartition racinaire (Tardieu, 1987; Tardieu et Manichon, 1986, Tardieu 1988a, 1988b et 1987c). Celle-ci est essentiellement due à l'état structural de la couche cultivée. Cette variabilité induit une hétérogénéité de la disponibilité de l'eau et des éléments minéraux. Suite à ces travaux, une approche nouvelle a conduit à développer des modèles d'extraction hétérogène.

- Les modèles d'extraction hétérogène

Les racines colonisent rarement le sol de façon homogène. Elles se répartissent de manière hétérogène suivant les conditions du milieu et de son environnement. Cette répartition hétérogène intervient sur le prélèvement d'eau par les racines (Tardieu *et al.* 1992). Dans un certain nombre de cas (exemple : forte demande climatique combinée à une faible disponibilité hydrique), on ne peut pas négliger le rôle de la disposition spatiale des racines (Sébillotte, 1988; Tardieu, 1988). Cela impose d'utiliser des modèles sol-plante définis de façon bidimensionnelle (Lafolie *et al.* 1991; Bruckler *et al.* 1991) ou tridimensionnelle (Clausnitzer et Hopmans, 1994) et qui prennent en considération la variabilité spatiale des teneurs en eau du sol et la répartition hétérogène des racines. L'approche tri-dimensionnelle est très complexe (problèmes de maillage, temps de calculs, *etc.*) et n'a pas encore été validée.

Le flux d'absorption total de la plante est calculé non pas à partir d'une teneur en eau moyenne du profil de sol, mais à partir des teneurs en eau locales au voisinage de chaque racine.

L'hypothèse principale souvent utilisée consiste à attribuer à chaque élément d'un système racinaire la même aptitude à absorber l'eau lorsqu'il est placé dans les mêmes conditions environnementales. Cette hypothèse souvent considérée comme simplificatrice est analysée et discutée par Habib *et al.* (1991). Certains auteurs ont étudié les variations des capacités d'absorption des racines en fonction de leur position dans l'architecture du système racinaire (nature séminale ou nodale, ordre, diamètre, âge, *etc.*). Ces études sont motivées par l'espoir de trouver des relations entre les caractéristiques morphologiques et la capacité d'absorption, afin de pouvoir par la suite moduler les propriétés des racines en fonction de leur position architecturale (Grignon et Touraine, 1981; Boyer, 1985; Passouria, 1988). Mais lors de leur étude

bibliographique Tardieu et Manichon (1986) concluent qu'il n'y a pas de critère morphologique pour distinguer des racines selon leur capacité d'absorption hydrique.

Les racines ont toute le même potentiel hydrique $\psi_{rac.}$ à un instant t donné. Cela ne signifie pas que les flux hydriques sont identiques au niveau de chaque racine. En effet, les flux d'absorption seront directement dépendants du gradient de potentiel hydrique entre la racine et le sol. Rappelons qu'ici la distribution de l'eau dans le sol est hétérogène. Il n'y a pas de sortie d'eau depuis les racines vers le sol (Dirksen et Raats, 1985). Le potentiel de la plante reste toujours inférieur à celui du sol, même la nuit (Herkerrath *et al.*, 1977).

Il est possible que le niveau global des flux d'absorption hydrique soit diminué par contrôle hormonal (Passouria, 1988). Une fourniture en continue de cytokinines par les racines est nécessaire pour maintenir l'ouverture stomatique. Cette fourniture est perturbée lorsque les racines sont soumises à un dessèchement du sol (Blackman et Davies, 1985). En même temps la quantité d'acide abscissique produite par ces racines augmente (Zhang et Davies, 1989), et son exportation à partir des racines situées en sol sec peut conduire à la fermeture des stomates (Adeoye et Rawlins, 1981; Zhang *et al.*, 1987; Tardieu *et al.*, 1991; Davies *et al.*, 1991), ou à l'augmentation de la conductance hydraulique dans le reste du système racinaire (Glinka, 1973). Il est alors supposé qu'il existe un potentiel racinaire seuil qui déclenche la fermeture des stomates.

L'ensemble de ces hypothèses montre combien les progrès à apporter aux prévisions des flux d'absorption sont étroitement dépendants de l'approfondissement des connaissances en physiologie de l'absorption et de la modélisation des architectures racinaires.

2.2. Le cas des cultures associées

Les associations d'espèces se rencontrent sur tous les continents (Papendick *et al.*, 1976). Les systèmes de cultures associées occupent de larges espaces dans les régions chaudes, qu'il s'agisse d'agriculture "traditionnelle" au Mexique, en Amérique Centrale, aux Antilles, en Indonésie et dans de nombreuses régions du monde, ou de système "modernes" au Mexique par exemple. En France de tels systèmes existent dans des régions d'agriculture intensive telle que le Roussillon où se développent les associations fruitières - cultures maraîchères (Baldy, 1993).

2.2.1. Définitions

Les cultures associées correspondent à des systèmes dans lesquels deux ou plusieurs plantes sont cultivées *simultanément* (ou de façon au moins partiellement simultanée) sur la *même unité de sol*. L'association peut être constituée d'espèces pérennes ou annuelles ou mixtes.

L'organisation spatiale est dite *intercalaire* lorsque les cultures sont disposées en lignes alternées ou en bandes étroites, et *en mélange* quand les plantations sont faites sans ordre fixe et les espèces sont intimement mêlées (Norman *et al.*, 1984; Altieri 1987).

D'autre part les associations regroupent des espèces avec un développement contrasté ou pas. Le port des espèces peut être identique (Maïs/Sorgho), analogue (Bananier/Cacaoyer), ou différent (arbre/herbe).

2.2.2. Pourquoi des cultures associées ?

Les raisons pour lesquelles les cultures associées sont pratiquées dans les tropiques sont complexes et variées. L'association de différentes espèces végétales sur un même espace de façon plus ou moins régulière répond à une volonté d'exploitation intensive des ressources environnementales telles que la lumière, l'eau et les éléments minéraux du sol.

Souvent les agriculteurs de cette zone optent pour ce type de culture afin de se prémunir contre le risque de perdre une culture complète, ou pour assurer à terme des rendements plus stables dans des environnements variables (Willey, 1985). Les cultures associées représentent la

meilleure réponse aux aléas climatiques et permettent une meilleure utilisation de l'espace cultivable grâce à la diversité des réactions de chaque composante (Azam-Ali, 1995). Face aux irrégularités du climat, un étalement dans le temps des phases sensibles des cultures donne généralement la meilleure assurance d'avoir toujours une récolte. Souvent la variabilité du rendement est également réduite lorsque différentes cultures sont pratiquées simultanément, car celles-ci ne sont pas affectées pareillement par les contraintes environnementales comme les maladies ou les ravageurs (Willey, 1985).

Globalement les cultures associées constituent souvent une réponse à la nécessité de gérer les risques climatiques, les risques pathologiques, la disponibilité de la main d'oeuvre, les risques liés aux fluctuations des marchés.

2.2.3. Synthèse bibliographique des modèles d'absorption hydrique par les cultures associées

Au cours de ces dix dernières années, des modèles de simulation du fonctionnement des cultures associées ont été développés tableau II suivant :

Espèces concernées	Nom du modèle	Auteurs
Arbre/pelouse		Mc Murtrie & Wolf 1983
Cultures, adventices		Spitter & Aerts 1983
Maïs/Arbre		Acock & Juo 1988
riz, adventices		Graf *et al.* 1990
Soja/cocklebur	SOYWEED	Wilkerson *et al.* 1990
Maïs/Cowpea	GROWIT	Lowenberg-DeBoer *et al.* 1991
Cultures, adventices	ALMANAC	Kiniry *et al.* 1992
Cultures, adventices	Ecosys	Grant 1992
Cultures, adventices	INTERCOM	Kropff & Laar 1993

Ces modèles sont pour l'essentiel des modèles mécanistes basés sur des processus physiques et biologiques. Ils se distinguent des modèles monospécifiques par le fait qu'ils incluent des interactions entre les espèces en présence, notamment au niveau de l'interception pour la lumière, l'eau et les nutriments.

Ces modèles sont destinés aux agronomes pour simuler l'évolution des cultures associées et déterminer des combinaisons de densité optimales, des dispositions de rang et des dates de semis. Les situations rencontrées dans les cultures associées étant très diverses, ces modèles peuvent à terme permettre de réduire le nombre d'expérimentation à conduire au champ.

La qualité des prévisions de ces modèles est étroitement dépendante des connaissances écophysiologiques impliquées. D'autre part les comparaisons entre les modèles et l'expérience sont difficiles à mettre en oeuvre en raison du nombre élevé de paramètres à mesurer au champ (cf. le paragraphe matériel et méthode)

Les comparaisons entre modèles sont souvent impossibles par manque de références standards pour tester les prévisions (Caldwell, 1995).

Des modèles existent pour l'interception de la lumière par le couvert végétal en deux ou trois dimensions (Tournebize, 1994). Toutefois la modélisation des phénomènes de transport dans le couvert (mouvements des divers gaz (O_2, CO_2) couplés aux turbulences dans le couvert) reste problématique.

Au niveau du sol un modèle d'absorption racinaire bi-dimensionnel et monospécifique (Lafolie *et al.*, 1991 et Bruckler *et al.*, 1991) a été adapté au cas bispécifique. La description de ce modèle sera l'objet du paragraphe suivant ainsi que sa confrontation avec l'expérience.

Le couplage d'un modèle d'interception de la lumière, et d'un modèle d'absorption racinaire devrait permettre à terme de simuler l'évolution dans le temps et dans l'espace d'une culture associée.

3. Description du modèle de transfert d'eau sol - racines utilisé dans le cas de cultures associées

3.1. Principe

Pour les cultures associées, par rapport aux cultures monospécifiques, deux points essentiels sont à considérer pour simuler l'absorption hydrique de chaque espèce (Ozier-Lafontaine *et al.*, 1995) :

(1) la répartition de la demande climatique entre les espèces de l'association

(2) la prévision de l'évolution du potentiel hydrique racinaire de chacune des espèces.

Des modèles de prévision du partage de la demande climatique existent déjà (Wallace *et al.*, 1991; Sinoquet et Bonhomme, 1992; Tournebize, 1994). Ces modèles prennent en considération les effets de la morphologie (structure du couvert) et de la biologie (régulation stomatique, ajustement osmotique) des espèces. Pour notre étude, nous avons retenu le modèle de Tournebize (1994) qui fournira les fichiers de demande climatique de chaque espèce au cours du temps. Ce modèle qui procède d'une démarche mécaniste, a été validé sur une association bistratifiée arbre - herbe (Tournebize, 1994).

Pour simuler les transferts d'eau entre le sol et les racines, nous proposons d'utiliser un modèle d'extraction hydrique hétérogène dans le cas de cultures associées (Ozier-Lafontaine *et al.*, 1995). Ce modèle est adapté à la prise en considération de l'hétérogénéité de la répartition des racines et des teneurs en eau dans le sol. Cette hétérogénéité est très prononcée dans le cas des cultures qui associent des plantes avec des demandes d'absorption et des architectures racinaires différentes.

Le modèle choisi reprend certaines bases théoriques de travaux antérieurs (Lafolie *et al.*, 1991; Bruckler *et al.*, 1991). C'est un modèle numérique basé sur la résolution d'équations non linéaires par la méthode des éléments finis.

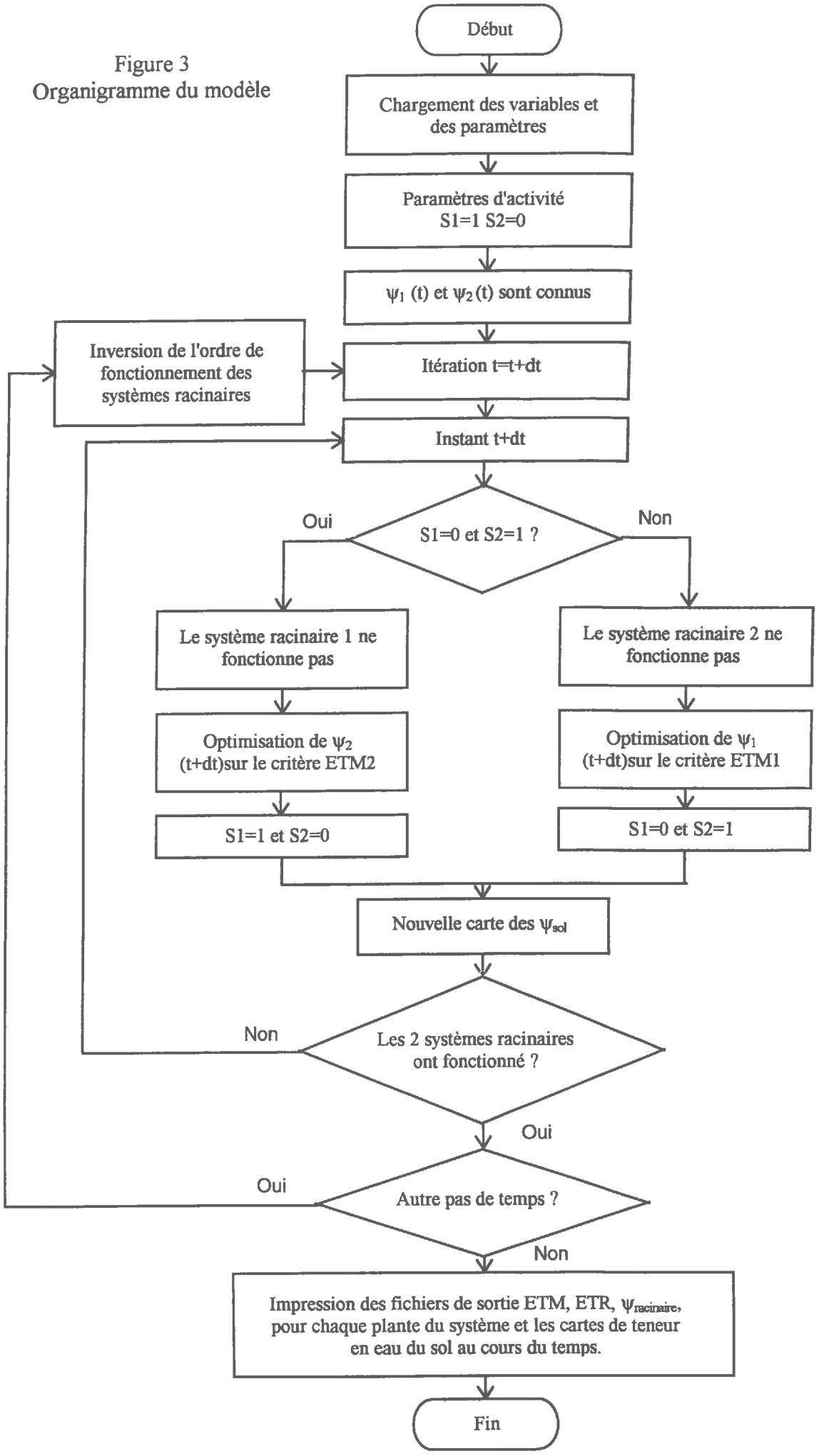
Le modèle calcule le potentiel racinaire ψ_{rac} en supposant qu'à tout moment la plante ajuste au mieux son ψ_{rac} afin de minimiser la différence entre ETM et ETR (ETR : l'évapotranspiration réelle de la plante).

Le système sol-racine est supposé être fermé et les mouvements d'eau se font depuis le sol vers les racines (Lafolie *et al.*, 1991 et Bruckler *et al.*, 1991). L'équation de Darcy-Richards est supposée représenter les transferts d'eau dans le sol dans des conditions non saturées :

$$q = -K(\theta)\frac{d\psi}{dx}$$

Au niveau des cartes racinaires, il faut distinguer les deux systèmes racinaires. Pour cela, l'ensemble des racines recensées de chacune des espèces est affecté d'un indice propre (1 pour le système racinaire 1, 2 pour celui de la plante 2). Cette distinction sera prise en compte lors du

Figure 3
Organigramme du modèle



maillage de la carte en vu de la résolution de l'ensemble des équations correspondant à chaque noeud par la méthode des éléments finis.

Une racine est considérée comme active seulement et seulement si le potentiel matriciel du sol au voisinage de la racine est supérieur au potentiel racinaire calculé durant le pas de temps de calcul. Lorsqu'une racine est inactive ($\psi rac > \psi sol$), elle ne peut pas absorber d'eau pendant le pas de temps. Ce test de fonctionnement des racines est effectué à chaque étape de la recherche du potentiel racinaire.

Le problème fondamental pour la prévision de l'absorption racinaire dans le cas de cultures associées revient à estimer *l'évolution simultanée de deux potentiels racinaires* au cours du temps. Chaque espèce doit satisfaire aux mieux la demande climatique qui lui est affectée. La stratégie de calcul élaborée permet d'isoler la demande climatique imposée à chaque espèce. Le principe est le suivant :

1/ à l'instant t :	Les valeurs des potentiels racinaires de chaque espèce $\psi_1(t)$ et $\psi_2(t)$ sont connus.
2/ au temps t+dt :	Le système 1 ne fonctionne pas (système fermé). Optimisation de $\psi_2(t+dt)$ sur le critère ETM2. On obtient une nouvelle carte des potentiels du sol.
3/ à nouveau au temps t+dt :	Le système 2 ne fonctionne pas (système fermé). Optimisation de $\psi_1(t+dt)$ sur le critère ETM1. On obtient une nouvelle carte des potentiels du sol.
4/ pas de temps suivant :	L'ordre de fonctionnement des systèmes racinaires est inversé.

Cette procédure de calcul est résumée par l'organigramme qui se trouve sur la figure 3. Avec ce mode de calcul, chaque système fonctionne alternativement dans le même pas de temps. Mais chacun des systèmes absorbe dans des conditions hydriques modifiées par l'autre système dans le même pas de temps. Cette approche induit une approximation dans le pas de temps dt. Afin de réduire cette approximation, l'ordre de fonctionnement des systèmes dans les pas de temps successifs est inversé.

La confrontation des prévisions du modèle à des données expérimentales devra permettre de juger si cette approximation est acceptable et si elle ne génère pas d'erreur de prévision à long terme.

3.2. Rappel des principales hypothèses

Principales hypothèses
- Les transferts d'eau dans le sol et entre le sol et les racines sont représentés par l'équation de Darcy-Richards (1931). - Les conditions aux limites à la périphérie du domaine sont des conditions de flux nul. Il n'y a pas d'arrivée ou de départ d'eau aux limites du profil étudié. - Les racines d'une même plante ont toute le même potentiel racinaire à un moment donné, il n'y a pas d'adaptation locale du potentiel racinaire. - Il n'y a pas de sortie d'eau depuis les racines vers le sol. - Il existe un potentiel racinaire seuil au-delà duquel il y a fermeture des stomates.

3.3. Les variables et les paramètres d'entrée du modèle

Variables d'entrée
- L'évapotranspiration maximale estimée pour chaque composante de la culture associée au cours du temps (Tournebize, 1994). - La carte d'impacts racinaires. - Le profil hydrique mesuré ou imposé correspondant au début de la simulation.

Paramètres d'entrée
- Les caractéristiques hydrodynamiques pour chaque horizon du sol : Courbe de rétention $\psi(\theta)$ et courbe de conductivité $K(\theta)$ ou $K(\psi)$. - Le nombre de couches du sol. - Le potentiel minimum pour le système racinaire 1 et le système racinaire 2 (fixé ici à -150m par référence à la bibliographie).

Le mode d'acquisition de ces variables et de ces paramètres sera décrit dans le paragraphe consacré au matériel et méthodes.

3.4. Contenu des fichiers de sortie du modèle

Fichiers de sortie
- Evolution temporelle des potentiels racinaires (m) des systèmes racinaires 1 et 2. - Evolution temporelle du nombre de racines 1 et 2 actives et inactives. - Evolution temporelle instantanée et cumulée de l'évapotranspiration réelle (mm), du déficit hydrique (ETM-ETR en m) et du rapport ETR/ETM des plantes 1 et 2. - Evolution temporelle de la teneur en eau volumique moyenne ($m^3.m^{-3}$). - A des heures présélectionnées, les potentiels matriciels à chaque noeud du maillage, soit une carte de potentiels du sol. - Evolution temporelle de la teneur en eau volumique, du potentiel matriciel et de la variation du stock d'eau pour chaque couche de sol.

4. Matériel et méthodes

4.1. Acquisition des variables et des paramètres d'entrée du modèle

Les caractéristiques hydrodynamiques du sol sont estimées par une méthode de laboratoire appliquée à des cylindres de sol prélevés sur la parcelle expérimentale à deux profondeurs : 18-25 cm correspondant à la couche de sol travaillée et 50-57 cm correspondant au sol profond non remanié.

4.1.1. Analyse du sol

L'analyse granulométrique et chimique du sol est la suivante :

	Cylindre 18-25 cm	Cylindre 50-57 cm
Humidité à 105°C. (g/kg)	32	23
Granulométrie 5 fractions sans décarbonatation (g/kg) :		
- Argile	356 (35.6%)	190 (19%)
- Limon fin	243 (24.3%)	181 (18.1%)
- Limon grossier	83 (8.3%)	90 (9.0%)
- Sable fin	119 (11.9%)	129 (12.9%)
- Sable grossier	199 (19.9%)	410 (41.0%)
La densité apparente (déterminée sur cylindres, mais sous estimées car le remplissage des cylindres est imparfait)	1.234	1.084
La densité de solide (méthode du pycnomètre flacon)	2.723	2.782
Porosité totale (légèrement sur-estimée)	54.68 %	61.03 %

La porosité plus élevée calculée en profondeur est en accord avec les observations faites sur le cylindre 50-57 cm, où nous avons enregistré la présence de fissures et de nombreux pores de diamètres de 0.3 mm à 1.5 mm de diamètre. Le cylindre de surface est composé de mottes prismatiques, dont certaines sont très compactes. Le diamètre de ces mottes est d'environ 2 cm. De rares pores de diamètre inférieur à 3 mm sont visibles. Cet aspect plus compact se traduit par une porosité totale moins élevée.

Carbone organique - méthode ANNE (g/kg)	9.9	2.7
Matières organiques (g/kg)	17.0	4.6
pH eau	5.9	6.7
Capacité d'échange cationique (cmol+/kg)	19.9	18.9
Calcium échangeable acétate d'ammonium (g/kg)	3.29	2.49
Sodium échangeable acétate d'ammonium (g/kg)	0.075	0.140
Magnésium échangeable acétate d'ammonium (g/kg)	0.268	0.321
Potassium échangeable acétate d'ammonium (g/kg)	0.149	0.035

Ce type de sol est qualifié d'*andosol*. La roche mère est de nature volcanique. Les composés minéraux amorphes "stabilisent" la matière organique et la protègent contre la biodégradation microbienne, ce qui provoque son accumulation dans le profil. Cette formation massive de complexes organo-minéraux amorphes est indépendante de la végétation, elle est gouvernée exclusivement par le climat (humidité constante du climat) et le matériau minéral qui est toujours de nature volcanique.

Les andosol peu ou moyennement désaturés sont très favorables au développement de la végétation, par leur forte porosité, leur aération, la facilité qu'ils offrent à la pénétration des racines. Cependant, bien qu'étant caractérisé par une capacité au champ élevée, leur point de flétrissement est très élevé ce qui limite la valeur de l'eau utile (Colmet-Daage *et al.*, 1967). Leur défaut chimique principal réside dans une précipitation, peu réversible, des ions phosphatés par l'alumine, ce qui est à l'origine d'une carence fréquente en phosphate.

En surface, ce sont les argiles et les limons fins qui dominent, tandis qu'en profondeur, l'abondance des sables, qui sont généralement des fragments de verre inaltérés indique une tendance "vitrique".

4.1.2. La conductivité hydraulique à saturation

Nous avons déterminé la conductivité hydraulique à saturation des deux cylindres à l'aide d'un perméamètre. Le cylindre préalablement pesé pour déterminer son humidité initiale, est placé dans un perméamètre. Il est réhumecté d'abord par capillarité durant 24 heures, puis par ennoyage progressif encore au moins pendant 24 heures, avant d'être soumis à percolation pendant 3 jours. Les charges imposées provoquent un flux laminaire et n'affectent que très peu la structure du sol, l'eau restant toujours limpide. Bien que l'échantillon soit noyé progressivement avec beaucoup de précaution, on n'atteint jamais la saturation complète. Même en fin de mesure, on observe toujours le départ de petites bulles d'air.

Le flux d'eau étant mesuré pour différentes charges hydrauliques (annexe I), nous pouvons déterminer la conductivité à saturation Ksat pour chaque cylindre :

$$q = K_{sat}\frac{\Delta H}{L} \Leftrightarrow K_{sat} = \frac{q}{\frac{\Delta H}{L}}$$

Cylindre 1 (18-25cm)
Ksat=0.011 cm.mn^{-1} soit 1.816 10^{-06}m.s^{-1}

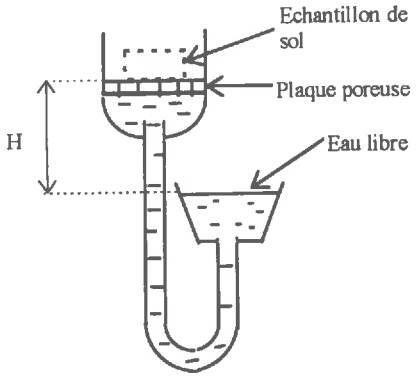
Cylindre 2 (50-57cm)
Ksat=0.265 cm.mn^{-1} soit 4.430 10^{-05} m.s^{-1}

Nous pouvons constater qu'en profondeur le sol est environ vingt fois plus conducteur qu'en surface. Ceci est certainement dû au fait que les trente premiers centimètres du sol sont travaillés et qu'ils ont une teneur bien plus élevée en argile et limons fins, par rapport à la profondeur où les sables fins sont prépondérants.

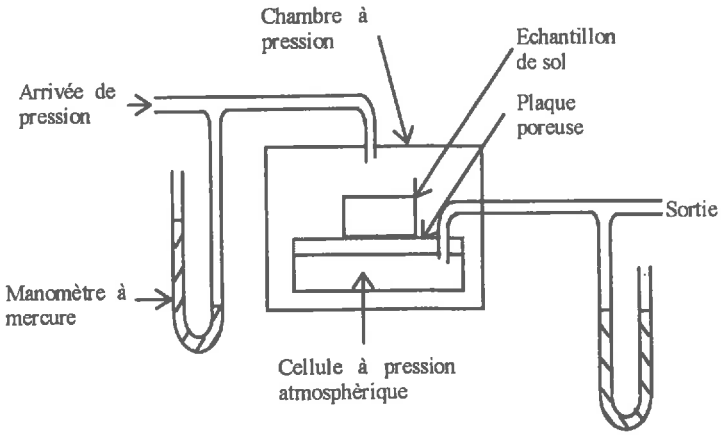
En surface la régression linéaire entre le gradient de potentiel et le flux est légèrement de moins bonne qualité qu'en profondeur. Il est vraisemblable qu'au moment des mesures le sol était incomplètement saturé, car nous avons observé un dégagement de bulles d'air assez important malgré les 8 jours d'ennoyage progressif.

4.1.3. La courbe de rétention ψ(θ)

La relation entre l'humidité du sol et le potentiel hydrique est déterminée au moyen d'une plaque de tension pour les potentiels hydriques supérieurs à -10 m, et au moyen d'une chambre à pression à plaque pour des potentiels inférieurs à -10 m.

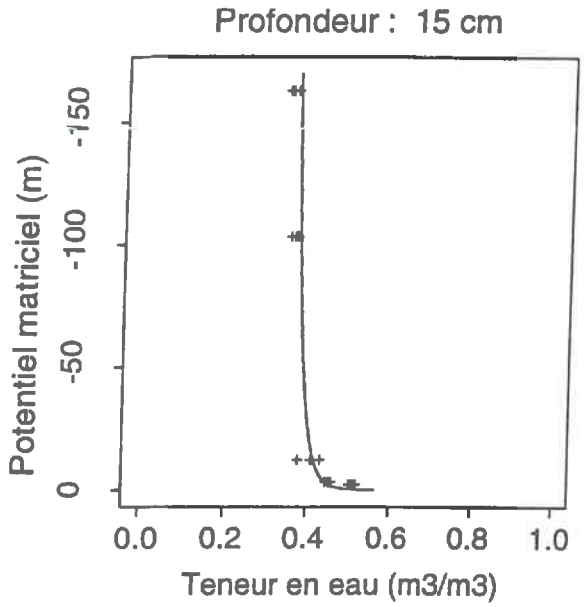


Plaque de tension



Chambre à pression à plaque

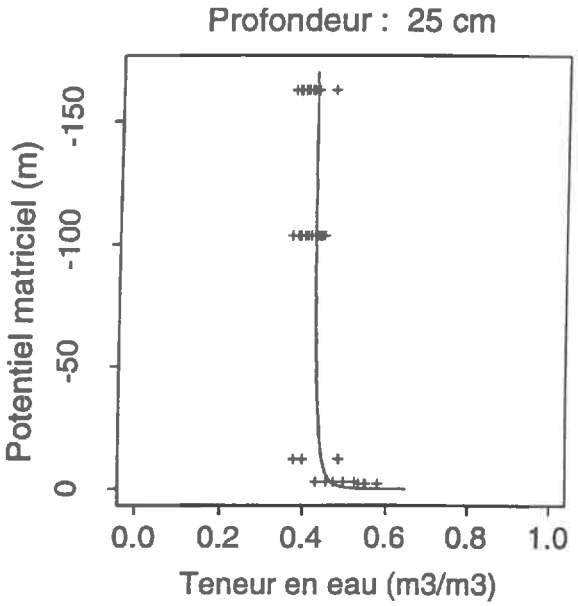
Figure 4 Courbes de rétention déterminées à différentes profondeurs et les paramètres du modèle de Mualem Van Genuchten ajustés.



Parametres

* teneur en eau a saturation : 0.567
* teneur en eau residuelle : 0.031
* valeur du parametre n : 1.053
* valeur du parametre alpha : 39.292

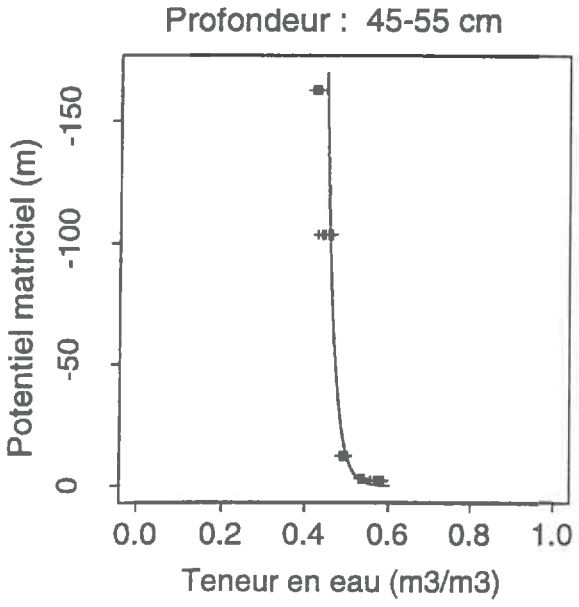
* densite : 1.521



Parametres

* teneur en eau a saturation : 0.65
* teneur en eau residuelle : 0.403
* valeur du parametre n : 1.299
* valeur du parametre alpha : 29.849

* densite : 1.415



Parametres

* teneur en eau a saturation : 0.604
* teneur en eau residuelle : 0.002
* valeur du parametre n : 1.041
* valeur du parametre alpha : 8.562

* densite : 1.21

Ces instruments permettent d'appliquer des valeurs de tension successives sur les échantillons de sol. Ensuite pour chaque tension on détermine la teneur en eau du sol par méthode gravimétrique. Un modèle de Van-Genuchten (1980) est ajusté aux couples de points ψ-θ.

$$\psi(\theta) = \alpha\left(\Theta^{1/m} - 1\right)^{1/n}$$

$\Theta = (\theta - \theta r)/(\theta sat - \theta r)$

θr Teneur en eau résiduelle, paramètre à ajuster ($m^3.m^{-3}$)

θsat Teneur en eau à saturation, paramètre à ajuster ($m^3.m^{-3}$)

α Paramètre à ajuster (m^{-1})

n Paramètre à ajuster et $m = 1 - 1/n$

Ces mesures ont été réalisées sur des échantillons de sol prélevés à la tarière à 15 cm, 25 cm, 45 cm et 55 cm et répétées cinq fois pour chaque profondeur. Les mesures réalisées à 45 et 55 cm étant très proches ont été regroupées pour un ajustement unique. Les résultats sont reportés sur la figure 4.

Nous pouvons noter que les teneurs en eau relative à saturation sont relativement élevées (>50%). Il en est de même pour les teneurs en eau correspondant à un potentiel hydrique de -150 m (proche de 40%), ce qui limite assez fortement la quantité d'eau disponible pour les plantes. En profondeur, le potentiel hydrique diminue plus vite qu'en surface, avec la diminution de la teneur en eau. L'eau est donc fortement retenue en profondeur.

4.1.4. La relation conductivité hydraulique - potentiel matriciel K(h)

La méthode de Wind (Tamari *et al.*, 1993) est une méthode de laboratoire qui permet de déterminer la relation liant le potentiel matriciel de l'eau du sol à l'humidité volumique du sol, et la conductivité hydraulique du sol en fonction de l'humidité ou du potentiel matriciel de l'eau du sol. La méthode utilise à la fois des données expérimentales et un algorithme permettant de réaliser des ajustements à des modèles sélectionnés.

Le dispositif expérimental

Le principe de la méthode est représenté en annexe II a. L'échantillon se présente sous la forme d'une colonne de sol cylindrique de 75 mm de hauteur et de 150 mm de diamètre prélevé in situ, placé verticalement. Au début de l'expérimentation le cylindre est mis à saturation par ascension capillaire, puis ennoyage pendant au moins une semaine. La surface est soumise à un flux évaporatif de surface, et la base correspond à un plan de flux nul.

Connaissant la tare, le poids de terre sèche et le volume de l'échantillon, une pesée en continu du poids de la colonne permet de suivre l'évolution de la teneur en eau moyenne de l'échantillon $\overline{\theta}_m(t)$.

Le potentiel matriciel est enregistré par des micro-tensiomètres implantés à 6 profondeurs différentes. Ils sont disposés suivant une hélice dans le cylindre de sol. Les tensiomètres et les capteurs de pression sont soigneusement purgés avec de l'eau dégazée avant chaque expérimentation.

L'évolution des potentiels matriciels des microtensiomètres implantés dans le cylindre de sol et du poids du cylindre en fonction du temps est présentée en annexe II b.

Procédure d'estimation des paramètres définissant la courbe de rétention :

- A chaque instant t et pour chaque profondeur z, connaissant ψ(z,t), les teneurs en eau $\overline{\theta}_e(z,t)$ sont estimées à partir du modèle de Van-Genuchten (1980) dont les paramètres ont été initialement imposés arbitrairement. Ainsi, nous pouvons calculer la teneur en eau moyenne estimée de l'échantillon $\overline{\theta}_e(t)$.

- les teneurs en eau moyennes mesurées $\overline{\theta}_m(t)$ et les teneurs en eau moyenne estimées $\overline{\theta}_e(t)$ sont comparées par la méthode des moindres carrés. Les paramètres du modèle de Van-Genuchten sont ajustés pour minimiser la somme des carrés des écarts entre $\overline{\theta}_m(t)$ et $\overline{\theta}_e(t)$.

- lorsque les critères de convergence sont atteints, on dispose d'un ajustement des paramètres de la courbe de rétention.

Procédure d'estimation de la conductivité hydraulique :

Pour chaque profondeur et à chaque instant, l'ajustement nous permet de disposer d'une estimation de la teneur en eau et du potentiel matriciel. L'application de la loi de Darcy en écoulement monodimensionnel permet de calculer une valeur de la conductivité hydraulique pour un intervalle de temps donné (dt) et pour chaque cote (z_1 et z_2) dont on connaît le potentiel matriciel.

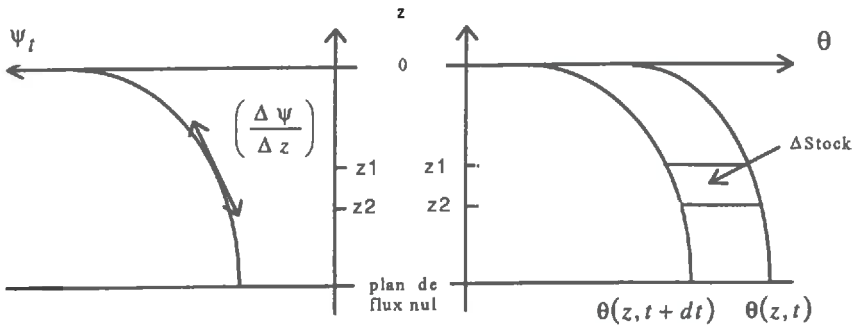


Schéma de discrétisation de la méthode de profil instantané.

La formule de calcul de la conductivité hydraulique est :

$$K(\theta) = \frac{\Delta Stock}{\left(\frac{\Delta\psi}{\Delta z}\right)}$$

ΔStock est la variation de stock d'eau entre les cotes z1 et z2 durant l'intervalle de temps dt [$L.T^{-1}$].

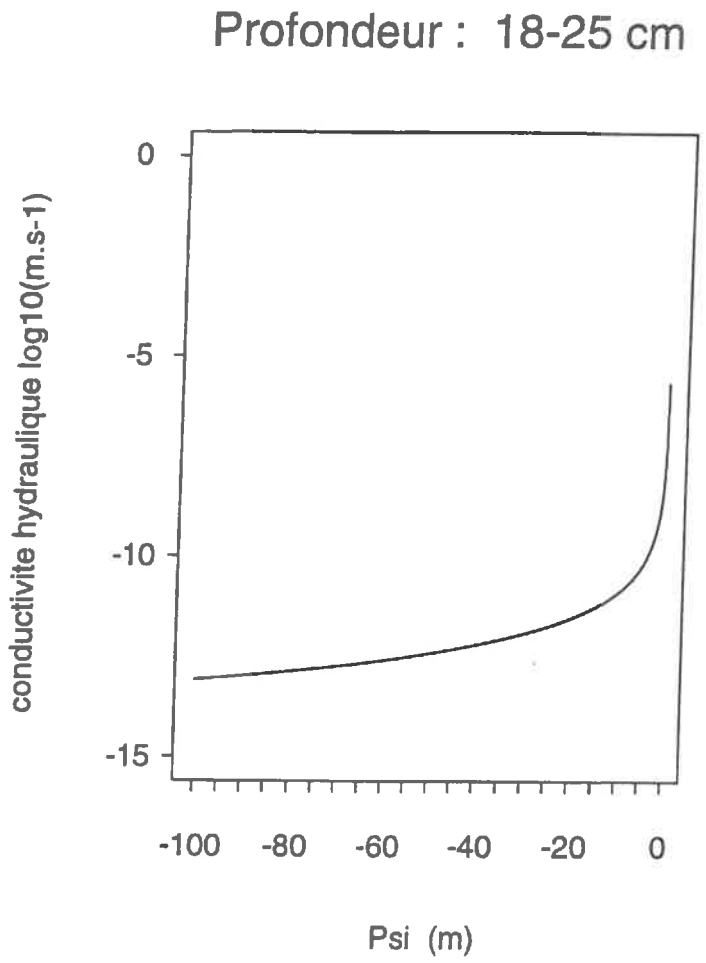
Δψ = différence de potentiel entre z1 et z2 et entre t et t+dt, [L]

Δz = différence entre z1 et z2, [L]

K(θ) = la conductivité hydraulique, [L.T-1]

Ayant à notre disposition des couples K - θ et K - ψ nous pouvons ajuster un modèle de Mualem - Van Genuchten, soit un modèle polynomial de degré trois, soit le modèle de Gardner. On remarquera cependant que cette méthode ne permet pas de très bon ajustement lorsque les

Figure 5 Courbes de conductivité hydraulique ajustées par la méthode Wind sur le cylindre de surface et le cylindre de profondeur.



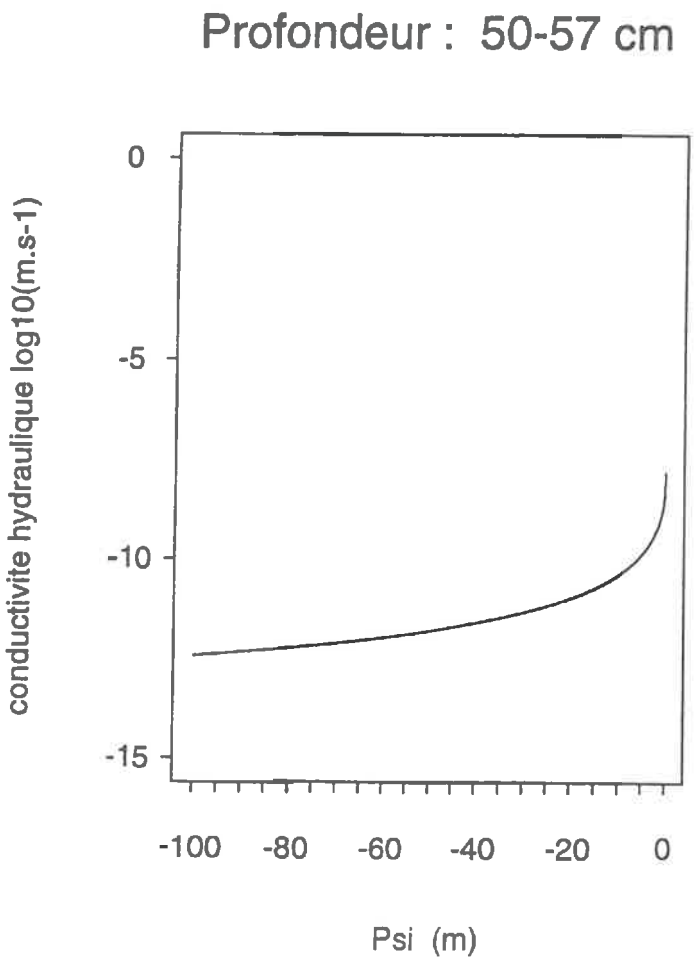
Parametres

* Modele Mualem-Van Genuchten

* A : 6.3288

* n (m-1) : 1.074

* Ksat (m/s) : 2.391e-05



Parametres

* Modele Mualem-Van Genuchten

* A : 0.22125

* n (m-1) : 1.0823

* Ksat (m/s) : 6.1062e-08

gradients de potentiels sont faibles, c'est à dire en début d'expérimentation en conditions très humides.

Les résultats :

Possédant déjà la courbe de rétention établie par des mesures par plaque de tension ou chambre à pression à plaque, nous avons recherché à établir uniquement la relation reliant la conductivité hydraulique au potentiel matriciel.

Les ajustements retenus sont présentés sur la figure 5. Le modèle de Mualem - Van Genuchten (1980) nous a fourni les meilleurs résultats.

$$K(\psi) = K_{sat} \frac{\left(1-(\alpha\psi)^{n-1}\left(1+(\alpha\psi)^{n}\right)^{-m}\right)^{2}}{\left(1+(\alpha\psi)^{n}\right)^{m/2}}$$

Que ce soit pour le cylindre de surface 18-25 cm, ou le cylindre "profond" 50-57 cm la conductivité hydraulique à saturation ajustée par la méthode Wind est différente de celle mesurée au moyen des perméamètres. Pour les potentiels proches de la saturation, il existe une grande variabilité des conductivités calculées.

Une critique majeure que nous pouvons émettre sur les résultats obtenus est que l'ajustement est réalisé sur une gamme très étroite de potentiels matriciels, ici de 0 à -6 m. Nous serons donc obligés d'émettre l'hypothèse que le modèle de Mualem - Van Genuchten simule convenablement l'évolution de la conductivité hydraulique pour des potentiels beaucoup plus bas. Cette hypothèse devra être incluse aux hypothèses avancées pour la simulation de l'absorption hydrique racinaire en situation de cultures associées.

4.2. Acquisition des données de terrain pour le fonctionnement du modèle et la confrontation avec le modèle

Une expérimentation a été menée sur une association maïs - sorgho de janvier à avril 1994. Elle avait pour objet de permettre une confrontation des prévisions du modèle à l'expérience. Elle a été conçue de façon à aboutir à une caractérisation aussi complète que possible du système sol - plante - atmosphère.

4.2.1. Choix de l'association

Les espèces associées sont le maïs (variété Palmira 84 25), et un sorgho grain (Charamagas : *Sorghum bicolor* (L) Moench hydride). Ce choix présente un double intérêt :

- agro-économique : l'association maïs - sorgho est une association culturale très représentative des systèmes de culture paysans d'Amérique Centrale. Ces deux espèces sont plantées simultanément et destinées respectivement à l'alimentation humaine et du bétail ou de la volaille.
- pratique : chaque espèce peut être équipée de capteurs de flux de sève. On peut également distinguer assez facilement les deux systèmes racinaires. Les racines du sorgho sont de couleur violacée, tandis que celles de maïs sont plus blanches.

Figure 6 Maille retenue pour l'analyse des transferts d'eau sol-racines

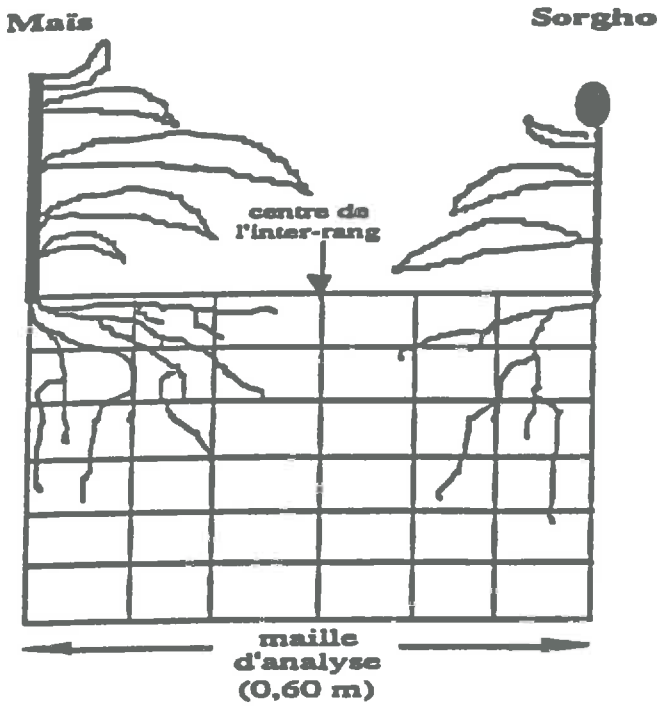


Figure 7 : Profil hydrique moyen du sol le jour 70

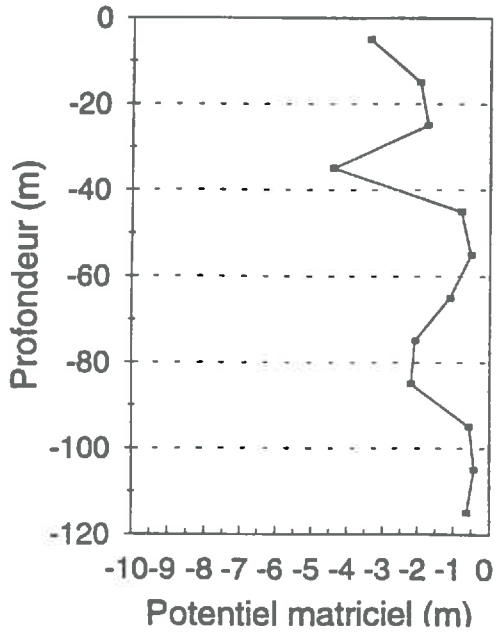
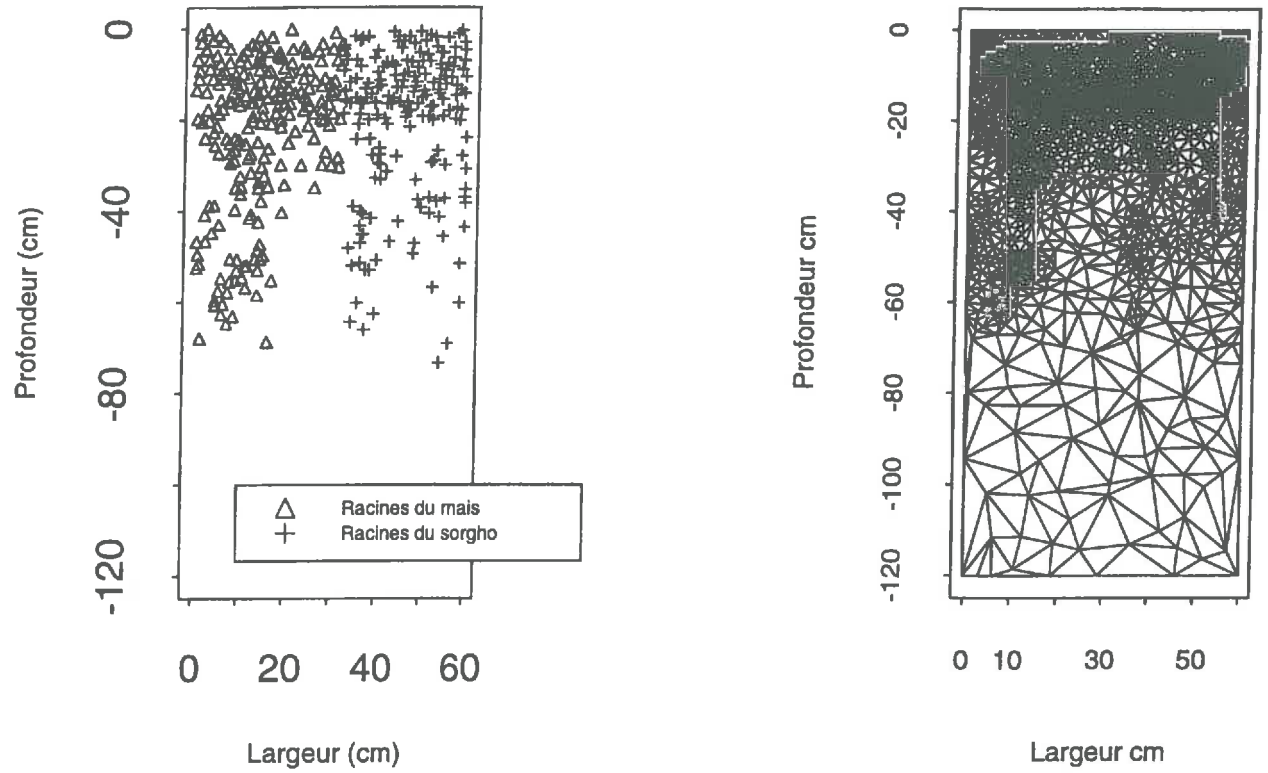
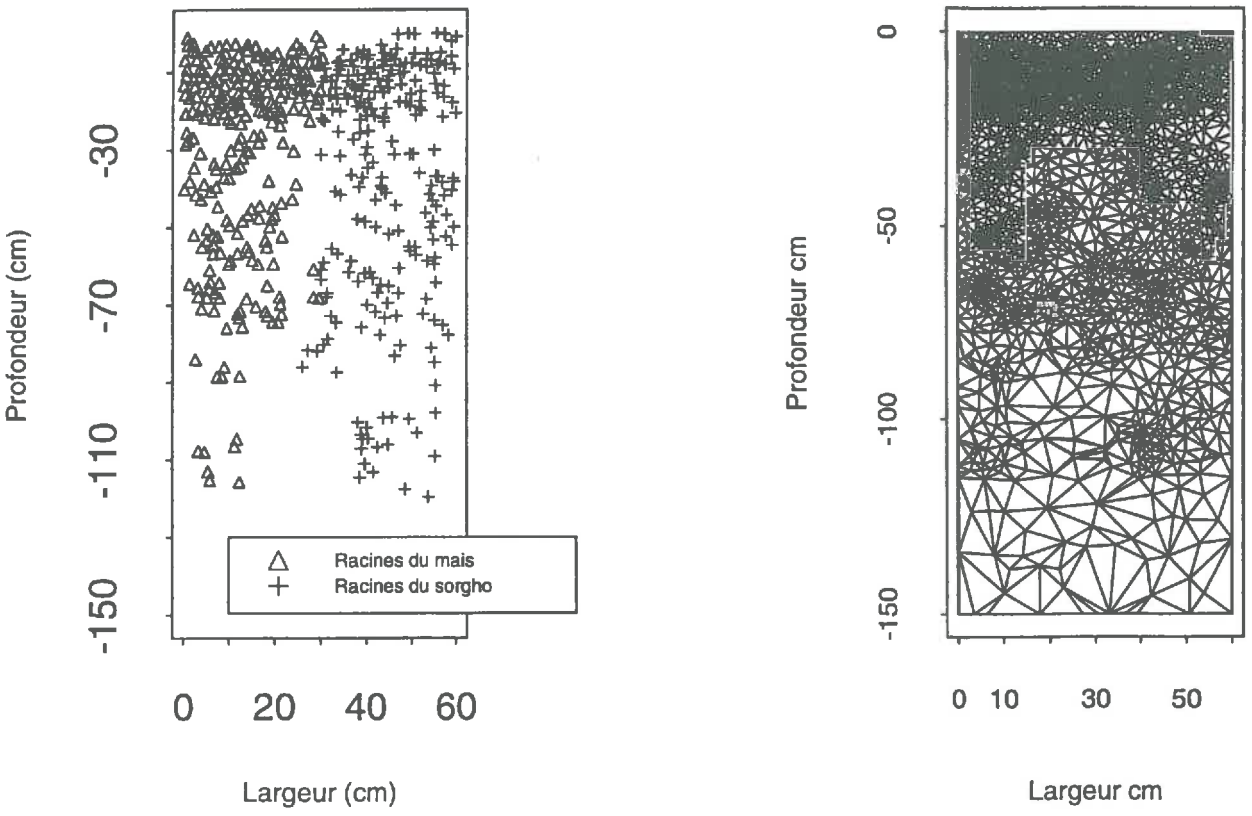


Figure 8 Cartes d'impacts racinaires et leur maillage aux jours calendaires 74 et 95

Jour 74



Jour 95



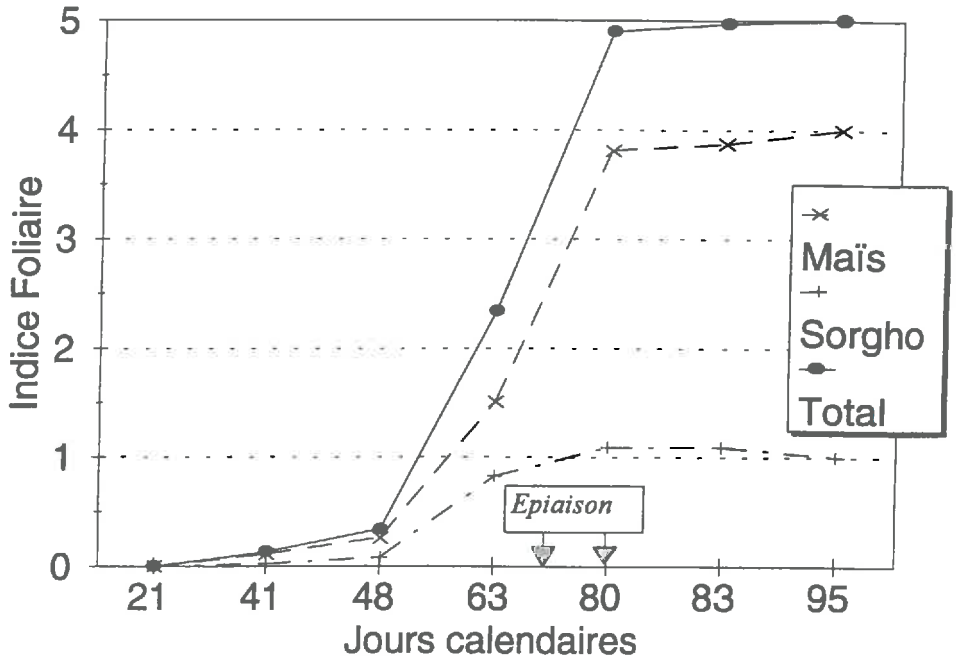


Figure 9 : Evolution de l'indice foliaire

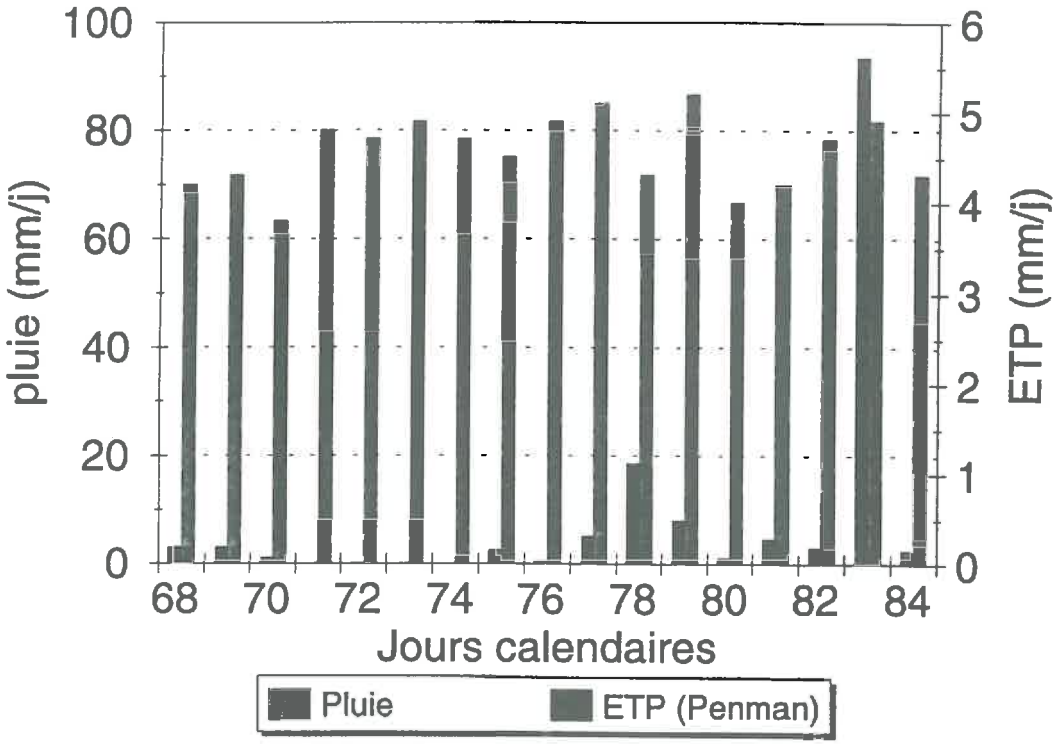


Figure 10 : Pluies et ETP du couvert (Penmann)

Le maïs et le sorgho sont semés en rangs intercalés espacés de 0.60 m (fig 6). Sur le rang, la distance entre les plantes est de 0.20 m. La densité totale est de 83300 plants.ha^{-1},soit 41650 plants.ha^{-1} par espèce.

Le semis a été réalisé le 21/01/94 (NPK : 500 kg.ha^{-1} de 11.12.22 + 120kg.ha^{-1} P_2O_5). L'irrigation a été maintenue jusqu'au 10/02/94 pour assurer une levée aussi homogène que possible.

4.2.2. Suivi de la culture

Un suivi intensif a été conduit pour aboutir à une caractérisation du fonctionnement hydrique de ce traitement culture associée.

Au niveau du sol :

Des profils de teneur en eau ont été réalisés tous les 3 à 4 jours à partir 01/03/94. Les échantillons étaient prélevés à la tarière tous les 10 cm de 0 à 1.20 m de profondeur. A chaque échantillonnage, 6 profils étaient réalisés : 2 sur le rang de maïs, 2 dans l'inter-rang, 2 sur le rang de sorgho.

Les prélèvements ayant servi à l'établissement de la courbe de rétention, ont été réalisés à la fin de la culture (fig 7).

Au niveau de la plante :

Des cartographies racinaires ont été réalisées sur un domaine allant du rang de maïs au rang de sorgho. Les impacts racinaires ont été relevés au moyen d'une grille de maille de 2×2 cm début mars, puis le 15/03/94 et en fin de période d'étude 05/04/94.

La figure 8 présente les impacts racinaires aux jours calendaires 74 et 95 (15/03/94 et 5/04/94) ainsi que le maillage réalisé sur ces mêmes cartes pour la procédure de calcul lors de la simulation.

Sur la partie aérienne, des capteurs de flux de sève (DYNAMAX) ont été installés sur 2 plants de maïs et 2 plants de sorgho. Ces capteurs permettent d'estimer la transpiration de chaque espèce de l'association par un bilan d'énergie de la tige. Les enregistrements sont réalisés à un pas de temps d'une demi-heure.

La conductance stomatique a été déterminée sur 3 feuilles jeunes et 3 feuilles âgées de chacune des espèces au moyen d'un Poromètre LICOR. Un enregistrement a lieu toutes les 2 heures. Ces données serviront à estimer l'évapotranspiration maximale de chaque espèce avec les données météorologiques. Une relation entre la conductance stomatique et le PAR a été établie. L'ajustement d'une courbe enveloppe a permis la détermination de la transpiration réelle maximale de chaque espèce grâce à un modèle de partage (Tournebize, 1994).

Le potentiel foliaire est déterminé au moyen d'une chambre à pression sur 3 à 6 feuilles par espèces à des intervalles de temps de 2 heures, tous les 5 jours à partir du 4/03/94.

L'indice foliaire est déterminé hebdomadairement par planimétrage in situ (10 plants de maïs et 10 plants de sorgho). La matière sèche aérienne est déterminée toutes les 2 à 3 semaines par séchage à 105°C. de 4x2 m linéaires maïs et sorgho (fig 9).

Au niveau de l'atmosphère

L'évaporation du sol est mesurée par des microlysimétres quotidiennement situés au centre de l'inter-rang, ce qui surestime probablement l'évaporation du sol. Un pluviographe est installé sur la parcelle (fig 10). L'humidité, la température et le vent sont également enregistrés à 2 niveaux dans la culture.

Douze capteurs PAR, dix capteurs Rg sont disposés au sol sur une maille maïs - sorgho - maïs. Un capteur placé au sommet de la culture enregistre le Rg, le Rn (rayonnement net), et le rayonnement diffus.

Figure 11 Régressions entre les ETM et le Rayonnement net et les graphiques des résidus correspondants.

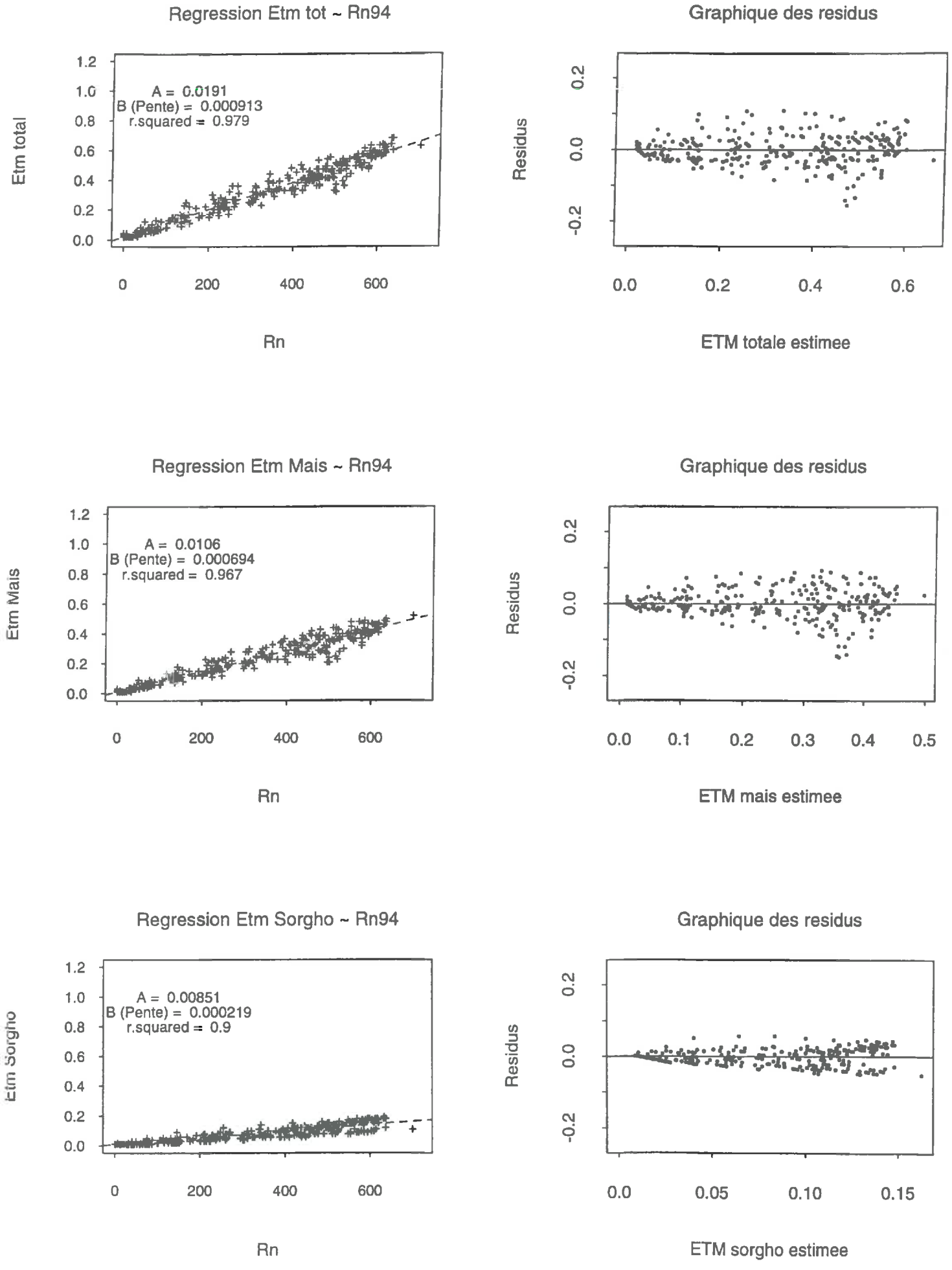
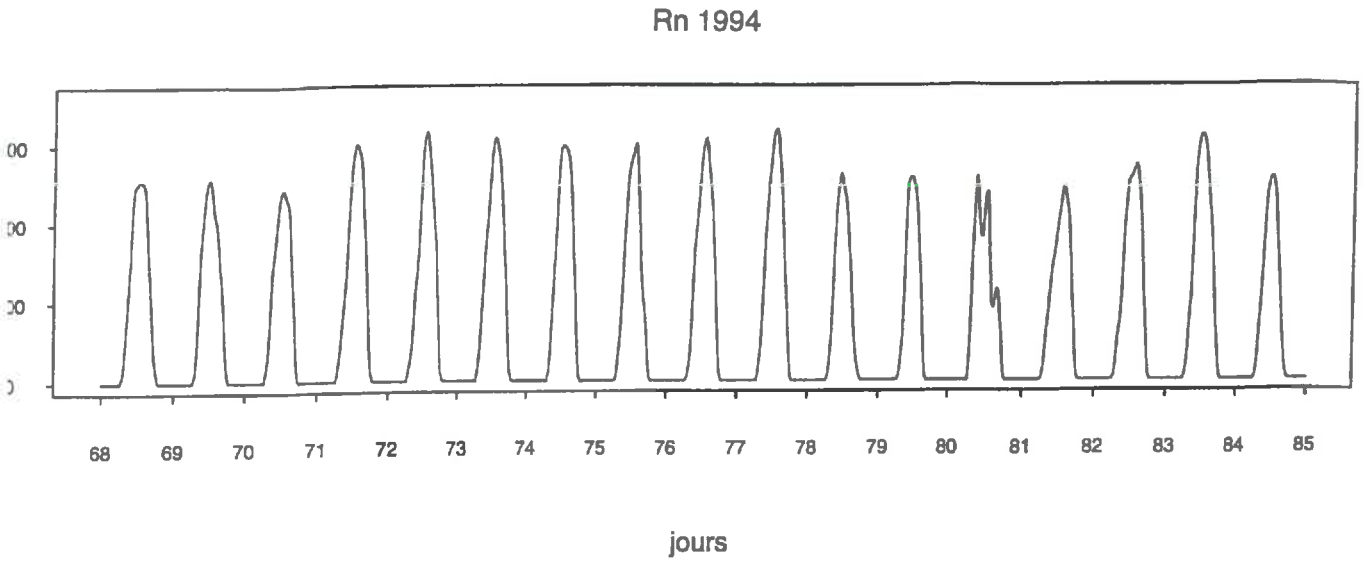
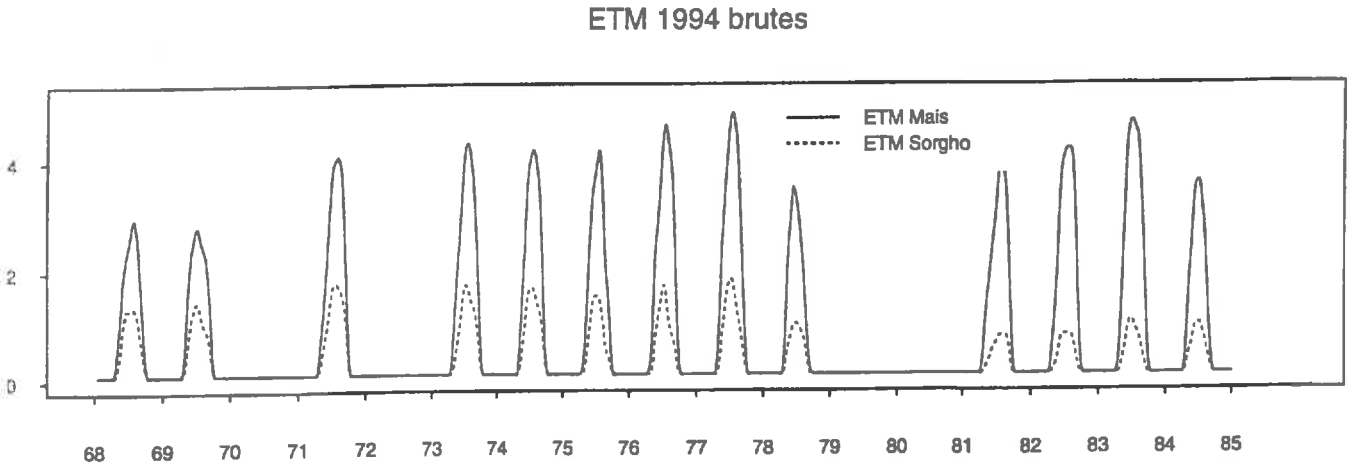


Figure 12 Estimation des données manquantes d'ETM





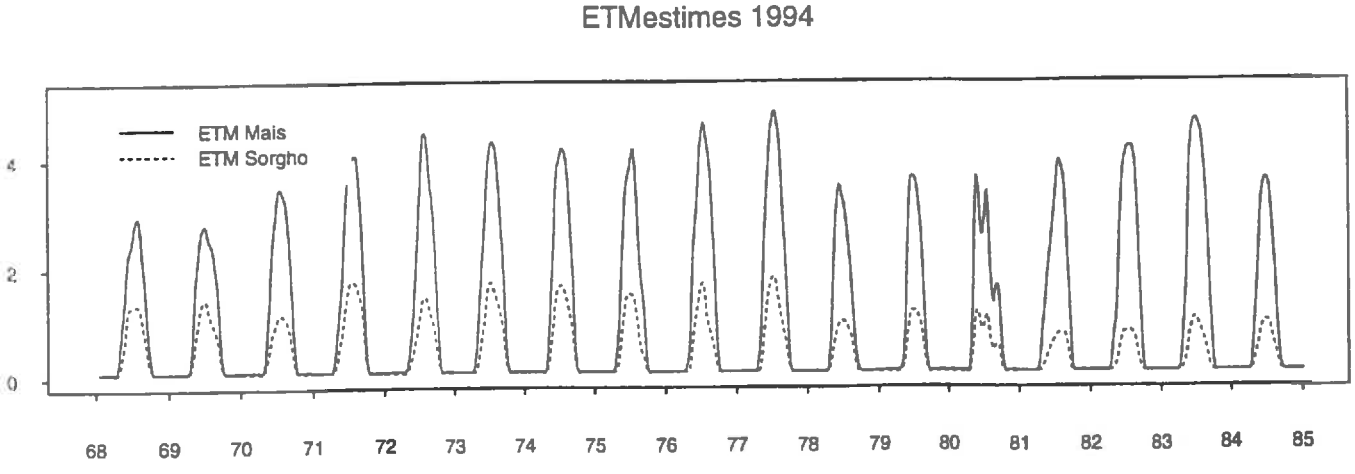
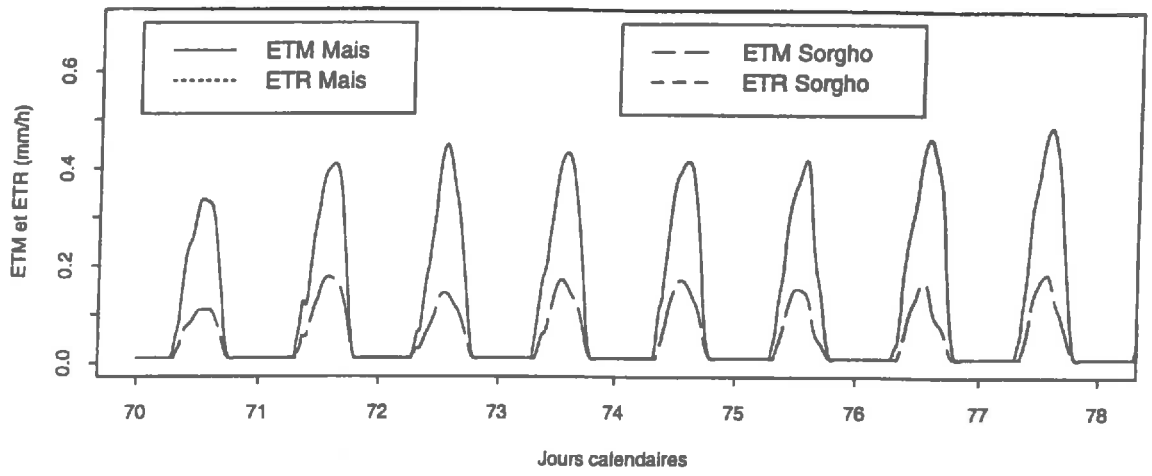
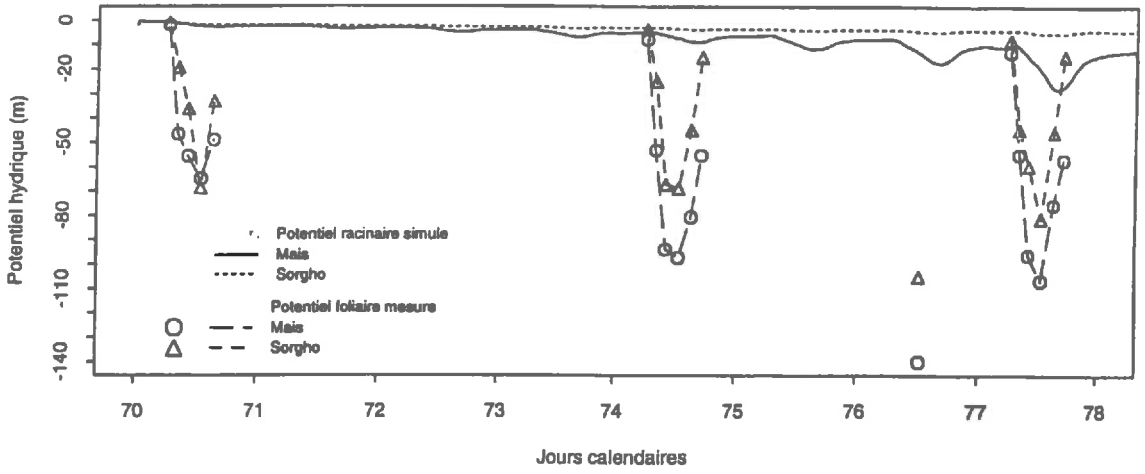


Figure 13 Résultats de la simulation pour la confrotation avec les données expérimentales

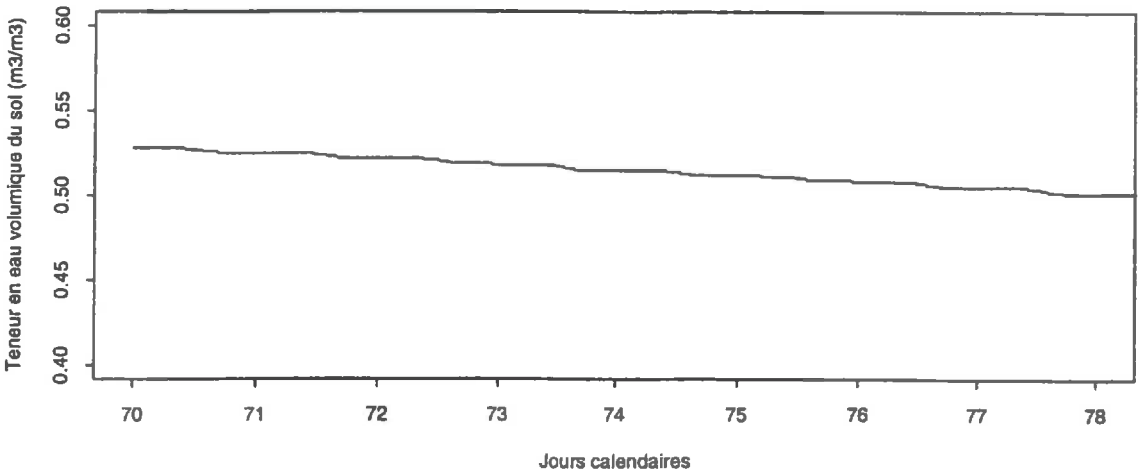
a.) ETM et ETR instantannees du Mais et du Sorgho au cours du temps



b.) Potentiel racinaire et foliaire du Mais et du Sorgho au cours du temps



c.) Teneur moyenne en eau volumique du sol



5. Résultats et discussion

5.1. La comparaison modèle / expérience

5.1.1. La simulation et ses prévisions

Le modèle ayant des conditions aux limites de flux il était nécessaire de simuler l'absorption hydrique sur une période respectant ces conditions. Nous avons donc retenu la période sans pluie importante allant du jour 70 (11/03/94) au jour 77 (18/04/94) inclus.

Pour la simulation, le sol a été découpé en trois couches avec les propriétés hydrodynamiques respectives déterminées précédemment. Le profil hydrique initial correspond à la moyenne des teneurs en eau volumiques mesurées le jour 70 sur le rang de maïs, l'inter-rang et le rang de sorgho tous les 10 cm de profondeur.

Les demandes évaporatives maximales imposées à chaque espèce ont été calculées au moyen du modèle de Tournebize (1994). Cependant, les jours 70, 72, 79 et 80 des capteurs ont été défectueux et n'ont pas fourni les données nécessaires à l'estimation de la transpiration maximale (Tm) du maïs et du sorgho. Mais disposant d'un enregistrement du rayonnement net Rn sur l'ensemble de cette période, nous avons vérifié par une régression linéaire que les prévisions de la transpiration maximale issues du modèle de partage de la demande climatique (Tournebize, 1994) étaient bien corrélées au rayonnement net. La figure 11 montre que les transpirations maximales (Tm totale, Tm du maïs et Tm du sorgho) sont étroitement corrélées au Rn (r2 toujours $\geq .9$ et des résidus symétriquement distribués autour de zéro). Nous avons donc estimé les ETM des jours manquant à partir de ces régressions linéaires. Les ETM du maïs et du sorgho utilisées pour la simulation sont représentées sur la figure 12. Les différences d'ETM entre le maïs et le sorgho, sont essentiellement imputables à des différences de LAI (fig 9).

La figure 13 présente l'évolution de l'évapotranspiration potentielle maximale et de l'évapotranspiration réelle simulée pour le maïs et le sorgho. Sur la période allant du jour 70 au jour 78, pour les deux espèces, l'ETM et l'ETR sont similaires. Le rapport ETR/ETM étant égal à l'unité, nous pouvons donc avancer que d'après les prévisions du modèle les plantes de l'association ne subissent pas de stress hydrique durant cette période.

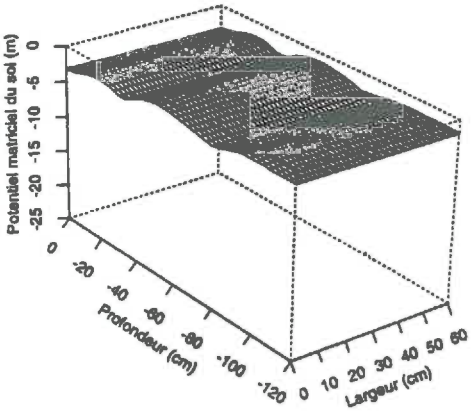
Le calcul du potentiel racinaire des deux espèces au cours du temps montre qu'au début le potentiel racinaire de chacune des deux plantes reste élevé (-1 m) et varie très peu au cours de la journée. A partir du jour 72, une variation journalière du potentiel racinaire apparaît pour le maïs, en effet un abaissement plus prononcé du potentiel racinaire se produit l'après-midi. Ces variations n'apparaissent que plus tard pour le sorgho (jour 76). Ces variations s'amplifient assez rapidement pour le maïs. La diminution de plus en plus rapide du potentiel racinaire se produit de plus en plus tôt dans la journée. Ces fluctuations peuvent être corrélées à la demande climatique et à l'état d'humidité du sol.

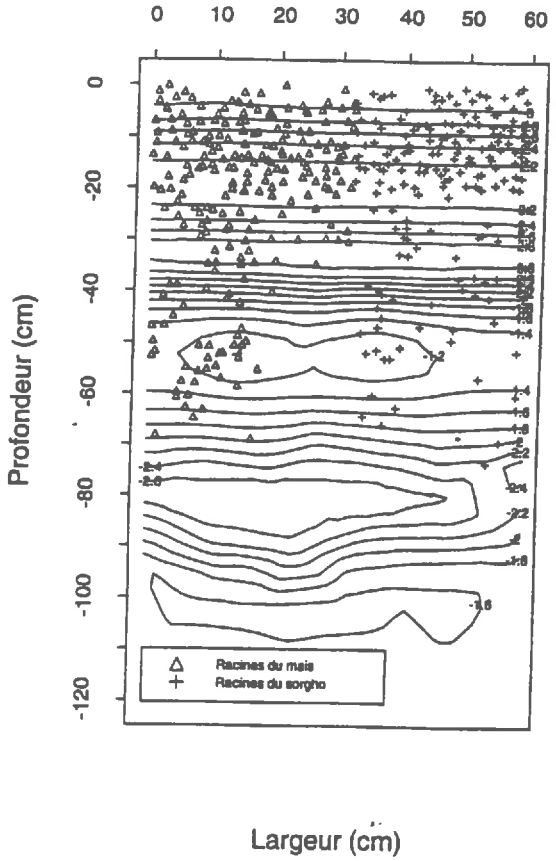
Le matin quand la demande évaporative apparaît, les racines absorbent l'eau disponible à leur voisinage, ceci à pour effet d'abaisser le potentiel matriciel du sol. Pour parvenir à satisfaire la demande climatique qui augmente au cours de la journée, le potentiel hydrique racinaire doit être alors abaissé fortement et ceci d'autant plus que le sol est asséché. Ce phénomène est amplifié lorsque la teneur en eau du sol atteint des zones où la conductivité hydraulique du sol diminue fortement pour de faibles variations de teneur en eau du sol. D'après les courbes de conductivité hydraulique (fig. 5), nous pouvons constater que celle-ci diminue fortement pour des potentiels matriciels compris entre 0 et -10 m.

La nuit, la demande évaporative étant presque nulle, les racines n'absorbent plus d'eau. Le potentiel racinaire augmente. Il se produit une redistribution de l'eau dans le sol des zones les plus humides vers les zones les plus sèches autour des racines du maïs et du sorgho à une échelle très locale.

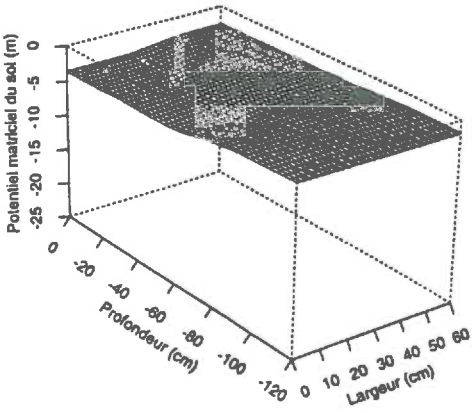
Figure 14 Représentation en trois dimensions du potentiel matriciel en fonction de la profondeur et de la largeur du profil et de la carte des isocontours correspondante.

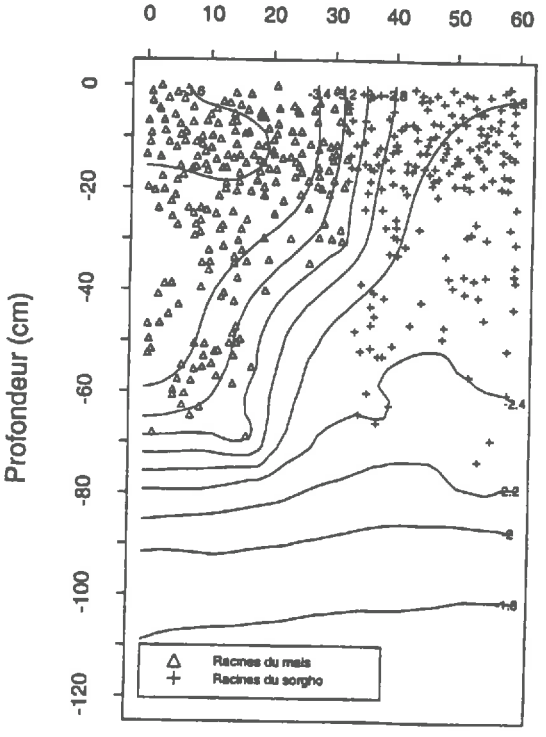
Jour : 70 6 h 25 mn



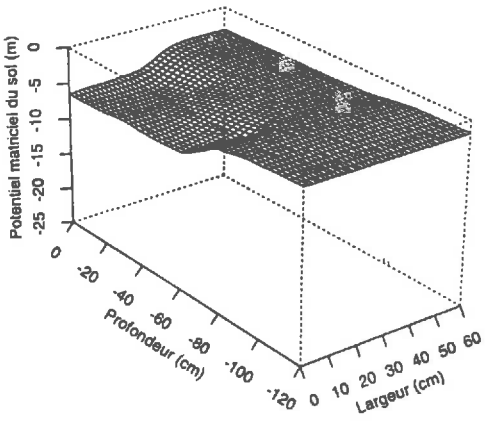


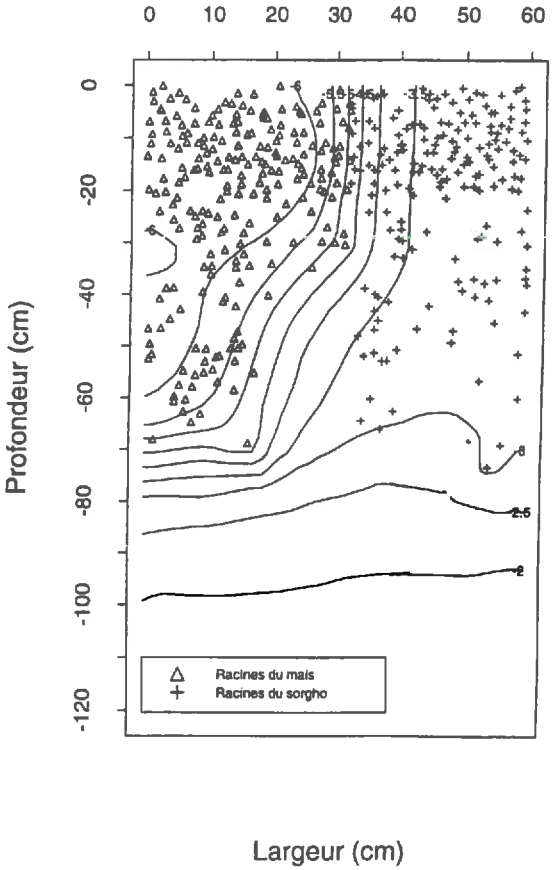
Jour : 72 6 h 2 mn





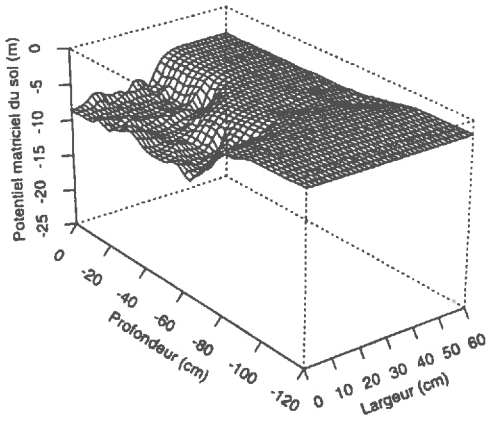
Jour : 74 6 h 2 mn

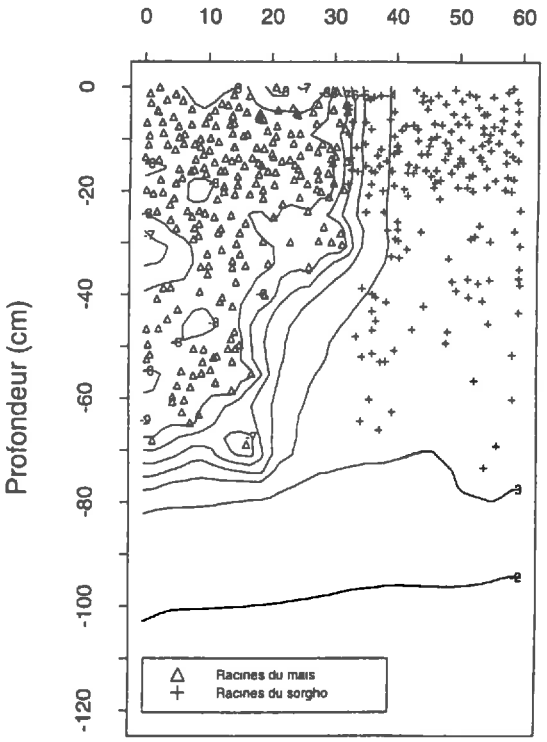




Largeur (cm)

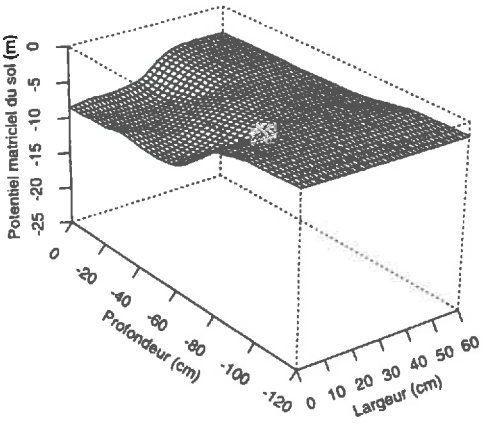
Jour : 74 18 h 2 mn

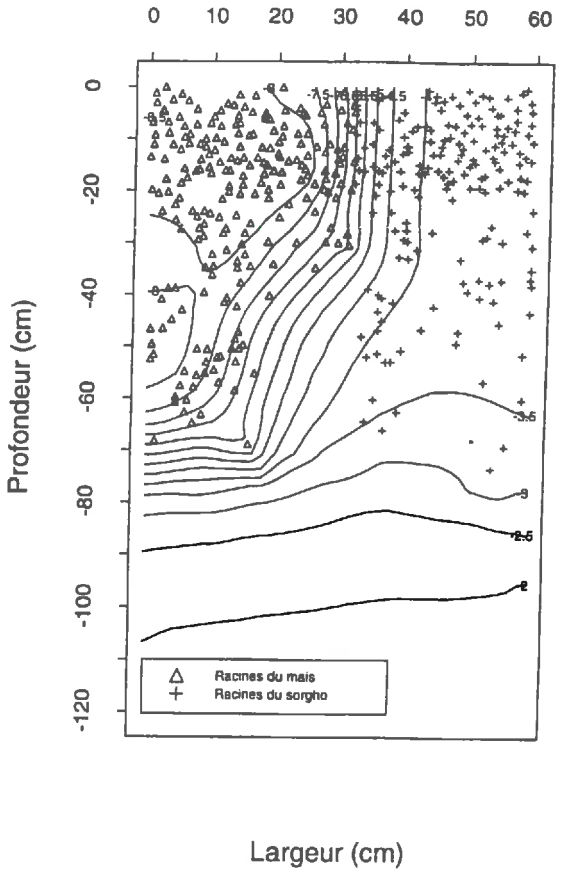




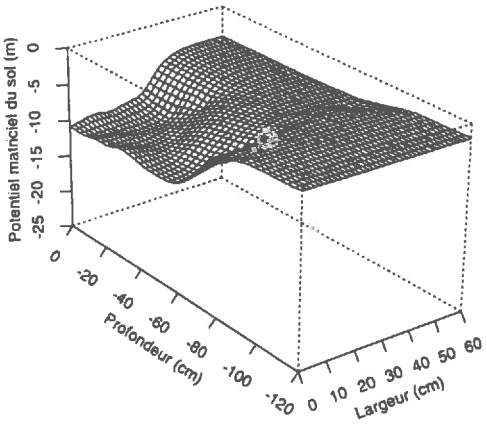
Largeur (cm)

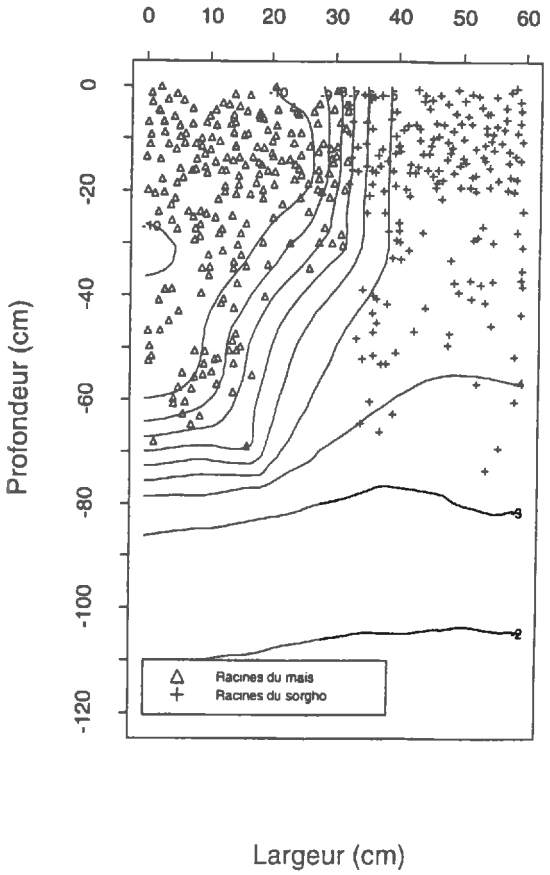
Jour : 75 6 h 2 mn





Jour : 76 6 h 2 mn





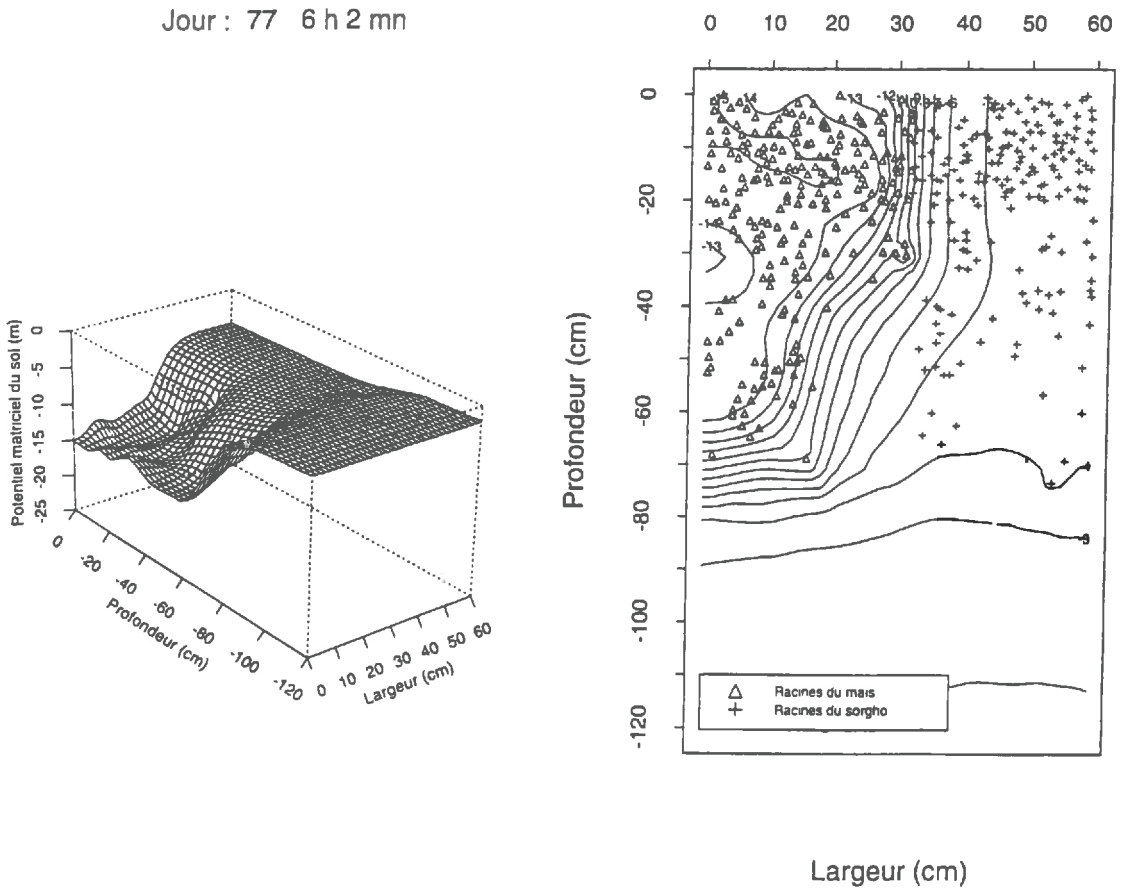


Figure 15 Nombre de racines actives du Mais et du Sorgho

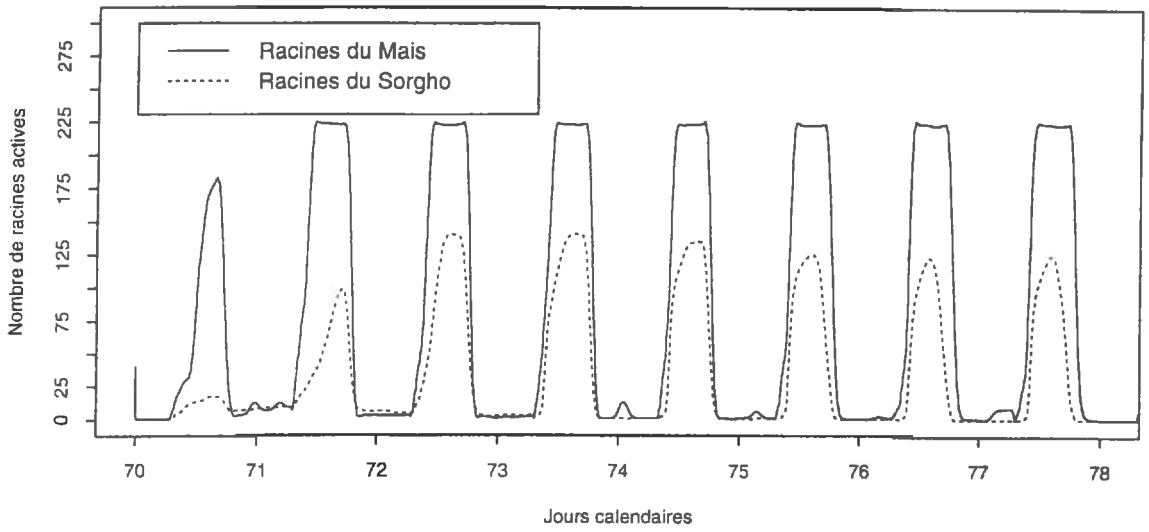
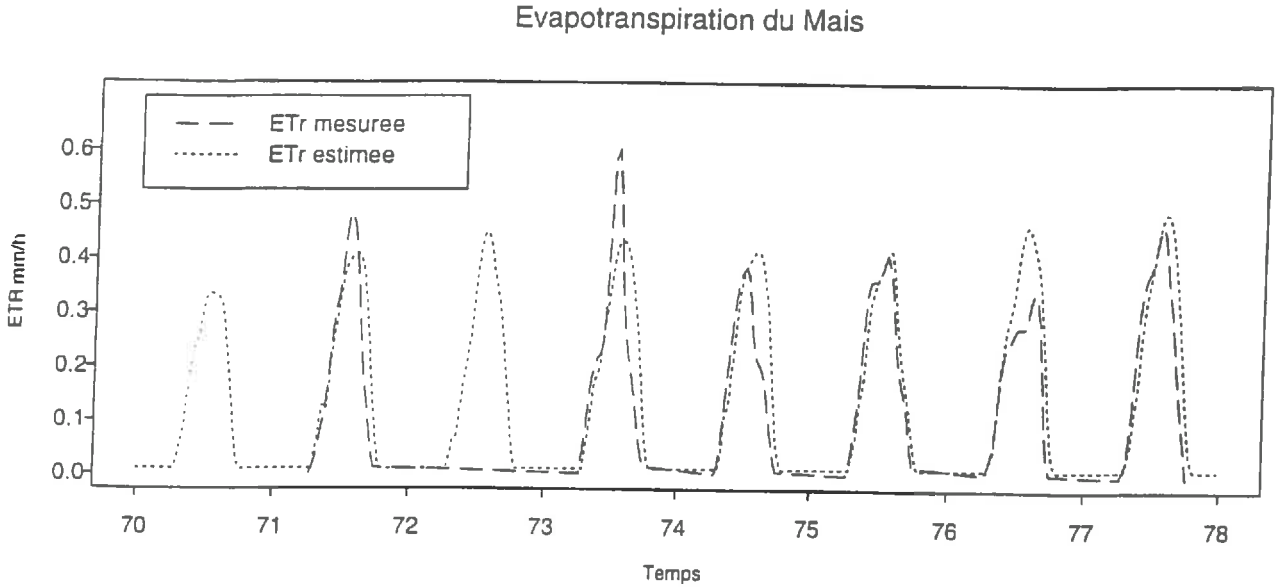
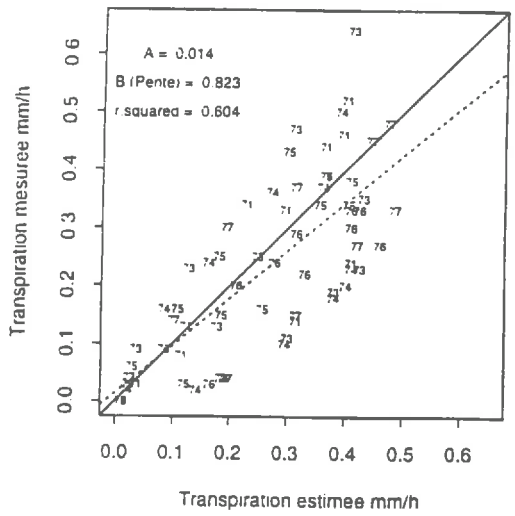
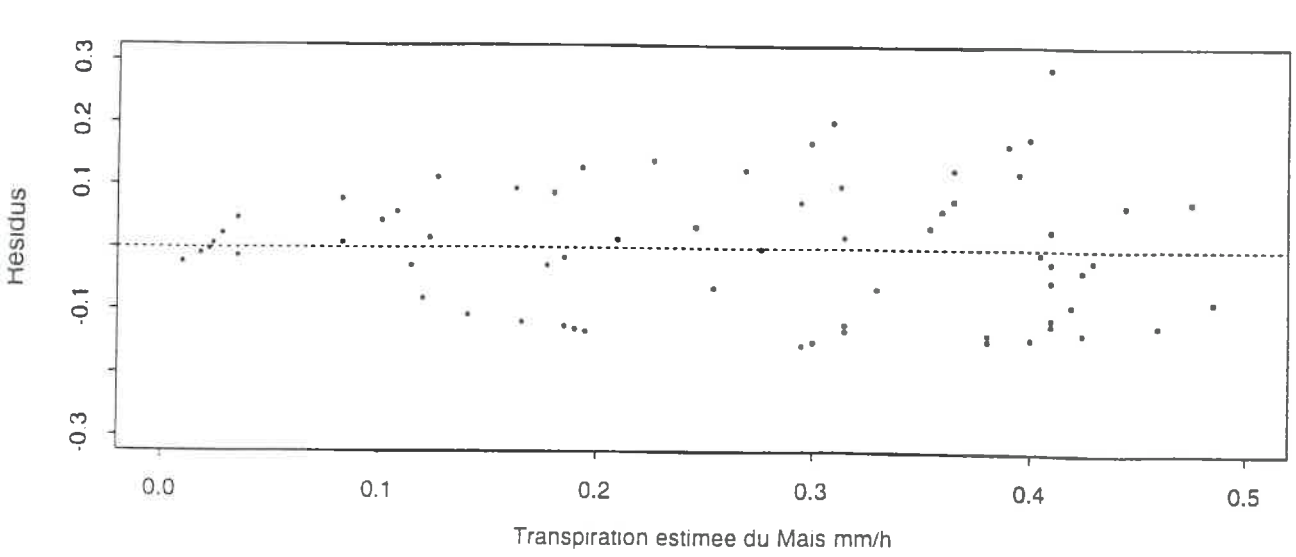


Figure 16 Confrontation des ETR estimées aux ETR mesurés pour le Maïs







A l'échelle du profil, et sur l'ensemble de la période, de l'eau issue en partie de la profondeur, mais surtout de l'espace occupé par les racines du sorgho où la teneur en eau est relativement élevée est redistribuée(fig. 14). En effet, l'eau se déplace plus facilement dans les zones de forts gradients. Ici, il existe une telle zone au niveau de l'inter-rang. Cette absorption indirecte par le maïs de l'eau de la zone racinaire du sorgho traduit les phénomènes de compétition pour l'alimentation hydrique entre les deux espèces. La compétition aura de plus en plus d'importance au fur et à mesure que le sol va devenir de plus en plus sec et que les gradients de potentiels matriciels entre les zones racinaires des deux espèces vont augmenter.

Les variations journalières du potentiel racinaire du sorgho ont beaucoup moins d'ampleur, car la demande climatique affectée à cette plante est deux fois et demie moins importante que celle affectée au maïs. Sur la période étudiée, le maïs a transpiré 23 mm tandis que le sorgho a transpiré 9.1 mm. En conséquence, le sorgho assèche beaucoup moins vite le sol dans sa zone racinaire que le maïs. Toutefois il est probable que ces variations s'amplifieront avec la dessiccation du sol engendrée par l'évapotranspiration du sorgho et indirectement par celle du maïs. La teneur en eau volumique moyenne du sol diminue progressivement de 0.528 à 0.501 m^3/m^3.

Le nombre de racines actives est ajusté quotidiennement de façon à satisfaire la demande climatique (fig 15). La journée, toutes les racines du maïs (225 impacts) et du sorgho (183 impacts) sont actives. La nuit, seulement une ou deux racines de chaque système sont actives pour satisfaire la demande évaporative fixée arbitrairement à 0.01 mm.

La prise en considération de l'hétérogénéité de la distribution spatiale des racines et de l'eau dans le sol ainsi qu'une demande climatique contrastée entre les deux espèces à permis de montrer comment pouvait apparaître la compétition pour l'alimentation hydrique dans un contexte de cultures associées.

Pour confirmer et juger de la validité de ces prévisions, nous allons les confronter à des données expérimentales relevées durant la même période.

5.1.2. La comparaison des prévisions du modèle à l'expérience

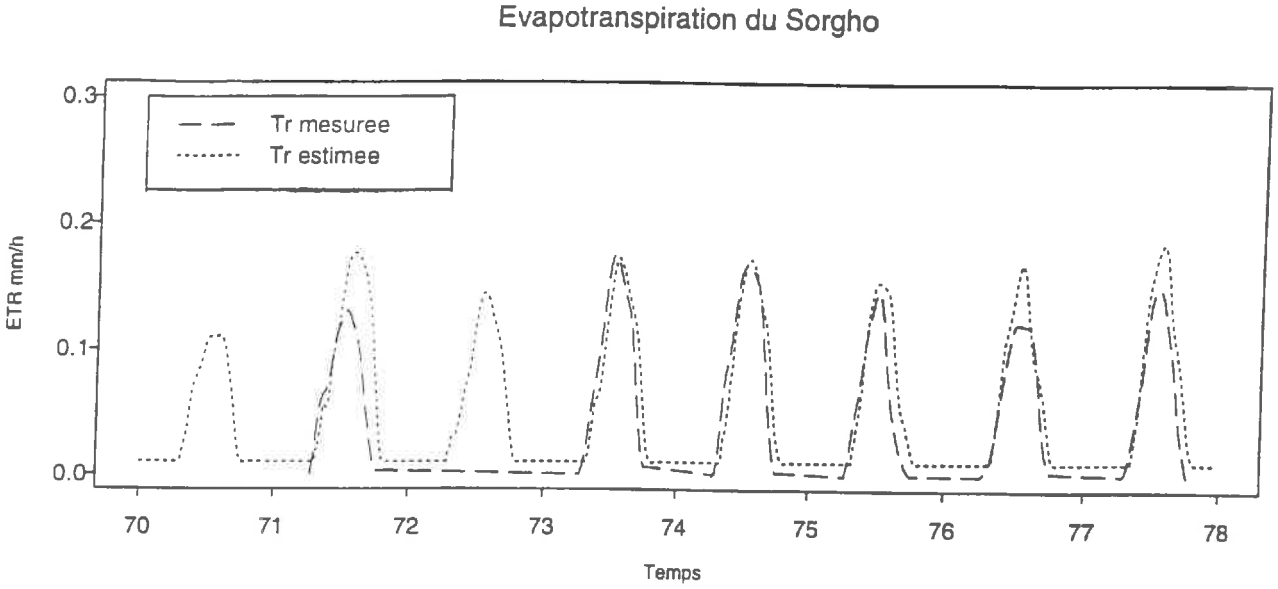
Prévision des évapotranspirations réelle

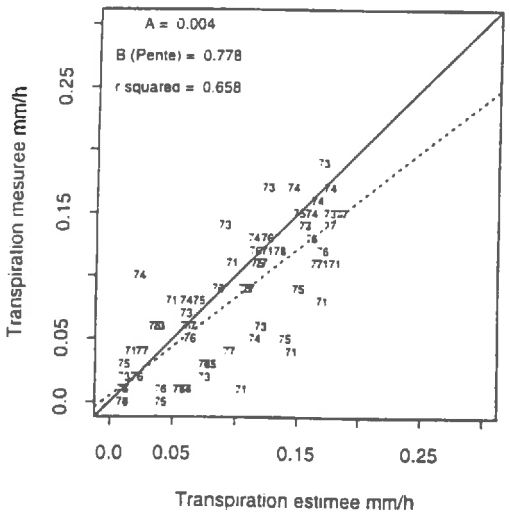
Les figures 16 et 17 présentent l'évolution de l'évapotranspiration réelle mesurée et calculée du maïs et du sorgho. Les jours 70 et 71, nous ne disposons pas de mesure de l'évapotranspiration en raison d'un dysfonctionnement des appareils de mesure de flux de sève. Les enregistrements correspondent à des mesures à des pas de temps d'une demi-heure, tandis que les estimations correspondent à des pas de temps beaucoup plus fins ajustés selon les problèmes de calcul à résoudre : inférieur à 6 minutes lorsque les variations de transpiration sont importantes, à 30 minutes la nuit.

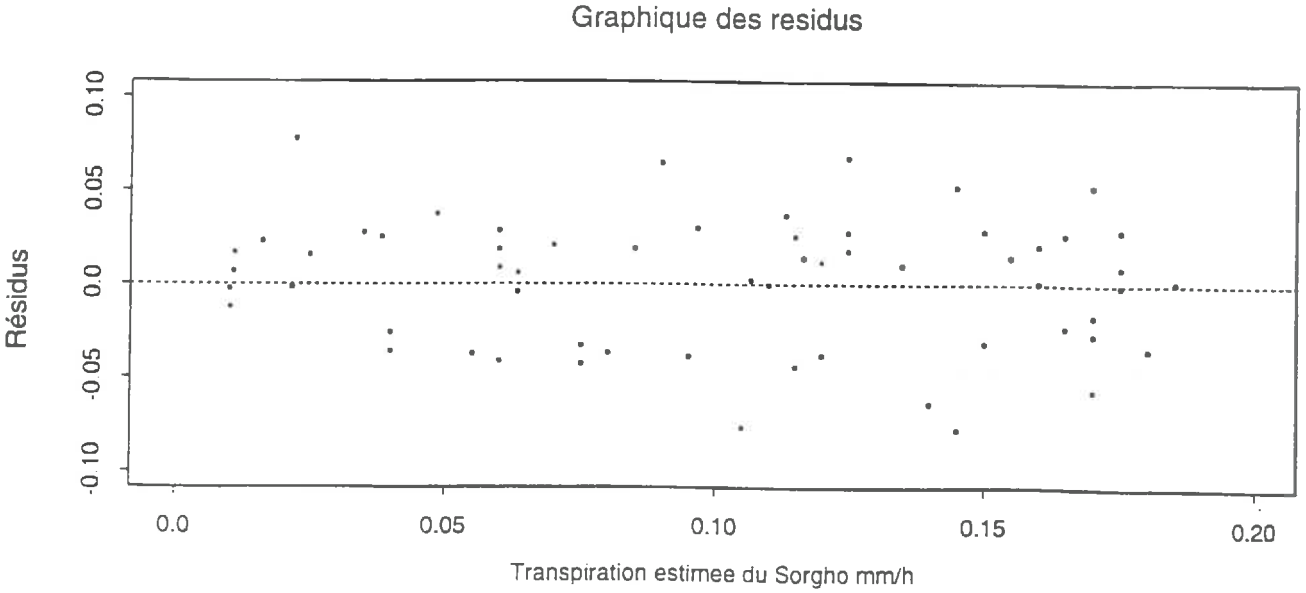
En première approche, les sens des variations journalières et les ordres de grandeur de la transpiration du maïs et du sorgho semblent assez bien simulés par le modèle. Nous allons donc approfondir notre analyse.

<u>*Pour le maïs*</u> : les jours 71 et 73, la transpiration mesurée à la mi-journée, est supérieure à l'ETM. Les deux pics de transpiration observés pourraient être dus à un dysfonctionnement momentané de la méthode de mesure et/ou d'enregistrement en condition de flux élevé. Les algorithmes de correction DYNAMAX pour les flux élevés ne sont peut-être pas adaptés pour de telles conditions. Nous pouvons donc expliquer ces pics "anormaux" par la variabilité de l'expérimentation ou par l'inadéquation des méthodes de "filtrage" DYNAMAX. Rappelons que l'intervalle de confiance de cette technique a été estimé à 10% pour des mesures réalisées sur des arbres (Tournebize, 1994). L'installation de ces capteurs est plus délicate sur le maïs et le sorgho en plein champ, ce qui augmente vraisemblablement le risque d'erreur de mesure.

Figure 17 Confrontation des ETR estimées aux ETR mesurés pour le Sorgho







Le jour 74, les mesures révèlent la présence d'un léger stress hydrique à la mi-journée, alors que le modèle ne le prédit pas. Le lendemain le stress n'est plus enregistré. La petite pluie survenue ce jour-là (2.5 mm) suffit à réhumecter l'horizon de surface et le maïs peut satisfaire la demande climatique. Mais le jour 76, le stress est à nouveau présent et toujours pas simulé par le modèle. Le jour 77, le stress est beaucoup moins prononcé en raison d'une nouvelle pluie (5 mm). Il se produit uniquement durant l'après-midi.

Le modèle ne prédit pas ces stress, car le potentiel racinaire seuil fixé à - 150 m à partir duquel il y a réduction de la transpiration et apparition d'un stress est vraisemblablement largement sous estimé. En fait, le potentiel racinaire de -150 m est le seuil en dessous duquel le potentiel racinaire ne peut pas descendre, mais le stress se manifeste bien avant cette limite. Le jour 74, le potentiel foliaire du maïs mesuré atteint -97 m et il y a fermeture des stomates. La demande évaporative n'est plus satisfaite alors que le potentiel racinaire estimé est égal à -7.1 m. Neumann *et al.* en 1974 avaient mesuré une diminution significative du contenu en eau du maïs pour un potentiel foliaire proche de - 100 m. Le jour 76 le potentiel foliaire atteint -140 m tandis que le potentiel racinaire vaut -13.8 m vers midi, alors que le stress survient dés 10 heures. Le modèle calcule un potentiel racinaire pour satisfaire un flux d'absorption hydrique racinaire égal à la transpiration maximale potentielle, mais il ne permet pas de prédire la transpiration réelle au niveau des feuilles.

Pour prédire la transpiration réelle, il faudrait prendre en considération dans le modèle les relations existantes entre le potentiel racinaire, le potentiel foliaire et le déclenchement de la réduction de la conductance stomatique. Ces relations (Monteith, 1985)sont complexes et peu connues. De plus il existe d'autres facteurs tels que le rayonnement (la qualité et la quantité de lumière interceptée), la température, la concentration interne en CO2 de la feuille qui influent sur le degré d'ouverture des stomates. Au vu des connaissances actuelles, il semble prématuré de vouloir incorporer tous ces facteurs dans le fonctionnement du modèle qui a d'abord pour vocation de prévoir l'évolution de la teneur en eau du sol et des flux d'absorption racinaire dans des situations de cultures associées.

<u>*Pour le sorgho*</u> :

Globalement les sens de variation et les ordres de grandeur de l'ETM et de l'ETR sont similaires. Cependant, nous observons un décalage systématique entre l'ETM et l'ETR. La transpiration commence toujours avant que la demande climatique soit effective. Le soir la transpiration diminue avant l'ETM. Ces décalages sont certainement dus à une légère erreur dans la détermination des heures d'interception de la lumière par le sorgho. En effet dans ce type d'association, la prévision de l'ombrage du maïs sur le sorgho est beaucoup plus complexe que dans une association arbres - herbes à partir de laquelle le modèle de partage de la demande climatique a été élaboré.

De même que pour le maïs aucun stress hydrique n'est prédit par le modèle, alors que le sorgho ne satisfait pas la demande climatique les jours 71, 76 et 77. Les explications sont les mêmes que pour le maïs, il faudrait connaître les relations entre le potentiel racinaire et la transpiration.

Prévision des profils hydriques

Le modèle produisant un profil hydrique en deux dimensions, à des heures désirées (ici 6 heures du matin, après la redistribution de l'eau du sol autour des racines), nous avons calculé les teneurs en eau volumique dans le rang de maïs, de sorgho et l'inter-rang à partir de ces profils pour confronter les prévisions aux mesures. Le profil est découpé en bandes verticales de 5 cm de large. Cette valeur représente l'équivalent de la largeur de la tarière utilisée in situ. La bande correspondant au rang de maïs va de 0 à 5 cm, celle de l'inter-rang de 28 à 32 cm et celle du rang de sorgho de 56 à 60 cm. Chaque bande est découpée à intervalles réguliers de 10 cm à partir de

Figure 18 Confrontation des profils de teneur en eau estimés et mesurés dans les rangs de maïs, de sorgho et l'inter-rang (jour 70)

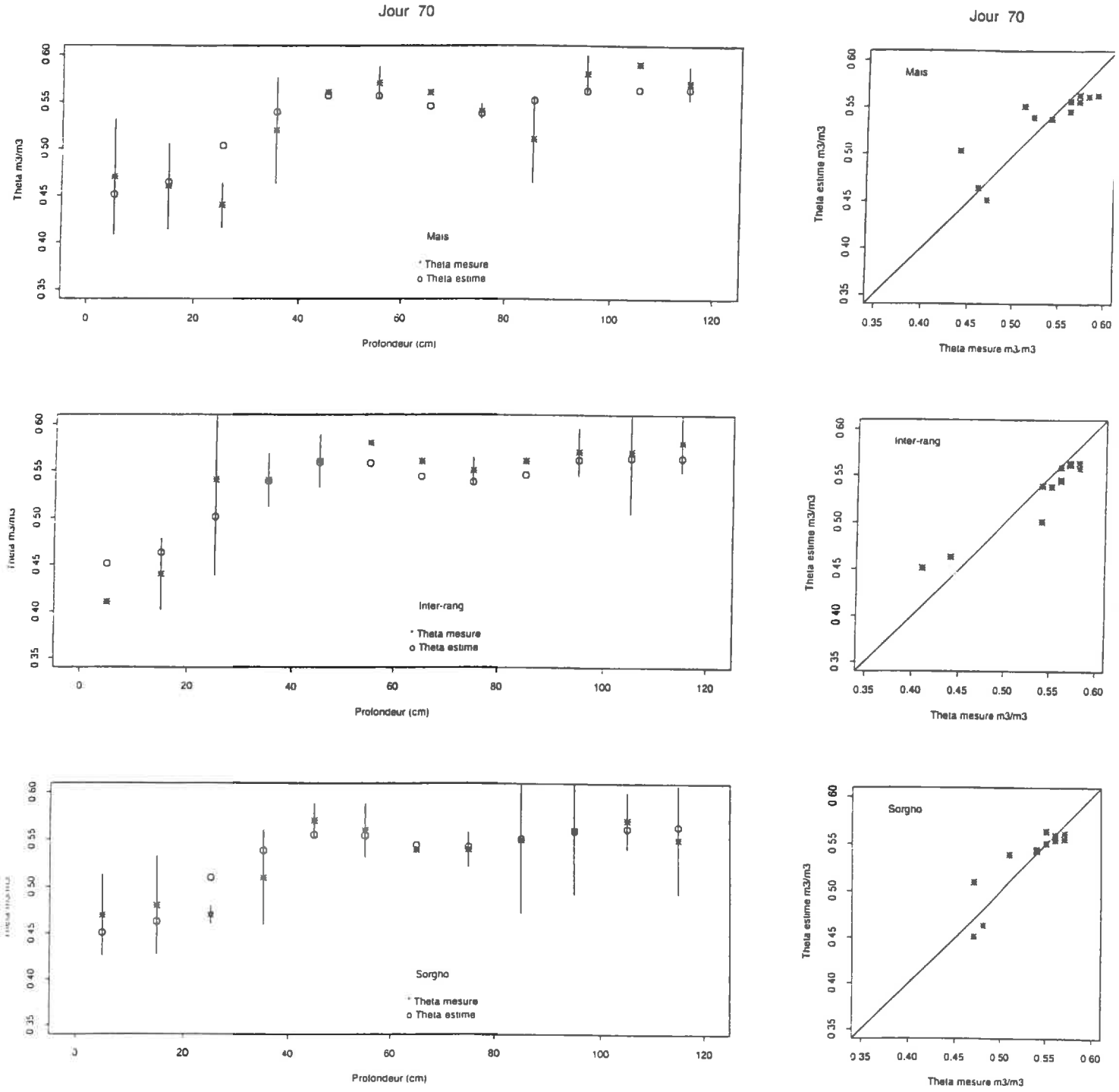


Figure 19 Confrontation des profils de teneur en eau estimés et mesurés dans les rangs de maïs, de sorgho et l'inter-rang (jour 74)

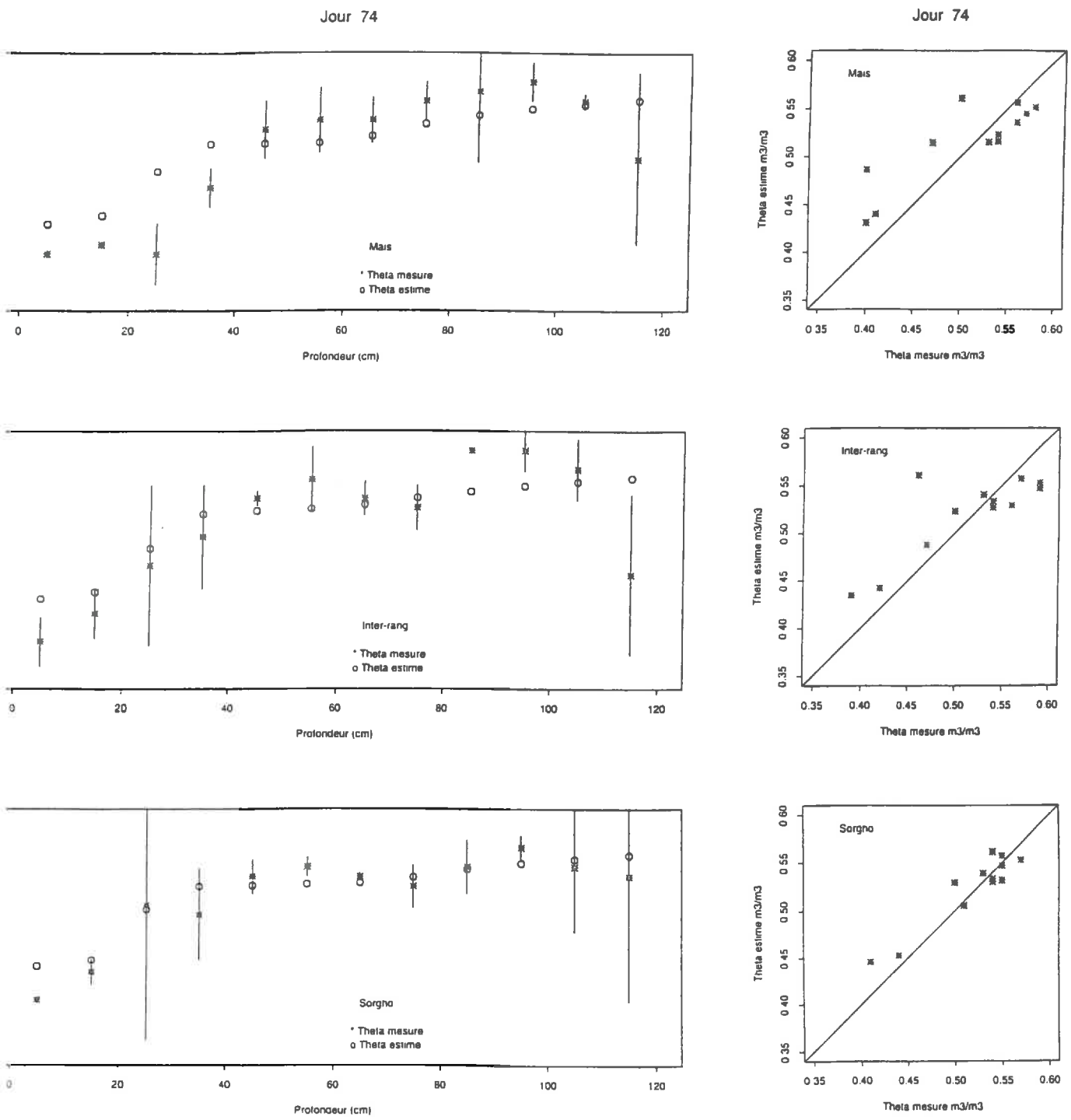
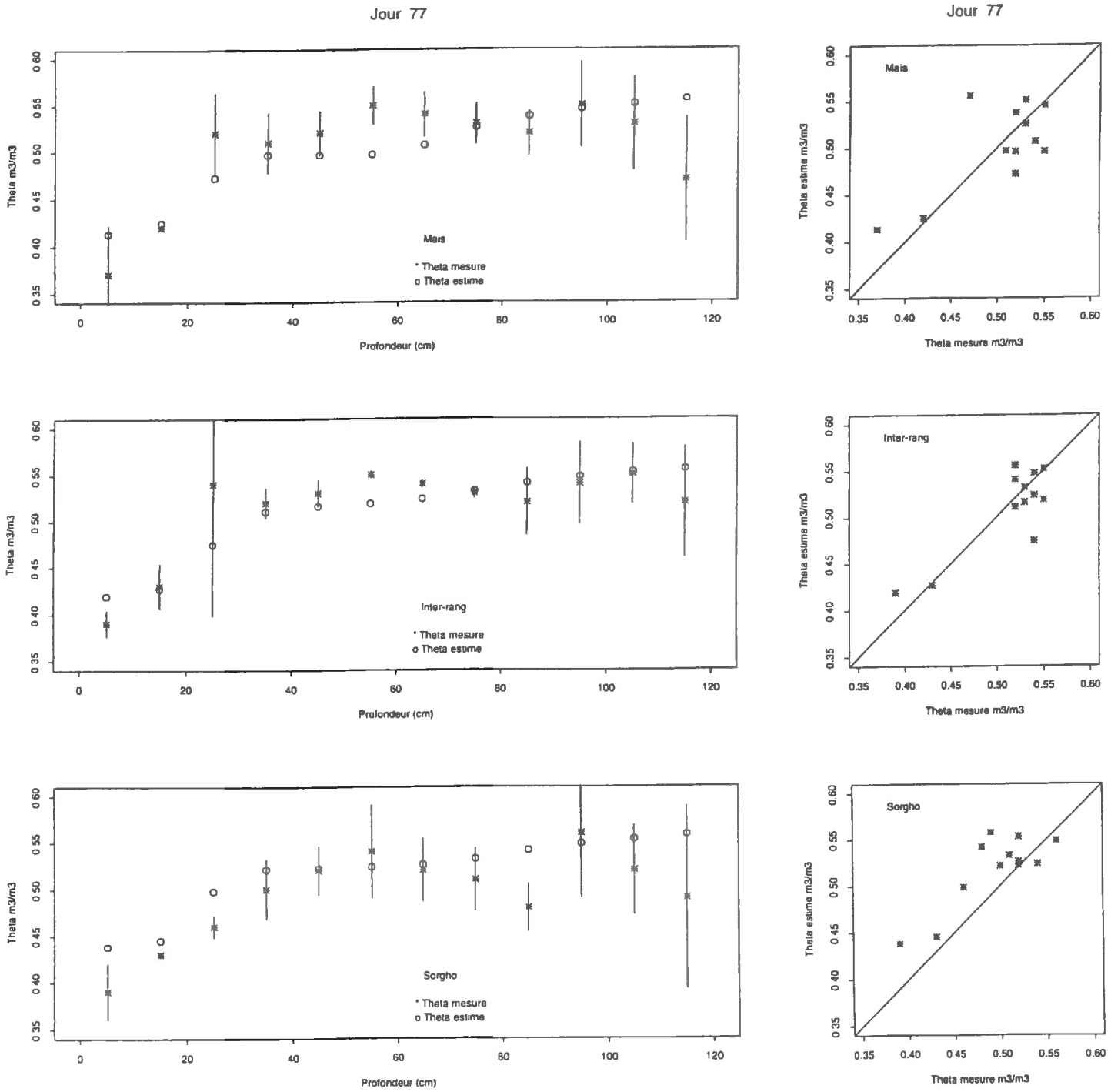


Figure 20 Confrontation des profils de teneur en eau estimés et mesurés dans les rangs de maïs, de sorgho et l'inter-rang (jour 77)



la surface. Les teneurs en eau volumiques estimées par le modèle sont les moyennes des teneurs en eau volumiques calculées dans des domaines ainsi délimités. Les figures 18, 19 et 20 représentent la comparaison des teneurs en eau calculées et mesurées les jours 70, 74 et 77 à 6 heures du matin, après la redistribution nocturne de l'eau dans le sol.

Les deux jours retenus, les mesures d'humidité du sol montrent une grande variabilité entre 20 et 30 cm. Cette zone correspond à la limite entre l'horizon de surface travaillé et l'horizon sous-jacent non remanié. Ces deux horizons ont des propriétés hydrodynamiques différentes et suivant que la tarière est enfoncée plus ou moins profondément de quelques centimètres, nous pouvons enregistrer de grandes différences de teneur en eau. En profondeur il se produit le même phénomène et vers 1.10 m de profondeur il doit exister un nouvel horizon.

Le jour 70 constitue la situation initiale. Dans les rangs et l'inter-rang, l'horizon de surface est moins humide qu'en profondeur. Cet horizon correspond à une zone de forte densité racinaire et donc de prélèvement hydrique racinaire intense. En profondeur la teneur en eau est relativement homogène. La situation initiale entrée dans le modèle est la moyenne des teneurs en eau de couches de 10 cm sur la zone comprise entre le pied de maïs et de sorgho. Ne pouvant pas prendre en considération cette hétérogénéité horizontale des teneurs en eau du sol, de légers écarts apparaissent entre les teneurs en eau mesurées et simulées dans le rang et l'inter-rang. Ces écarts sont minimes et acceptables pour la poursuite de la simulation.

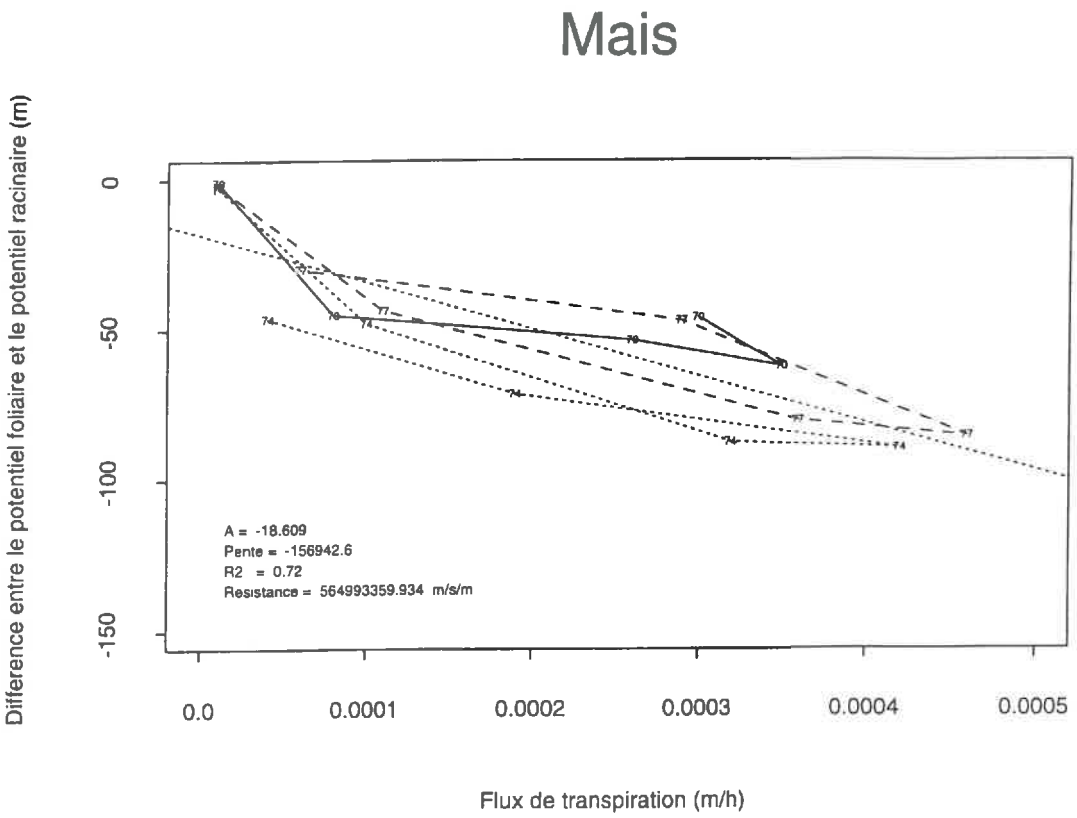
Le jour 74 dans les rangs de maïs et de sorgho, l'horizon de surface s'est asséché en raison de l'absorption racinaire alors qu'en profondeur (<60 cm) la teneur en eau du sol varie peu. Les 30 premiers centimètres correspondent à la zone où la densité racinaire est la plus élevée et où le prélèvement hydrique est le plus intense. La demande climatique du maïs étant supérieure à celle du sorgho, la zone racinaire du maïs s'assèche beaucoup plus vite que celle du sorgho. Il apparaît alors un gradient de teneur en eau du sol entre le rang de maïs et de sorgho sur les 60 premiers centimètres de profondeur. Les teneurs en eau de l'inter-rang dans cette zone sont intermédiaires entre celles du rang de maïs et du rang de sorgho.

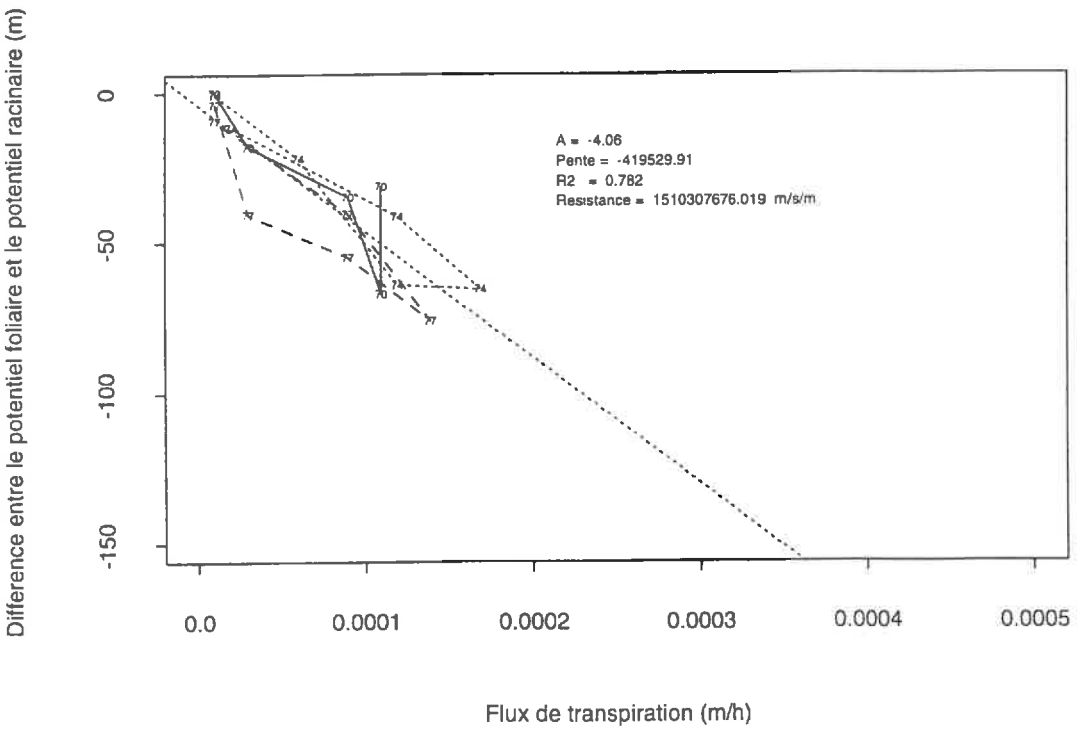
Le jour 77 les teneurs en eau ont diminué en profondeur sur les rangs et l'inter-rang. Les prélèvements les plus importants ont été réalisés par le maïs, ce qui est en accord avec la demande évaporative supérieure qui lui est imposée. Pour le rang de maïs les points estimés coïncident bien avec les points mesurés, excepté aux profondeurs 65 cm et 115 cm. Pour le rang de sorgho le modèle surestime les teneurs en eau en surface. Cet écart peut être causé par l'évaporation du sol négligée par le modèle. Cet effet est plus prononcé dans le rang de sorgho, car sa couverture aérienne est moins développée que celle du maïs.

Le modèle restitue parfaitement les tendances observées pour l'évolution des teneurs en eau du sol. L'essentiel des points estimés se situe dans l'intervalle de confiance (risque d'erreur de 5%) des mesures de terrain. Cependant en surface (20 premiers cm), les teneurs en eau sont surestimées. L'évaporation à la surface du sol n'est pas prise en considération par le modèle. Or celle-ci peut contribuer à abaisser la teneur en eau sur les 10 à 20 premiers cm. L'évaporation de surface pourrait jouer un rôle de compétiteur vis à vis de l'absorption hydrique des deux espèces en présence. Ce phénomène devrait intervenir essentiellement au niveau de l'inter-rang où le rayonnement a la plus grande probabilité de parvenir jusqu'au sol et en particulier durant les stades jeunes.

En profondeur les écarts entre la teneur en eau simulée et celle mesurée sont dus à la condition de flux nul en profondeur imposée au modèle. En réalité des remontées capillaires ou des drainages en profondeur peuvent se produire. Ces phénomènes sont courants dans ce type de sol.

Figure 21 Différences de potentiel hydrique entre les feuilles et les racines en fonction du flux de transpiration et estimation d'une résistance moyenne de la plante.





Une des voies d'amélioration des prévisions du modèle sera d'incorporer des conditions de flux non nuls aux limites. Des apports d'eau par des pluies avec la prise en considération d'écoulements préférentiels le long des tiges, ou par des remontées capillaires d'eau des horizons profonds ou des nappes phréatiques devront être ajoutés au stock d'eau du sol et redistribués. De même des pertes d'eau par évaporation à la surface du sol ou par drainage en profondeur devront être prises en considération.

Au niveau du sol, les écarts entre les prévisions et les mesures des teneurs en eau sont minimes. Nous pouvons avancer que les méthodes utilisées pour la détermination des propriétés hydrodynamiques du sol (la courbe de rétention établie par plaque de tension ou chambre à pression, et la courbe de conductivité hydraulique par la méthode Wind) sont bien adaptées pour le fonctionnement du modèle, malgré les réserves que nous avions émises sur la précision de l'estimation des paramètres du modèle de Mualem-Van Genuchten.

Prévision des potentiels racinaires

Ayant des mesures de potentiel foliaire au cours des journées 70, 74 et 77 et des estimations par le modèle du potentiel racinaire, nous pouvons calculer les résistances des plants de maïs et de sorgho et les confronter à des données bibliographiques.

La figure 21 présente l'évolution des différences de potentiel hydrique entre les racines et les feuilles en fonction du flux de transpiration.

$$\Delta\psi = R_{plante} \cdot (\text{flux de transpiration})$$

La pente de la régression linéaire fournie la résistance de la plante. Pour le maïs, $R_{maïs}$ moyenne est égale à $0.56\ 10^9$ m/s/m. Pour le sorgho R_{sorgho} moyenne est égale à $1.51\ 10^9$ m/s/m. Ces deux valeurs sont assez proches de celles proposées par Neumann *et al.* en 1973 (10^9 m/s/m pour le maïs). A titre de référence les résistances totales de différentes plantes sont proposées :

Tournesol	$0.65\ 10^9$ m/s/m	Boyer, 1979
Tournesol	$1.05\ 10^9$ m/s/m	Black, 1974
Soja	$1.60\ 10^9$ m/s/m	Boyer, 1979
Haricot	$0.50\ 10^9$ m/s/m	Boyer, 1979

Les ordres de grandeur de la résistance moyenne de la plante calculés sont en accord avec ceux de la littérature. Ici la résistance globale moyenne sur la période étudiée du sorgho est supérieure à celle du maïs.

Les courbes sur la figure 21 sont en forme de boucle. Elles mettent en évidence que pour un même flux de transpiration, le gradient de potentiel entre les feuilles et les racines est plus élevé l'après-midi que le matin. Plusieurs hypothèses pour expliquer ce phénomène déjà enregistré sur des mesures au champ (Katerji et Cruziat, 1985) peuvent être avancées :

1 / La présence de résistances en phase liquide variables.
2 / La mise en jeu des "réservoirs de la plante" qui se vident ou se remplissent.

Sur la figure 13 b, nous pouvons constater qu'il existe un décalage dans le temps du flux d'absorption et du flux de transpiration. Le potentiel foliaire s'abaisse avant le potentiel racinaire. La plante commence à satisfaire la demande climatique avant qu'un gradient de potentiel se soit établi entre les racines et le sol. Les variations de teneur en eau de la plante introduisent des décalages entre les maxima de transpiration et d'absorption (Saugier, 1982; Ripley & Saugier, 1975).

Conclusion

Les comparaisons entre les prévisions du modèle et les mesures de terrain montrent que le modèle est bien adapté pour l'estimation de l'évolution des teneurs en eau du sol dans l'espace et le temps dans des situations de cultures associées. La procédure de calcul quasi simultanée des potentiels racinaires du maïs et du sorgho aboutit à des résultats satisfaisants, même si elle ne reproduit pas exactement ce qui se passe dans la réalité.

Par contre au niveau aérien, le modèle dans sa version actuelle ne permet pas de prédire l'évolution des flux transpiratoires. La définition des variables du modèle doit être revue. La demande climatique affectée à chaque espèce représente "une demande de flux d'absorption potentielle maximale". Ce que nous avions appelé évapotranspiration réelle est en réalité le "flux d'absorption racinaire réel", conditionné par la demande d'absorption maximale et la disponibilité de l'eau dans le sol. Seul le couplage des prévisions de ces flux d'absorption racinaire avec le transport de l'eau des racines vers les feuilles et l'atmosphère permettra de connaître le flux transpiratoire réel. Mais comme nous l'avons signalé, les processus impliqués sont complexes et soumis à des régulations qui interagissent.

Les flux d'absorption racinaire étant convenablement prédits, nous allons utiliser ce modèle pour simuler différentes conditions de culture et analyser leur impact sur le bilan hydrique au niveau des zones racinaires de deux plantes d'une association.

5.2. Les scénarios de simulation

5.2.1. Position du problème

L'étude de l'imbrication des systèmes racinaires dans des conditions de cultures associées et de demandes d'absorption racinaires contrastées, est difficile à réaliser par une expérimentation de plein champ ou de laboratoire. L'utilisation du modèle testé précédemment constitue une approche plus aisée pour cette étude. Des scénarios de simulation vont être élaborés pour mettre en évidence l'effet de l'imbrication de systèmes racinaires sur l'évolution des profils hydriques en relation avec des demandes d'absorption contrastées ou pas entre les deux plantes de l'association.

Trois cartes d'impacts racinaires ont été réalisées artificiellement. L'espacement entre les rangs est de 60, 40 et 30 cm (annexe III). Pour construire ces cartes, nous avons fait glisser les deux systèmes racinaires l'un vers l'autre. Un tel scénario suppose qu'il n'y a pas d'adaptation de l'architecture des systèmes racinaires avec la diminution du volume de sol disponible. Bien que peu réaliste, cette hypothèse constituera le point de départ de notre étude.

Les caractéristiques hydrodynamiques du sol retenues sont celles d'un sol limoneux déjà utilisées par Tardieu *et al.* en 1992 (annexe IV). La conductivité hydraulique du sol est relativement élevée.

La demande climatique, que nous appellerons ici la demande d'absorption racinaire maximale (ARM) est fixée à un total de 6 mm/jour/m^2. L'ARM est répartie de la façon suivante : soit 3 mm/j/m^2 pour chaque plante, soit 4 mm/j/m^2 pour la plante 1 et 2 mm/j/m^2 pour la plante 2. Cette dernière situation correspond au cas où la plante 1 possède un couvert plus développé que celui de la plante 2, et par conséquent la domine au niveau aérien. Nous avons opté pour ce choix par rapport aux importances relatives des deux systèmes racinaires (le système racinaire 1 est plus développé que celui de la plante 2 et nous lui avons affecté une demande supérieure).

Après l'étude des résultats des différentes simulations, nous analyserons le fonctionnement hydrique de l'association à partir de certains indicateurs :

Figure 22 Evolution des flux d'absorption et des potentiels racinaires en conditions de cultures pures.

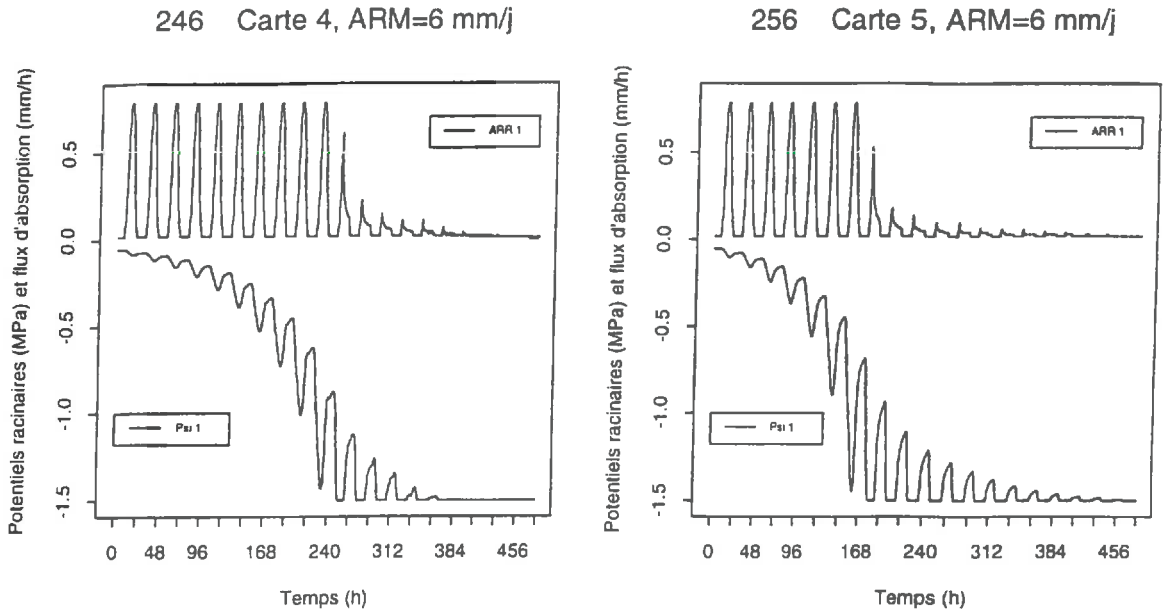


Tableau III Temps d'apparition en heures du stress hydrique pour les 1 et 2 en fonction des différents scénarios de simulation

	Carte 1 Demande 3:3 mm/j/m^2	Carte 2 Demande 4:2 mm/j/m^2
Plante 1	252.1 h	208.1 h
Plante 2	206.6 h	252.6 h

	Carte 2 Demande 3:3 mm/j/m^2	Carte 2 Demande 4:2 mm/j/m^2
Plante 1	254.1 h	253.1 h
Plante 2	252.1 h	253.1 h

	Carte 3 Demande 3:3 mm/j/m^2	Carte 3 Demande 4:2 mm/j/m^2
Plante 1	257.1 h	258.1 h
Plante 2	256.6 h	257.1 h

Carte 4 (Plante 1) Demande 6 mm/j/m^2	Carte 5 (Plante 2) Demande 6 mm/j/m^2
252.4 h	179.9 h

- L'évolution du ratio absorption racinaire réelle / absorption racinaire maximale (ARR/ARM) équivalent du ratio évapotranspiration réelle / évapotranspiration maximale, en fonction de la perte d'eau du sol sur la réserve utile. Cette quantité est calculée entre la capacité au champ (-5 m) et le point de flétrissement permanent (-150 m).

- L'évolution de la résistance aux transferts hydriques entre le sol et les racines en fonction du potentiel hydrique moyen du sol.

Des critères de caractérisation de la répartition des racines seront analysés dans des conditions de cultures associées.

Rappelons que le seuil d'absorption racinaire est fixé ici à - 150 m pour l'ensemble des simulations.

5.2.2. Résultats et discussion

Résultats et analyse des simulations

En cultures pures (carte 4 et carte 5), l'apparition du stress est plus tardive pour la plante 1 par rapport à la plante 2 (fig 22). Ceci s'explique par une différence de colonisation du sol par les systèmes racinaires. La plante 1 présente 225 impacts racinaires tandis que la plante 2 n'en a que 183. Les racines de la plante 1 descendent plus en profondeur et ont ainsi accès à une plus grande quantité d'eau dans le sol (annexe V), ce qui retarde l'apparition du stress (tableau III).

En cultures associées, pour un écartement entre les rangs de 60 cm, et une demande d'absorption de 3 mm/j/m^2 pour chaque plante, le stress se produit en premier sur la plante 2 car elle possède moins de racines. Comparativement aux cultures pures, le déclenchement du stress pour la plante 2 est retardé de 48 heures lorsque celle-ci est associée à la plante 1. Pour la plante 1, la date d'apparition du stress est inchangée.

En se référant à la figure 23 et à l'annexe VI, nous constatons que dans les 60 premiers centimètres de sol la plante 1 puise moins d'eau que la plante 2, car elle a accès à des stocks d'eau en profondeur. Il existe alors un gradient de potentiel matriciel du sol entre le rang de la plante 1 et celui de la plante 2 engendré par les prélèvements dans des zones différentes des deux systèmes racinaires. De l'eau va s'écouler des horizons de surfaces du rang de la plante 1, vers le rang de la plante 2. Cette dernière aura donc accès à une plus grande quantité d'eau du sol par rapport au cas monospécifique. Le déclenchement de son stress sera donc retardé (tableau III).

Lorsque les demandes d'absorption sont de 4 mm/j/m^2 pour la plante 1 et 2 mm/j/m^2 pour la plante 2, le stress apparaît plus tôt pour la plante 1 comparé à une situation où la demande est équitablement répartie. Ceci s'explique par le fait que le flux d'absorption imposé à la plante 1 est plus élevé. Pour la plante 2, au contraire la demande est diminuée et l'apparition du stress retardée.

Ces premiers résultats montrent l'importance de la distribution spatiale des racines sur les prélèvements racinaires. En occurrence, ici pour des demandes d'absorption similaires pour les deux plantes de l'association, mais avec des répartitions racinaires spatiales différentes, nous montrons comment la plante 1 engendre par son prélèvement une situation favorable pour la plante 2. La culture associée dans ce contexte permet une meilleure utilisation des ressources en eau du sol.

Pour des demandes similaires (3:3 mm/j/m^2) lorsque les deux systèmes racinaires sont de plus en plus imbriqués, nous constatons que le déclenchement du stress des deux plantes est de plus en plus tardif. L'intervalle de temps entre les dates d'apparition du stress des deux plantes est de plus en plus réduit (tableau III). Les mêmes résultats sont observés lorsque les demandes sont contrastées. Avec le rapprochement des rangs, la densité augmente car nous avons conservé le

Figure 23 Evolution des flux d'absorption et des potentiels racinaires des plantes 1 et 2 pour différentes situations de cultures associées.

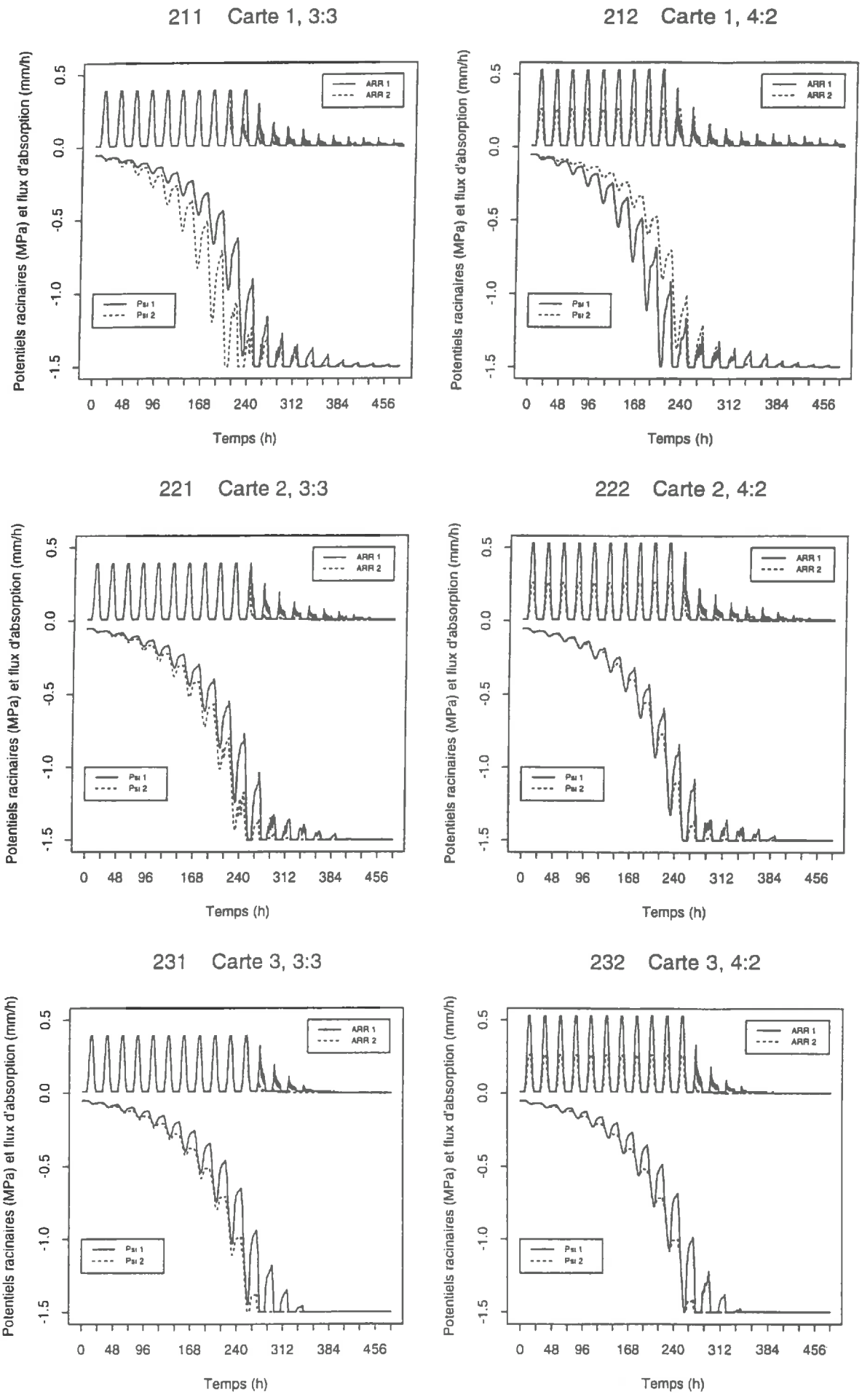
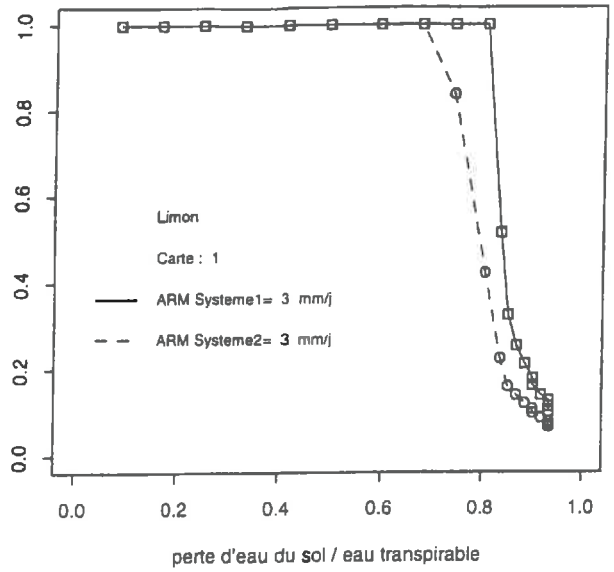
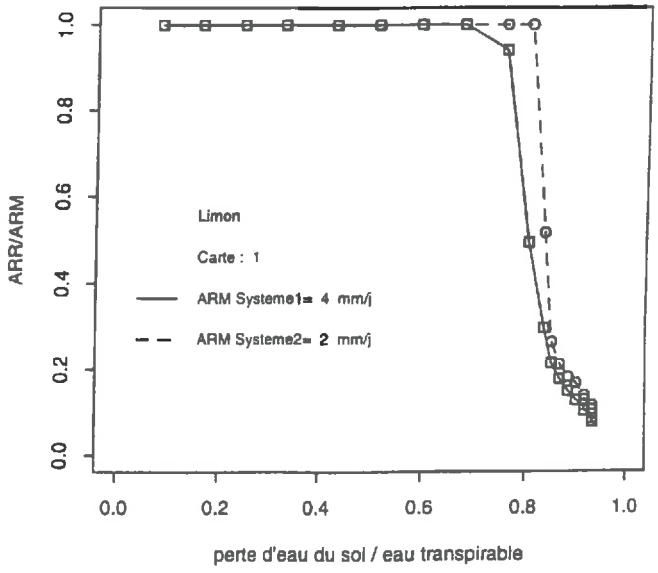


Figure 24 Evolution du ratio ARR/ARM en fonction de la proportion de perte en eau du sol (24 heures entre deux points)

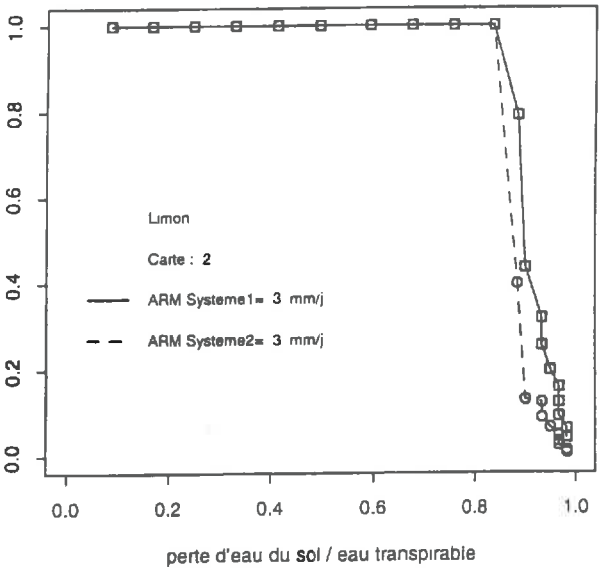
Essai 211



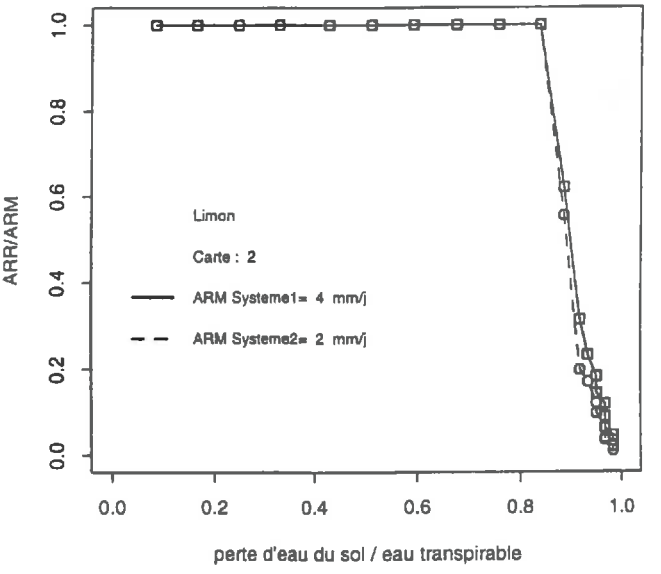
Essai 212



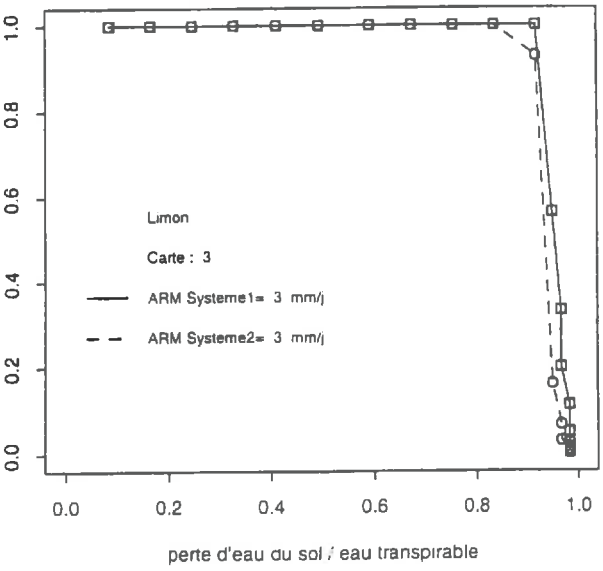
Essai 221



Essai 222



Essai 231



Essai 232

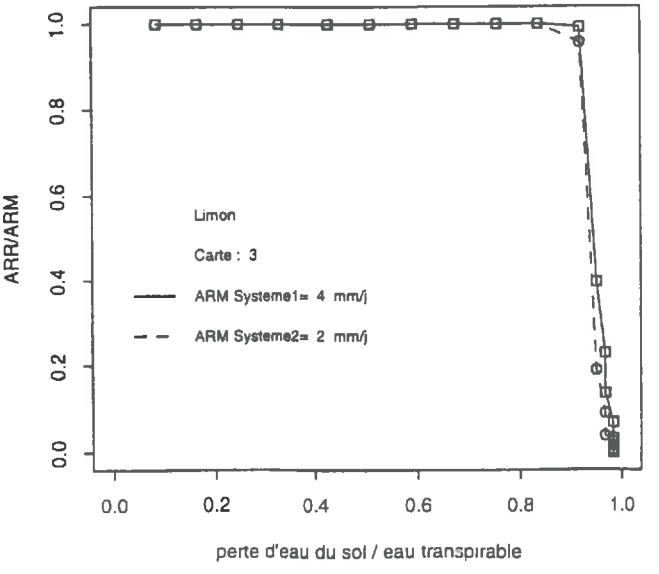


Tableau IV Proportion de perte d'eau du sol à partir de laquelle le ratio ARR/ARM devient inférieur à 1

	Carte 1 Demande 3:3 $mm/j/m^2$	Carte 2 Demande 4:2 $mm/j/m^2$
Plante 1	0.8	0.67
Plante 2	0.67	0.8

	Carte 2 Demande 3:3 $mm/j/m^2$	Carte 2 Demande 4:2 $mm/j/m^2$
Plante 1	0.84	0.84
Plante 2	0.84	0.84

	Carte 3 Demande 3:3 $mm/j/m^2$	Carte 3 Demande 4:2 $mm/j/m^2$
Plante 1	0.92	0.84
Plante 2	0.84	0.84

Figure 25 Evolution de la résistance du sol en fonction du potentiel hydrique du sol (24 heures entre deux points)

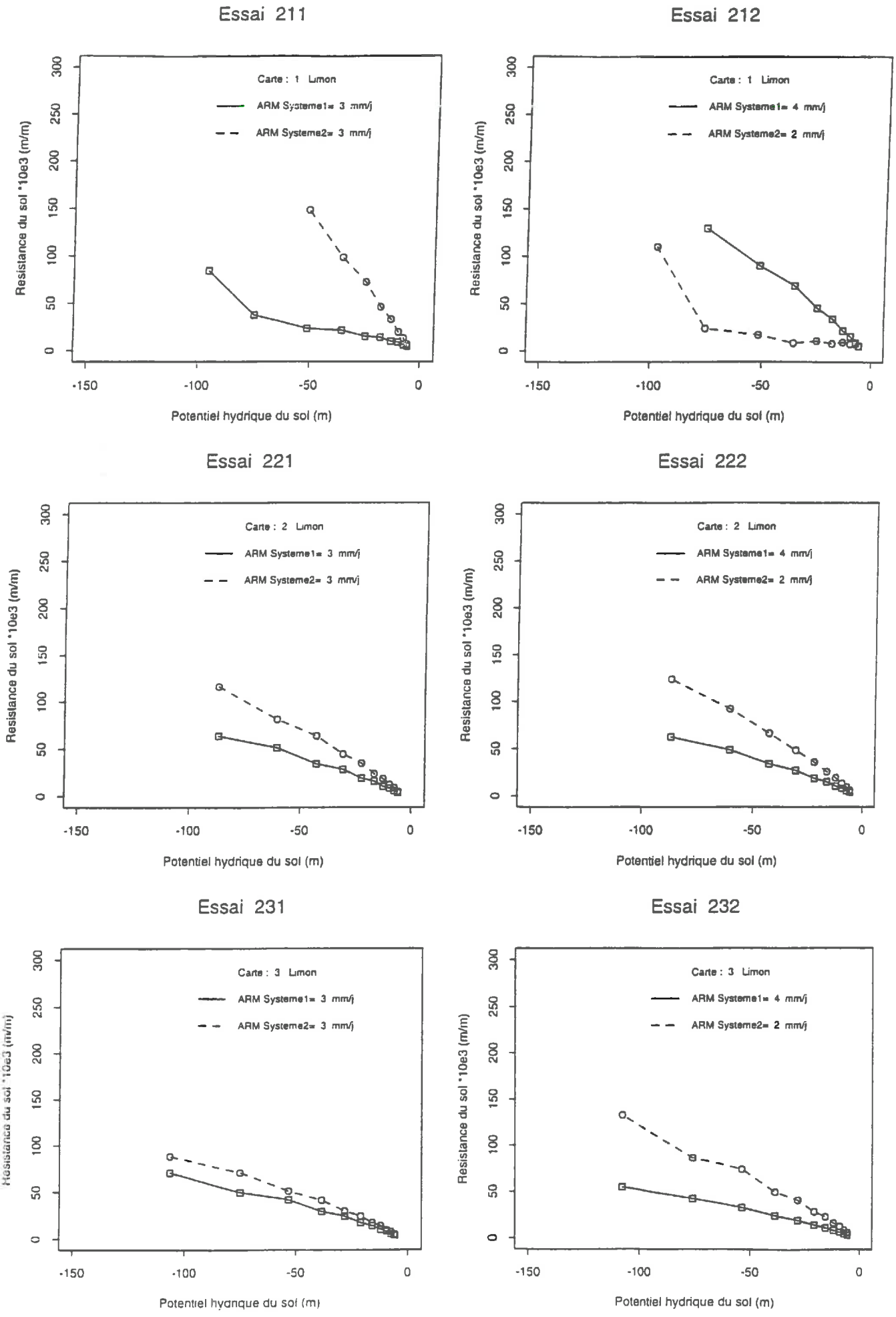
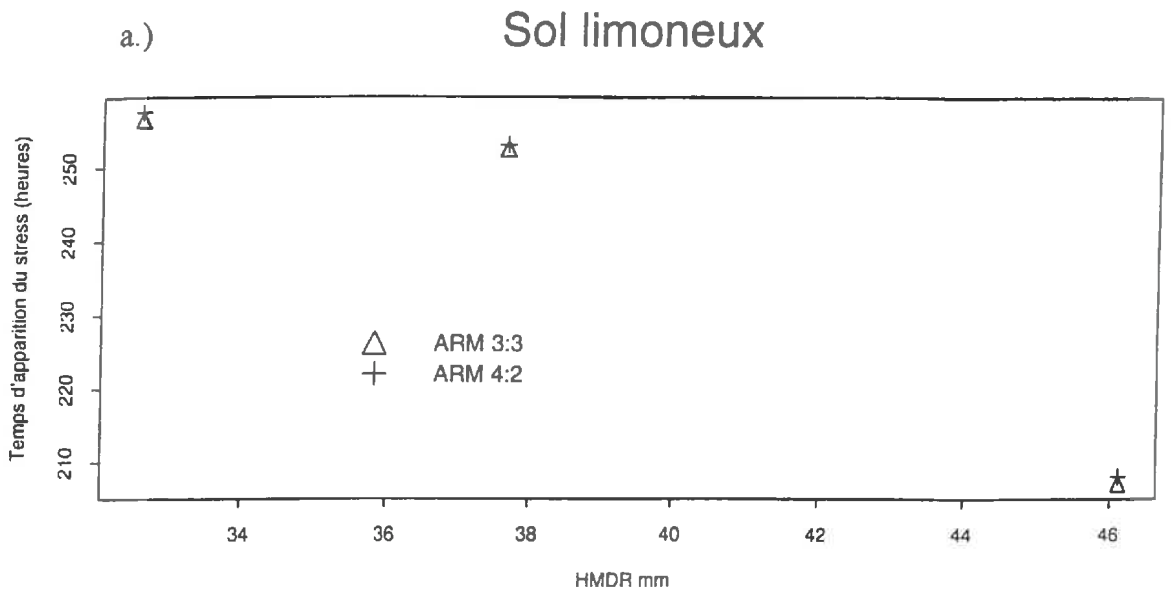
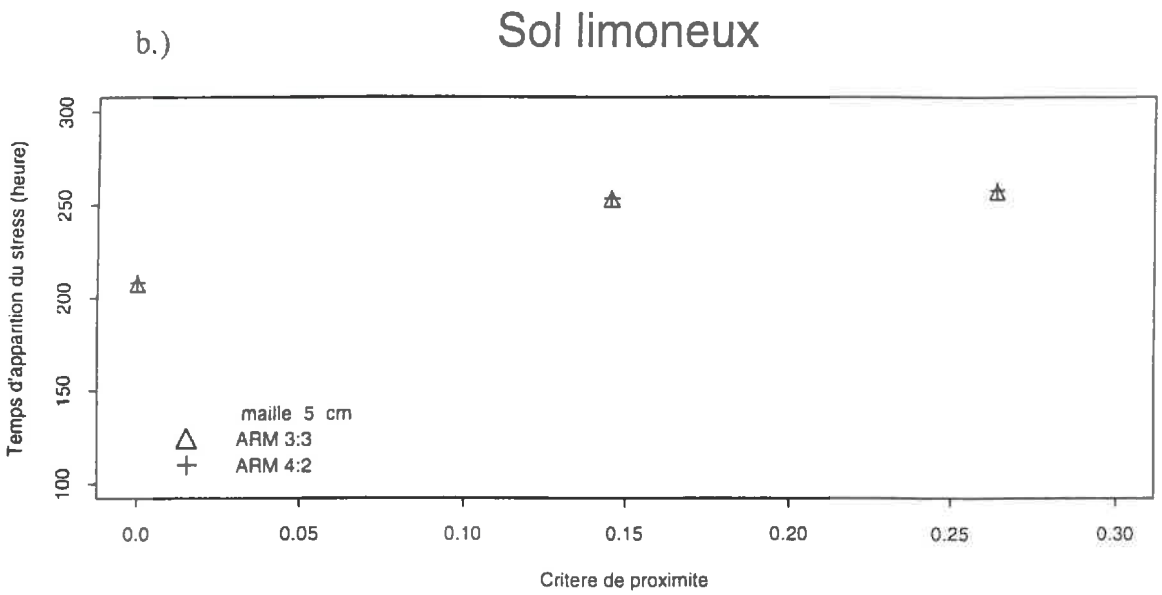


Figure 26 Temps d'apparition du stress sur l'une des plantes en fonction
(a) de la mi-distance moyenne entre les racines
(b) du critère de "proximité"





même nombre de racines pour les plantes. Les gradients de potentiels entre les deux rangs tendent à disparaître. L'accroissement de la densité engendre une meilleure utilisation des ressources en eau du sol. Cependant l'apparition du stress sera plus brutale car il ne reste aucune zone "réservoir hydrique" sur l'ensemble du profil à proximité des racines.

La conductivité hydraulique du sol intervient sur l'intensité des interactions entre les deux systèmes racinaires. Dans notre protocole initial, nous avions prévu d'étudier ces interactions dans des sols avec des caractéristiques hydrodynamiques différentes. Mais en raison de la durée des simulations (10 à 20 jours en moyenne), nous n'avons pas eu le temps de les effectuer.

Si nous devions proposer le choix d'une technique culturale, compte tenu des caractéristiques du sol, de la disposition des racines et des résultats des simulations, nous retiendrions la situation avec un écartement de 40 cm et une demande contrastée. En effet, ici les périodes de stress des deux plantes sont quasiment synchrones et surtout la mise en place du stress est progressive. Opter pour ce choix permet de diminuer le risque encouru pour choisir la date de déclenchement d'une irrigation. Nous pouvons par exemple fixer un délai de 48 heures à partir de la veille de la prévision du stress pour irriguer avant que les dommages causés à la plante soient trop importants. Ces propositions ne sont qu'indicatives et fournissent un exemple d'application du modèle.

Etude de quelques indicateurs du fonctionnement hydrique des plantes

Sur la figure 24, nous constatons que la diminution du ratio ARR/ARM en fonction de la perte d'eau du sol est dépendante de la demande ARM. Plus la demande est forte, plus la baisse du ratio se produira pour des pertes en eau du sol relatives plus basses (tableau IV). L'augmentation de la demande induit une moindre utilisation des réserves en eau du sol. Ce résultat est en accord avec ceux de Tardieu et Manichon, 1986 observés sur des cultures pures.

Avec le rapprochement des rangs, les comportements hydriques des deux plantes deviennent similaires malgré des architectures racinaires légèrement différentes. Les racines des deux plantes étant très proches, elles sont dans un environnement hydrique similaire. Les propriétés des racines fixées dans le modèle (notamment même seuil d'absorption) sont les mêmes pour les deux plantes. Par conséquent les prévisions des flux d'absorptions des racines avec les mêmes propriétés et dans les mêmes conditions hydriques seront peu différentes. Plus les systèmes sont imbriqués, plus on se rapproche d'une situation correspondant au fonctionnement d'un système racinaire unique. Les plantes utilisent une plus grande partie de la réserve en eau du sol. Ceci est lié à l'augmentation de la densité racinaire, à la colonisation plus importante du profil et surtout à la meilleure exploitation de l'eau sur des pas de temps courts.

La résistance du sol est calculée à partir de la formule suivante :

$$R_{sol} = |\psi_{sol} - \psi_{rac}| / ARR \text{ en } m.s.m^{-1}$$

La figure 25 présente l'évolution de la résistance du sol en fonction du potentiel hydrique du sol pour les différents scénarios. Pour un espacement de 60 cm entre les rangs, nous observons que la résistance du sol augmente plus et plus tôt avec une demande d'absorption plus forte. Ces résultats se retrouvent pour les plantes 1 et 2. Pour un écartement de 40 cm, la résistance est inchangée avec l'augmentation de la demande. Pour un écartement de 30 cm, la résistance correspondant à un même potentiel matriciel du sol diminue avec une augmentation de la demande.

Seule la situation où l'écartement entre les rangs est de 30 cm, est en accord avec le formalisme Ohmique (une diminution de la résistance induit une augmentation du flux). Ces résultats contrastés suivant l'écartement montrent que la notion de potentiel matriciel moyen du sol dans des situations de cultures associées ne peut être appliquée de façon générale. En effet de grandes différences de potentiel matriciel du sol existent entre les zones racinaires de la plante 1, de la plante 2 et la profondeur. Ceci montre l'importance de l'hétérogénéité des teneurs en eau et de la distribution des racines dans le profil sur le calcul des flux d'absorption racinaire par le modèle.

Ces résultats montrent que comme l'avaient déjà mis en évidence Tardieu *et al.* (1992) dans le cas de cultures pures que l'arrangement spatial joue un rôle essentiel sur les relations hydriques entre le sol et les racines. Nous avons donc étudié un critère "classique" de caractérisation de l'enracinement pour des cultures pures. La demie distance moyenne entre les racines HMDR est déterminée à partir de la carte d'impacts racinaires. La formule retenue est celle proposée par Gardner (1960) et Newman (1969).

$$HMDR = 2(\pi\lambda)^{-0.5}$$

λ est le nombre d'impacts racinaires total divisé par la surface du profil (largeur * profondeur). D'autres formules existent pour calculer HMDR, mais elles fournissent des résultats similaires (Tardieu & Manichon, 1986).

Le temps d'apparition du stress sur l'une ou l'autre des plantes est inversement proportionnel à la HMDR et ceci quel que soit la répartition de la demande climatique (fig 26.a). Ce résultat est en accord avec ceux de Tardieu & Manichon, 1986. Une HMDR réduite correspond des racines très proches les unes des autres. L'exploitation des réserves en eau du sol sera supérieure, mais la mise en place du stress sera plus brutale. Dés le début du stress la plante ne pourra quasiment plus absorber d'eau.

Ce critère par son calcul ne permet pas de distinguer les comportements contrastés des deux systèmes racinaires.

Nous avons alors essayé d'élaborer un nouveau critère capable de rendre compte de la proximité des deux systèmes racinaires afin d'analyser l'interaction éventuelle entre ces derniers. Nous avons quadrillé les cartes racinaires. Chaque maille de la grille mesure 5 cm de coté. Nous avons compté le nombre de mailles comportant au moins une racine de la plante 1 et au moins une racine de la plante 2. Ce nombre est divisé par le nombre total de mailles afin de pouvoir comparer les différentes cartes entre elles. Nous avons appelé arbitrairement ce critère : "critère de proximité" (fig 26.b).

Plus ce nombre est élevé, plus le nombre de cases contenant à la fois une racine de chaque plante est élevé, et les interactions du fait de la proximité des racines des deux systèmes seront probables.

D'après les résultats des simulations le temps d'apparition d'un stress sur l'une ou l'autre des plantes augmente avec le "critère de proximité". Nous pouvons donc émettre l'hypothèse que le rapprochement des rangs contribue à retarder le déclenchement d'un stress par une utilisation plus poussée de l'eau du sol, mais l'apparition du stress sera alors brutale.

Les différentes conclusions de cette analyse sont à considérer avec précaution. Pour les valider, il faudrait réaliser des tests dans des situations prenant en compte l'adaptation des systèmes racinaires avec le rapprochement entre les rangs.

6. Conclusions générales et perspectives

Cette étude a permis de confronter les prévisions du modèle d'absorption hydrique racinaire dans le cas de cultures associées à des données expérimentales. Un apport majeur de ce modèle par rapport aux précédents modèles d'absorption racinaire recensés dans la bibliographie, est qu'il permet de simuler l'évolution simultanée des potentiels racinaires de deux plantes d'une association culturale. Il prédit ainsi l'absorption hydrique racinaire de chacune des plantes.

Nous avons montré que le modèle permet une bonne prédiction de l'évolution des teneurs en eau du profil de sol. Toutefois des améliorations sont envisageables. Les conditions de flux nuls aux limites du profil devront être supprimées. Des apports d'eau de pluie ou des départs d'eau par évaporation directe à la surface du sol devront être incorporés dans le calcul des teneurs en eau du sol. Pour cela il faudra tenir compte de la répartition hétérogène de ces flux à la surface du sol. De même dans le sol des remontées capillaires d'eau, ou bien le drainage en profondeur devront être inclus dans le bilan hydrique du sol.

La comparaison des données de l'expérience des prédictions du modèle a permis de montrer que le modèle ne prédisait pas les flux de transpiration des plantes, mais bien des flux d'absorption hydrique racinaire dépendants de la demande climatique qui lui est appliquée. La distinction est importante. Le modèle ne calcule pas les flux d'eau dans la plante depuis les racines vers les parties aériennes et vers l'atmosphère. Une des avancées envisageable du modèle serait de relier les flux d'absorption racinaire aux flux de transpiration de la plante.

A partir de quelques scénarios de simulation, nous avons montré comment au moyen du modèle nous pouvions envisager l'étude des interactions entre les racines de plantes associées pour différents niveaux d'imbrication et de répartition de la demande climatique. Il serait intéressant de faire varier également les propriétés hydrodynamiques du sol et d'étudier les phénomènes de compétition pour l'alimentation hydrique qui en découlent.

Le prélèvement racinaire est très dépendant de la distribution des racines dans le profil de sol. La modélisation de la croissance et du développement des racines dans des conditions de cultures associées pourrait fournir des cartes racinaires proches de la réalité. Des bases de modélisation existent pour un seul système racinaire (Pagés et Ariés, 1988) et pourraient être reprises pour des cultures associées. De tels modèles permettraient de multiplier les scénarios de simulation d'absorption racinaire pour différentes architectures racinaires de cultures associées.

Cette étude a porté sur une partie des transferts sur le continuum sol-plante-atmosphère dans des conditions de cultures associées. Elle a contribué à tester une approche de modélisation du prélèvement racinaire en présence de deux plantes différentes. Cet outil aidera à la compréhension et à l'analyse les interactions souterraines entre deux systèmes racinaires pour l'alimentation hydrique.

7. Bibliographie

ACOCK B., JUO A., 1988. Modelling the alley cropping system. Agron. Abstr., *American society of Agronomy*, Madison, Wisconsin, USA, 51.

ADEOYE K. B. & RAWLINS S. L., 1981. A split root technique for measuring root water potential. *Plant Physiol*, 68, 44-47.

ALTIERI M. A., 1987. Agroecology : The Scientific Basic of Alternative Agriculture. Westview Press (Boulder) /I.T. Production (London), 227 p.

AZAM-ALI S. N., 1995. Assessing the efficiency of radiation use by intercrops.Ecophysiology of tropical intercropping, ed INRA, 306-318.

BALDY C. M., STIGTER C. J., 1993. Agrométorologie des cultures multiples en régions chaudes. *Coll. du labo au terrain*. INRA éditions, 248 p.

BARET F., OLIOSO A., LUCIANI J. L., 1992. Root biomass fraction as a function of growth degree days in wheath. *Plant and Soil*, 140 (1), 137-144.

BLACK C. R., 1974. The resistances to transpirational waterflow in : sunflower plants. Ph. D. thèse, Depart. Bot. Univ. Aberdeen (U.K.)

BLACKMAN P. G., DAVIES W. J., 1985. Root to shoot communication in maize plants and the effects of soil drying. *J. Exp. Bot.*, 36, 39-48.

BOYER J. S., 1971. Resistances to water transport in soybean, bean and sunflower. *Crop Sci.*, II (3), 403-407.

BOYER J. S., 1985. Water transport. *Ann Rev. Plant Physiol.*, 36, 473-516.

BROWNING J. A., FREY K. J., 1969. Multiline cultivars as a mean of disease control. *Ann. Rev. Phytopatholog.*, 7, 355-382.

BRUCKLER L., LAFOLIE F., TARDIEU F., 1991. Modelling root water potential and soil-root water transport : II Field comparisons. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55, 1213-1220.

CARDON G. E., LETEY J., 1992. Plant water uptake terms evluated for soil water and solute movement models. *Soil Sci. Am. J.*, 32, 1876-1880.

CALDWELL R. M., 1995. Simulation models for intercropping systems. Ecophysiology of tropical intercropping, ed INRA, 353-368.

CLAUSNITZER V. & HOPMANS J. W., 1994. Simultaneous modeling of transient three-dimensional root growth and soil water flow. *Plant and Soil*, 164, 299-314.

COLMET-DAAGE F., CUCALON F., DELAUNE M., GAUTHEYROU J. et M., MOREAU B., 1967. *Cah. ORSTOM, sér. Pédologie*, V(1), 3-38.

DAWIES W. J., ZHANG J., 1991. Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil. *Annu. Rev. Plant Phys. Mol. Biol.*, 42, 55-76.

DAWIES W. J., TARDIEU F., TREJO C. L., 1994. How do chemicals signals work in plants that grow in drying soil ? *Plant. Physiol.*, 104, 309-314.

DIRKSEN C., & RAATS P. A. C., 1985. Water uptake and release by alfalfa roots. *Agron. J.* 77, 621-626.

EAVIS B. W., 1972. Soil physical conditions affecting seedling root growth. *Plant and Soil.* 36, 613-622.

FEDDES R. A., BRESLER E., NEUMAN S. P., 1974. Field test of a modified numerical model for water uptake by root systems. *Water Ressour. Res.*, 10, 1199-1206.

FEDDES R. A., KOWALIK P. J., MALINKA K. K., ZARADNY H., 1976. Simulation of field water uptake by plants using a soil water dependent root extraction function. *J. Hydrol.*, 31, 13-26.

FERNANDEZ C. J., Mc CREE K. J., 1991. Simulation model for studying dynamics of water flow and water status in plants. (morphological homeostasis concept). *Crop Sci.*, 31, 391-398.

FRANCIS C. A., 1986. Multiple Cropping Systems. *Macmillan Publishing Compagny*, New York, USA.

GARDNER W. R., 1960. Dynamics aspects of soil water avaibility to plants. *Soil Sci.*, 89, 63-73.

GARDNER W. R., 1964. Relation of root distribution to water uptake and avaibility. *Agron. J.*, 56, 41-45.

GLINKA Z., 1973. Abscissic acid effect on root exudation related to increased permeability to water. *Plant Physiol.* 51, 217-219.

GRAF B., GUTIERREZ A. P., RAKOTOBE O., ZAHNER P., DELUCCHI V., 1990. A simulation model for the dynamics of rice growth and development : Part II The competition with weeds for nitrogen and the light. *Agric. Syst.*, 32, 367-392.

GRANT R. F., 1992. Simulation of competition among plant populations under different managements and climates. *Agron. Abstr.*, American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA, 16.

GREACEN E. L., PONSANA P., BARLEY K. P., 1976. Resistance to water flow in the roots of cereals. *In : Water and plant life, Lange O. L., & al éd., Ecol. Stud. 19, Springer Verlag Berlin*, 86-100.

GREENWOOD D. J., GERWITZ A, STONE DA, BARNES A., 1982. Root development of vegetable crops. *Plant Soil*, 68, 75-96.

GRIGNON C., TOURAINE B., 1981. les fonctions de transport de la racine. I. Les fonctions de prélèvement. *Physiol. Veg.*, 19, 443-462.

HABIB R., PAGES L., JORDAN M.O., SIMONNEAU T., SEBILLOTTE M., 1991. Approche à l'échelle du système racinaire de l'absorption hydro-minérale. Conséquences en matière de modélisation. *Agronomie*, 11, 623-643.

HANSEN G. K., 1974. Resistance to water flow in soil and plants, plant water status, stomatal resistance and transpiration of Italian ryegrass as influenced by transpiral demand and soil water depletion. *Acta Agric. Scand.* 24, 83-92.

HERKERRAT W. N., MILLER E. E., GARDNER W. R., 1977a. Water uptake by plants : I. Divided root experiments. *Soil Sci. Am. J.*, 41, 1033-1038.

HERKERRAT W. N., MILLER E. E., GARDNER W. R., 1977b. Water uptake by plants : II. The root contact model. *Soil Sci. Am. J.*, 41, 1039-1043.

HILLEL D., 1974. L'eau et le sol : principes et processus physiques. *Ed Vander*, 288 p.

HILLEL D.,VAN BEEK C. G. E. M., TALPAZ H., 1975. A microscopique-scale model of soil water uptake and salt movement to plant roots. *Soil Sci.*, 120, 385-399.

JENSEN R. D., TAYLOR S. A., WIEBE H. H., 1961. Negative transport and resistance to water flow through plants. *Plants Physiology*, 36, 633-638.

KATERJI N., CRUZIAT P., 1985. Etats et transferts hydriques chez les végétaux. Quelques faits et problèmes. *In : Les besoins en eau des cultures. Conférence internationale, Paris, 11-14 Sept. 1984, INRA, Paris*, 35-54.

KINIRY J. R., WILLIAMS J. R., GASSMAN P. W., DEBAEKE P., 1992. A general, process-oriented model for two competing plant species. *Trans. ASAE*, 35, 801-810.

KLEPPER B., 1990. Root and water uptake. *Adv. Agronomy*, 30, 281-322.

KROPFF M. J., LOTZ L. A. P., 1993. Model simplification and applications. In : M. J. Kropff, H. H. van Laar (Ed), *Simulation of Interplant Competition*. CAB International.

LAFOLIE F., BRUCKLER L., TARDIEU F., 1991. Modeling root water potential and soil-root water transport : I Model presentation. *Soil Sci. Am. J.*, 55, 1213-1220.

LOCKHART J. A., 1965. An analysis of irreversible plant cell elongation. J. Theor. Biol., 8, 264-275.

LOWENBERG-DEBOER J., KRAUSE M., DEUSON R., REDDY K. C., 1991. Simulation of yield distributions in millet-cowpea intercroppping. *Agric. Syst.*, 25, 471-487.

MC COY E. L., BOERSMA L., UNGS M. L., AKRATANAKUL S., 1982. Toward understanding soil water uptake by plant roots. *Soil Sci.*, 137, 69-77.

MC MURTRIE R., WOLF L., 1983. A model of competition between trees and grass for radiation, water and nutriments. *Ann. Bot.*, 52, 449-458.

MAERTENS C., 1986. Soja : Système racinaire et exploitation du sol. In : *Le Soja - CETIOM* Ed. 33-37.

MOLZ F. J., REMSON I., 1970. Extraction term models of soil moisture use by transpiring plants. *Water Ressour. Res.*, 6, 1346-1356.

MOLZ F. J., 1981. Models of water transport in the soil plant sytem : A review. *Water Resour. Res.*, 17, 1245-1260.

MONTEITH J. L., 1985. Evaporation from land surfaces : Progress in analysis and prediction since 1948. In "Advances in Evapotranspiration". *Proc. Natl. Conf. on Advances in Evapotranspiration*, Chicago. 16-17 Déc. ASAE, St. Joseph, MI, 250-258.

MUALEM Y., 1976. A new model for predicting the hydrolic conductivity of unsatured porus media. *Water Ressour. Res.* 12:513-522.

NEUMANN H. H., THURTELL G. W., STEVENSON K. R., BEADLE C. L., 1973. Leaf water content and potential in corn, sorghum, soybean, and sunflower. *Can. J. Plant Sci.* 54, 185-195.

NEUMANN H. H., THURTELL G. W., STEVENSON K. R., 1974. In situ measurements of leaf water potential and resistance to water flow in corn, soybean, and sunflower at several transpiration rates. *Can. J. Plant Sci.*, 54, 175-184.

NEUMAN S. P., FEDDES R. A., BRESLER E., 1975. Finite element analysis of two-dimensional flow in soils considering water uptake by roots, I.Theory. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 39, 224-230.

NEWMAN I. E., 1969. Resistance to water flow in soil and plant. I - Soil resistance in relation amounts of root. Theorical estimates. II - A review of experimental evidence on the rhizosphere resistance. *J. Appl. Ecol.*, 6, 1-12, 261-272.

NIMAH M. N., HANKS R. J., 1973a. Model for estimating soil water, plant and atmospheric interrelations, I.Description and sensivity. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 37, 522-527.

NIMAH M. N., HANKS R. J., 1973b. Model for estimating soil water, plant and atmospheric interrelations, II. Field test of model. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 37, 528-532.

NORMAN M. J. T., PEARSON C. J., SEARLE P. G. E., 1984. The ecology of tropical food crops. Cambridge Univ. Press, 369 p.

ONG C. K., 1995. The 'dark side' of intercropping : manipulation of the soil resources. Ecophysiology of tropical intercropping, ed INRA 45-65.

OZIER-LAFONTAINE H., BRUCKLER L., LAFOLIE F., CABIDOCHE Y. M., 1995. Modelling root competition for water in mixed crops : a basic approach. Ecophysiology of tropical intercropping, ed INRA 175-187.

PAGES L., & ARIES F., 1988. SARAH, modèle de simulation de la croissance, du développement et de l'architecture des systèmes racinaires. *Agronomie (Paris)*, 8, 889-896.

PAPENDICK R. I., SANCHEZ P. A., TRIPLETT E. B., 1976. Multiple cropping. ASA special publication N° 27, Madison, 378 p.

PARCEVAUX S. de, PAYEN D., BROCHET P., SAMIE Ch., HALLAIRE M., MERIAUX S., 1990. Dictionnaire encyclopédique d'agrométéorologie. CILF-INRA-METEOFRANCE, Ed. 323 p.

PASSOURIA J. B., 1982. Water in the soil-plant-atmosphere continuum. *In : Encyclopedia of plant physiology, New serie*, 12B, 5-30.

PASSOURIA J. B., 1988. Water transport in and to roots. *Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.*, 39. 245-265.

RAATS P. A. C., 1976. Analytical solution of a simplified flow equation, Trans. *ASAE*, 19, 683-689.

RICHARDS L. A., 1931. Capillary conduction of liquids through porus mediums. *Physics (NY)*, 1, 318-333.

RIPLEY E. A. & SAUGIER B., 1975. Energie and mass exchange of a native grassland in Saskatcheman. In : D. A. De Vries et N. H. Afgan, ed. *Heat and mass transfer in the biosphere*. Scripta Book, John Wiley, 311-325.

ROWSE H. R., STONE D. A., 1978. Simulation of water distribution in soil. I. Measurement of soil hydraulic properties and the model for an uncropped soil. *Plant Soil*, 49, 517-531.

ROWSE H. R., STONE D. A.., GERWITZ A., 1978. Simulation of water distribution in soil. II. The model for cropped soil and its comparison with experiment. *Plant Soil*, 49, 533-550.

SAUGIER B., 1982. Photosynthèse et production : principes de modélisation et application à la prairie. *Acta Oecologia, Oecol. Gener.*, Vol. 3, n° 1, 29-52.

SEBILLOTTE M., 1988. Les transferts d'eau sol-système racinaire. In : Etude des transferts d'eau dans le système sol-plante-atmosphère (R Calvet, ed.) INRA, Paris, 171-179.

SIMONNEAU T., HABIB R., 1991. The use of tree root suckers to estimate the root water potential. *Plant. Cell. Environ.*, 14, 585-591.

SIMONNEAU T., 1992. Absorption d'eau en conditions de disponibilité hydrique non uniforme. Etude sur pêchers en solution nutritive. Thèse de Doctorat, INRA Paris-Grignon240 p.

SPITTERS C. J. T., AERTS R., 1983. Simulation of competition for ligth and water in crop-weed associations. *Aspects Appl. Biol.*, 4, 467-483.

TAMARI S., BRUCKLER L., HALBERTSMA J., CHABOEUF J., 1993. A simple method for determining soil hydraulic properties in the laboraty. *Soil Sci. Am. J.*, 57, 642-651.

TARDIEU F.& MANICHON H., 1986. Caractérisation en tant que capteur d'eau de l'enracinement du maïs en parcelle cultivée. I. Discussion des critères d'étude. *Agronmie*, 6, 345-354.

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

TARDIEU F., 1987. Etat structural, enracinement et alimentation hydrique du maïs. III. Disponibilité des réserves en eau du sol. *Agronomie*, 7, 279-288.

TARDIEU F., 1988a. Analysis of spatial variability of maize root density. I. Effect of wheel compaction on the spatial arrangement of roots. *Plant Soil*, 107, 259-266.

TARDIEU F., 1988b. Analysis of spatial variability of maize root density. II. Distances between roots. *Plant soil*, 107, 267-272.

TARDIEU F., 1988c. Analysis of spatial variability of maize root density. III. Effect of wheel compaction on water extraction. *Plant Soil*, 109, 257-262.

TARDIEU F., KATERJI N., BETHENOD O., ZHANG J., DAWIES W. J., 1991. Maize stomatal conductance in the field, its relationship with soil and plant water potentials, mechanical constraints and ABA concentration in the xylem sap. *Plant Cell Environ.*, 14, 121-124.

TARDIEU F, BRUCKLER L., LAFOLIE F., 1992. Root clumping may affect the root water potential and the resistance to soil-root water transport. Plant Soil, 140, 291-301.

TARDIEU F., 1994. Growth and functioning of roots and root systems subjected to soil compaction. Towards a system with multiple signalling ? *Soil & Tillage Research* 30, 217-243.

TAYLOR H. M., KEPPLER B., 1975. Water uptake by cotton root systems : an examination of assumptions in the single model. *Soil Sci.*, 120, 57-67.

TAYLOR H. M., KEPPLER B., 1978. Role of rooting caracteristics. *Advances in Agronomy*, 30, 99-128.

TRENBATH B. R., 1974. Biomass productivity of mixtures. *Advances in Agronomy*, 26, 177-210.

TOURAINE B., GRIGNON C., 1981. Les fonctions de transport de la racine. II. Les fonctions d'exportation. *Physiol. Vég.*, 19, 581-610.

TOURNEBIZE R., 1994. Microclimat lumineux et transpiration d'une association arbuste-herbe en milieu tropical : mesures et modélisation. Thèse de Doctorat, Université de Paris XI, 73p.

VAN BAVEL C. H. M., STIRK G. B., BRUST K. J., 1968. Hydraulic properties of a clay loam soil and the field measurement of water uptake by roots, I. Interpretation of water content and pressure profiles. *Soil Sci. Am. Proc.*, 32, 310-317.

VAN DER HONERT T. H., 1948. Water transport as a catenary process. *Faraday Soc. Discuss.*, 3, 146-153.

VAN GENUCHTEN M. TH., HOFFMAN G. J., 1984. Analysis of crop salt tolerance data. *Ecol. Stud.*, 51, 258-271.

VINCENT C. D., GREGORY P. J., 1989. Effects of temperature on the development and growth of winter wheats roots. II Fields of temperature, nitrogen and irradiance. *Plant and Soil*, 119, 99-100.

WALLACE J. S., BATCHLOR C. H., DABEESING D. N., SOOPRAMANIEN G. C., 1990. The partitioning of light and water in drip irrigated plant cane with maize intercrop. *Agric. Water Manage*, 17, 235-256.

WEATHERLAY PE., 1975. Water relations of the root systems. *In : The development and functions of roots* (Torrey JG, Clarkson DT, eds), Acad Press, Londres, 397-417.

WILKERSON G. G., JONES J. W., COBLE H. D., GUNSOLUS J. L., 1990. SOYWEED : A simulation model of soybean and common cocklebur growth and competition. *Agron. J.*, 82, 1003-1010.

WILLEY R. W., 1979. Intercropping : its importance and research needs. I. Competition and yield advantages. *Field Crop Abst.*, 32, 73-85.

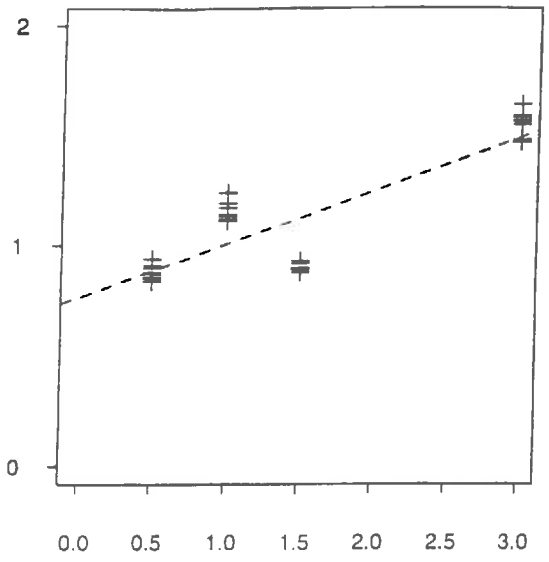
WILLEY R. W., 1985. Evaluation and presentation of inter-cropping advantages. *Expl. Agric.*, 21, 119-133.

ZHANG J., SCHURR V., DAVIES W. J., 1987. Control of stomatal behaviour by abscissc acid which apparently originates in the roots. *J. Exp. Bot.*, 192, 1174-1181.

ZHANG J., DAVIES W. J., 1989. Abscissic acid produced in dehydrating roots may enable the plant to measure the water status of the soil. *Plant Cell Environ.*, 12, 73-81.

Annexe I Droite de régression linéaire entre le flux et la charge appliquée pour la détermination de la conductivité à saturation Ksat.

Regression lineaire Flux~Charge



H la charge (cm)

Profondeur : 18-25

Calcul de Ksat

A = 0.765307872174592

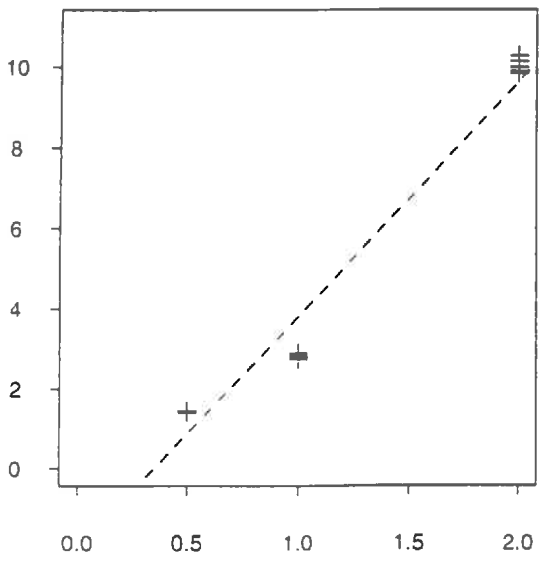
B (Pente) = 0.242353858144973

r.squared = 0.710724108562526

Ksat = 0.00978990465279083 cm.mn-1

Ksat = 1.63165077546514e-06 m.s-1

Regression lineaire Flux~Charge



H la charge (cm)

Profondeur : 50-57

Calcul de Ksat

A = -2.05952380952382

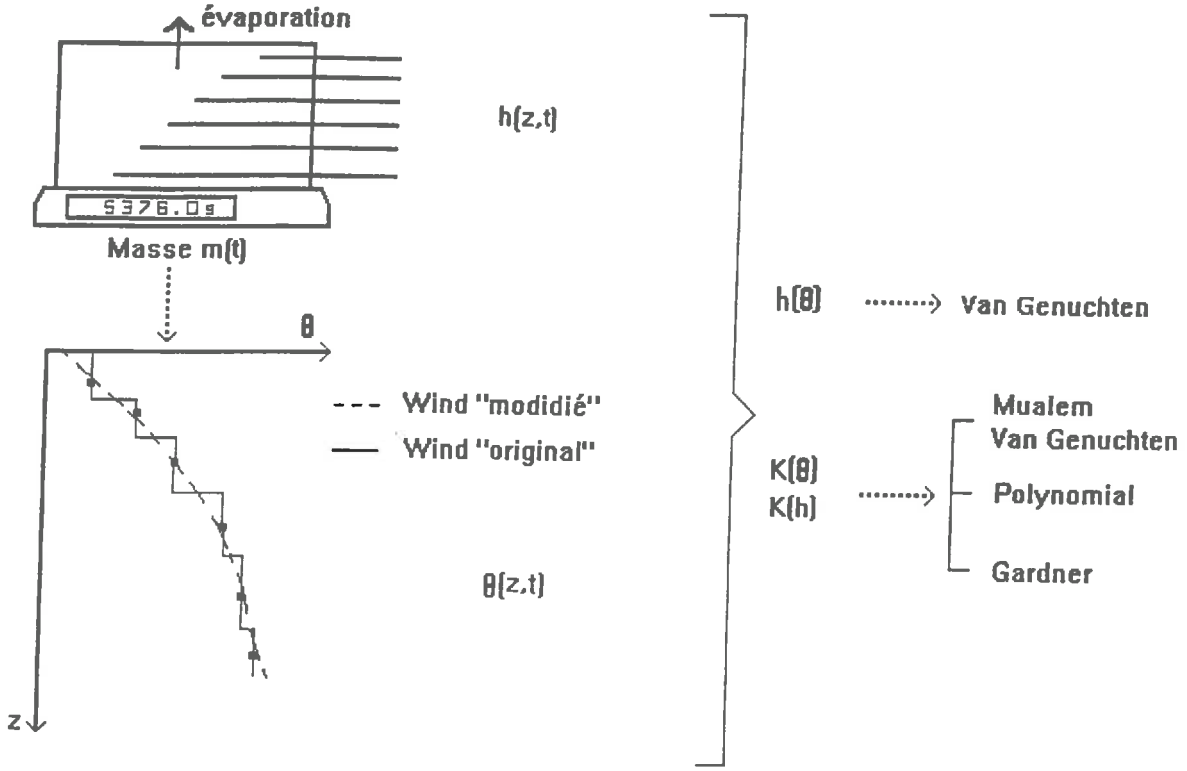
B (Pente) = 5.85436853002071

r.squared = 0.968028506327159

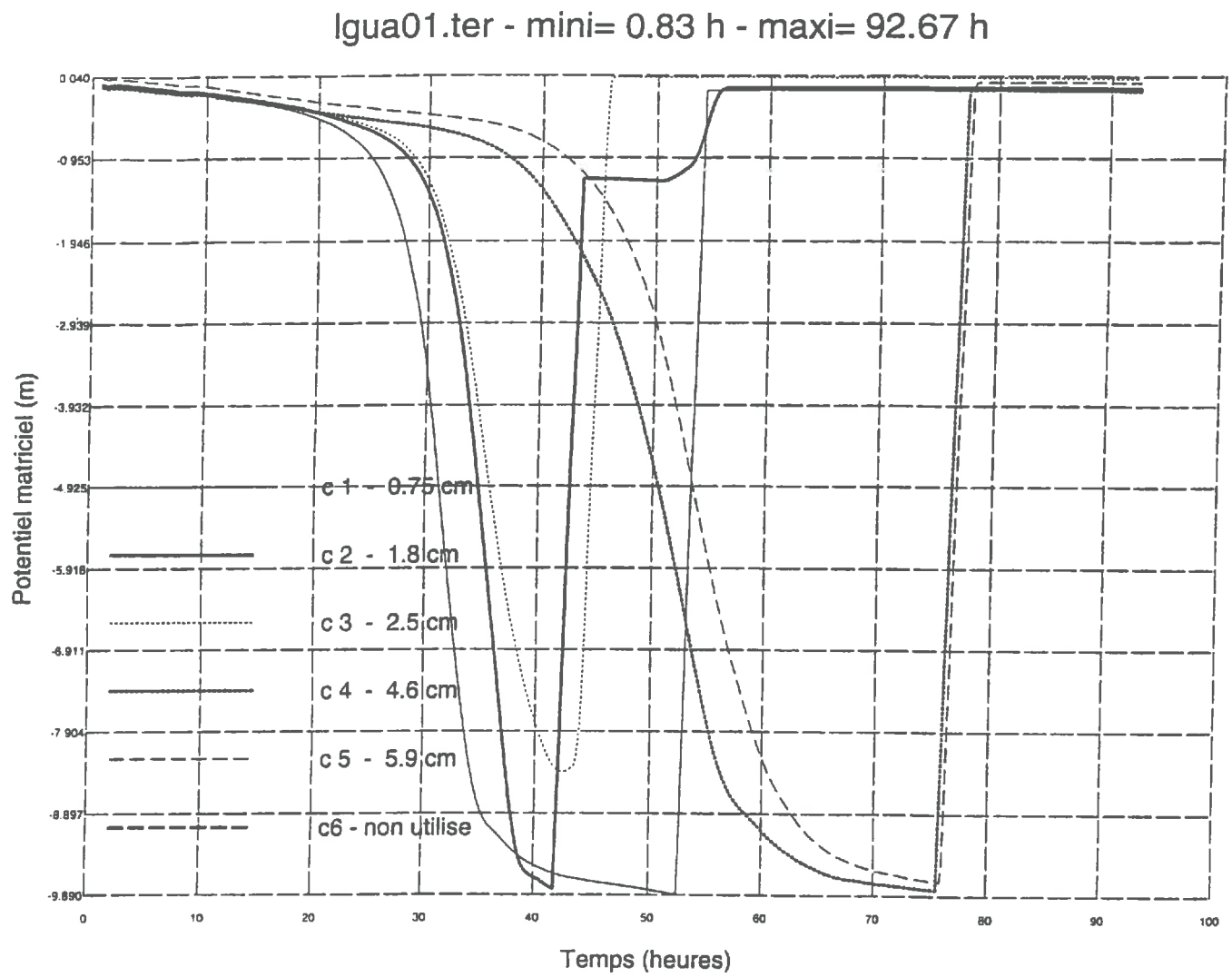
Ksat = 0.256580441249634 cm.mn-1

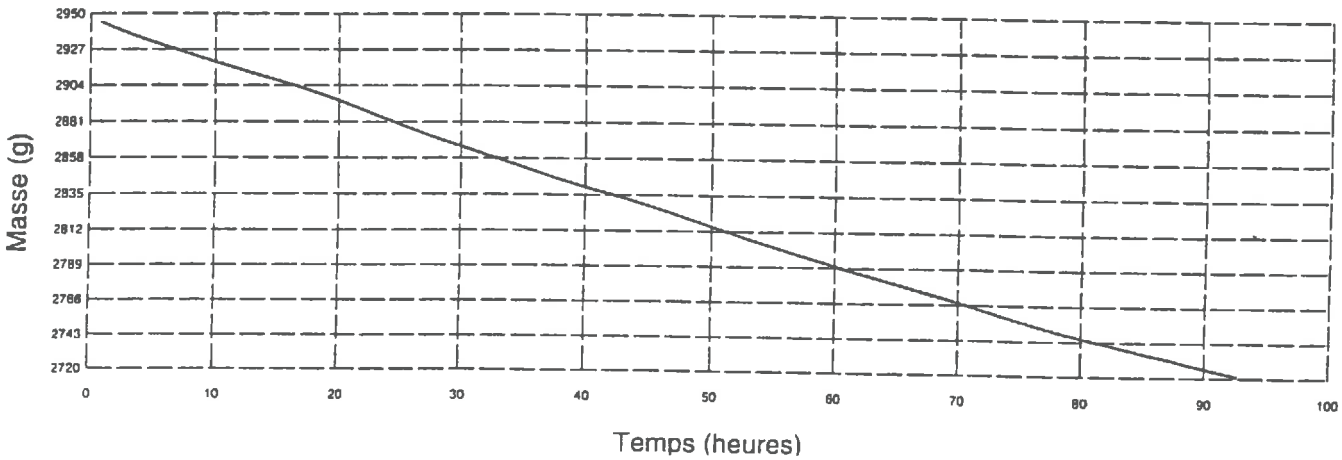
Ksat = 4.2763406874939e-05 m.s-1

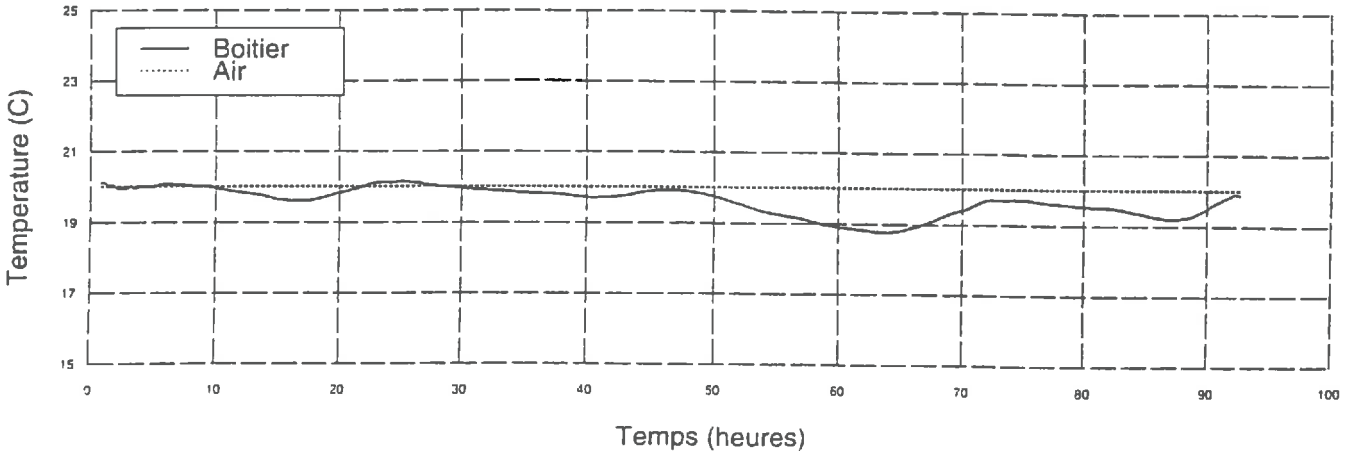
Annexe II a Principe de la technique Wind (explications dans le texte).



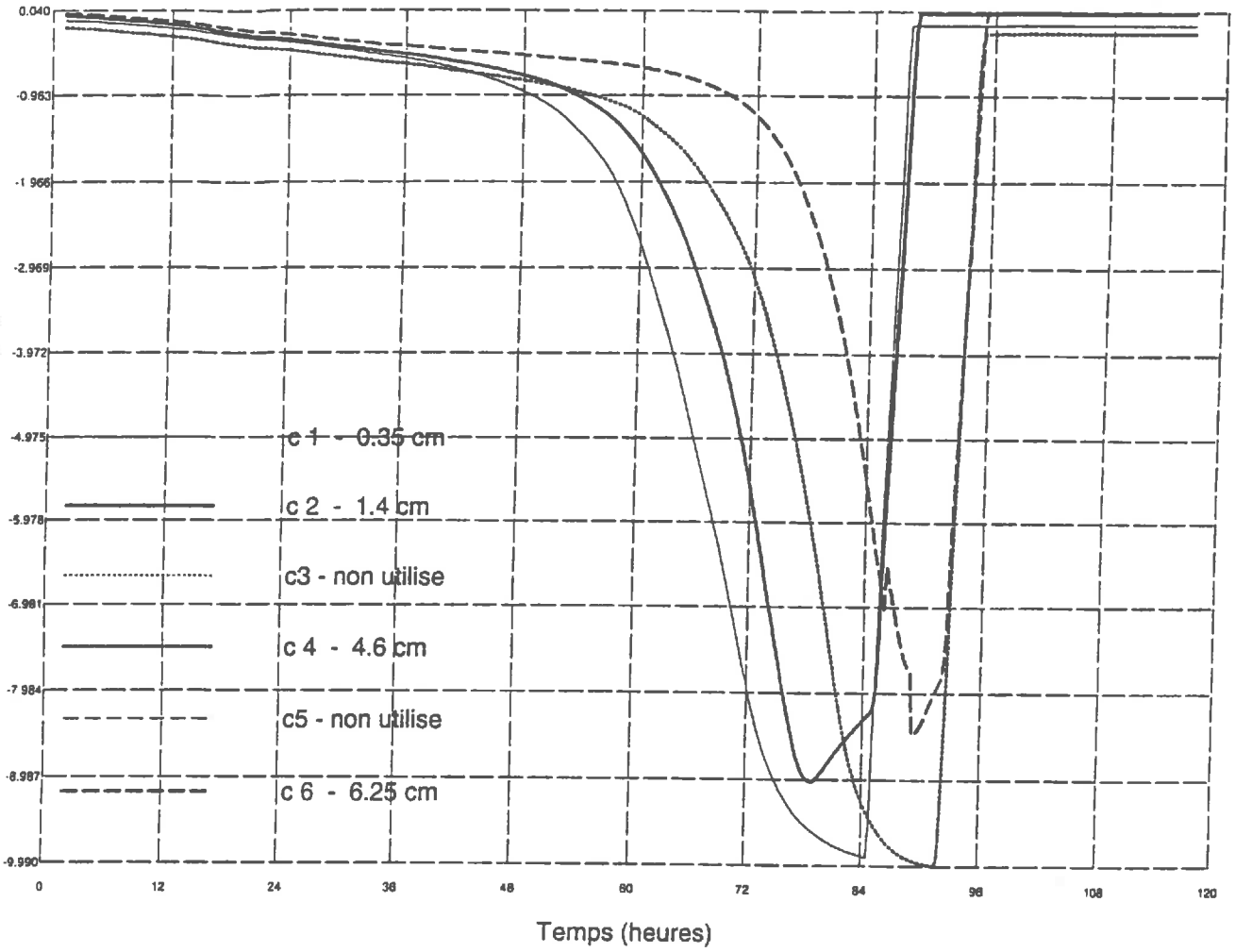
Annexe II b Evolution temporelle des potentiels matriciels mesurée par les microtensiomètres. Evolution de la masse des cylindres et de la température du laboratoire.

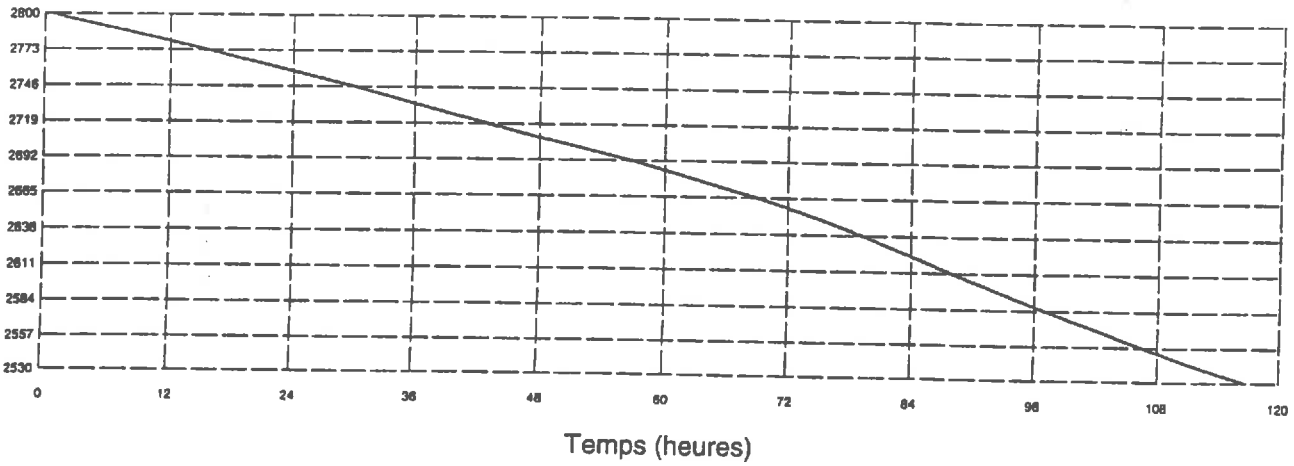


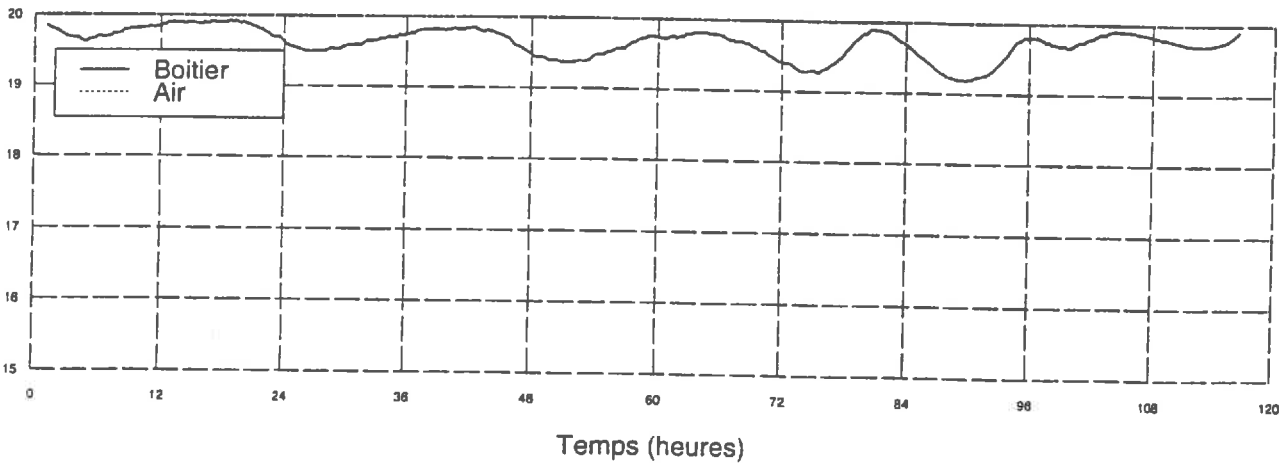




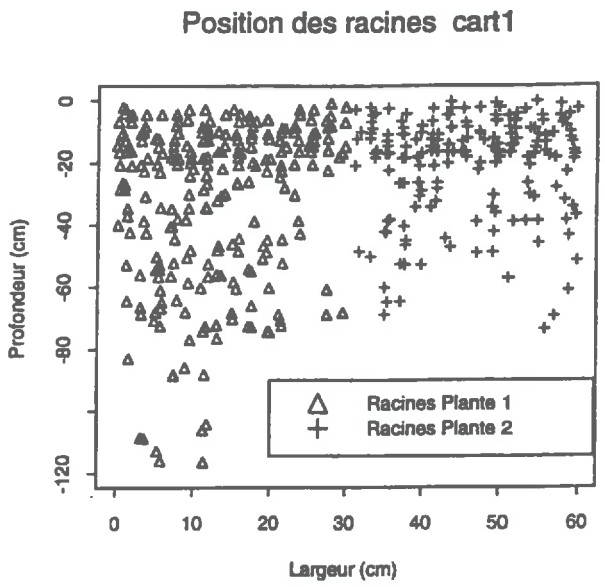
lgua02.ter - mini= 1.25 h - maxi= 116.5 h

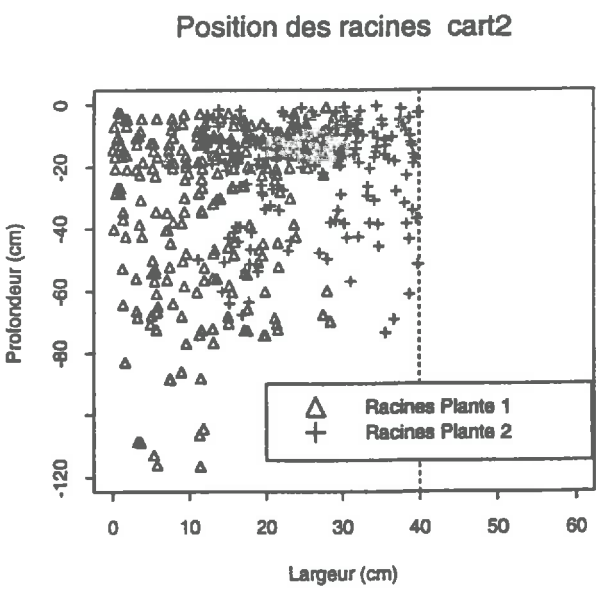


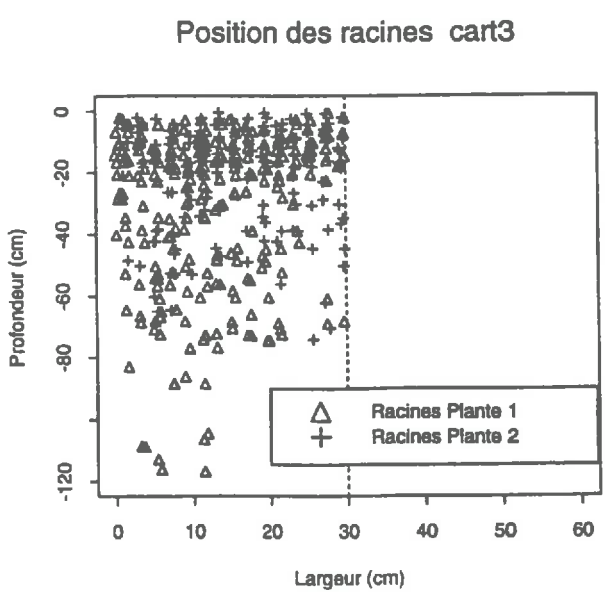




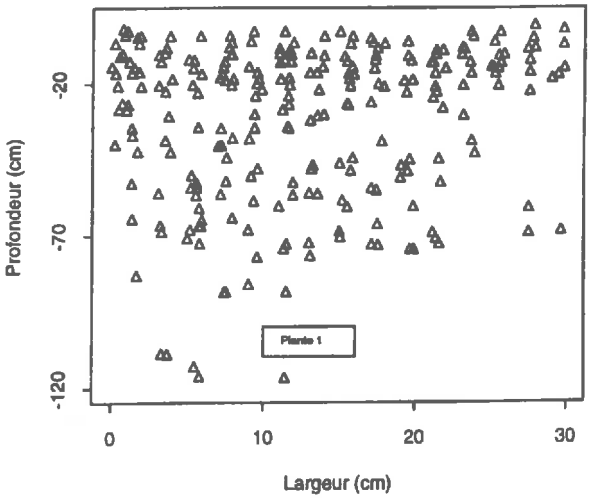
Annexe III Cartes racinaires avec différents niveaux d'imbrication (espacement entre les plantes de 60, 40 et 30 cm) et systèmes racinaires isolés.



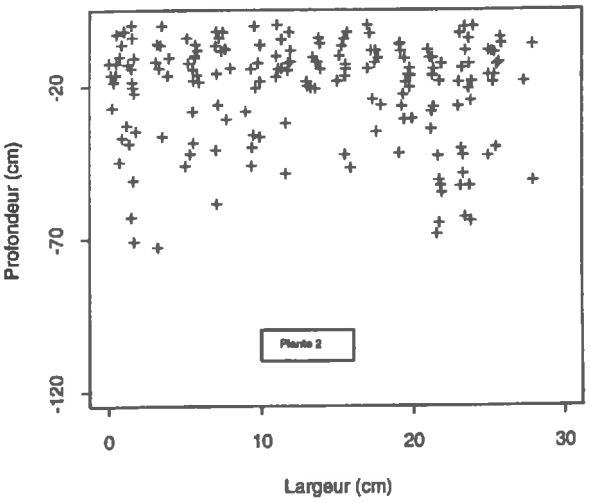




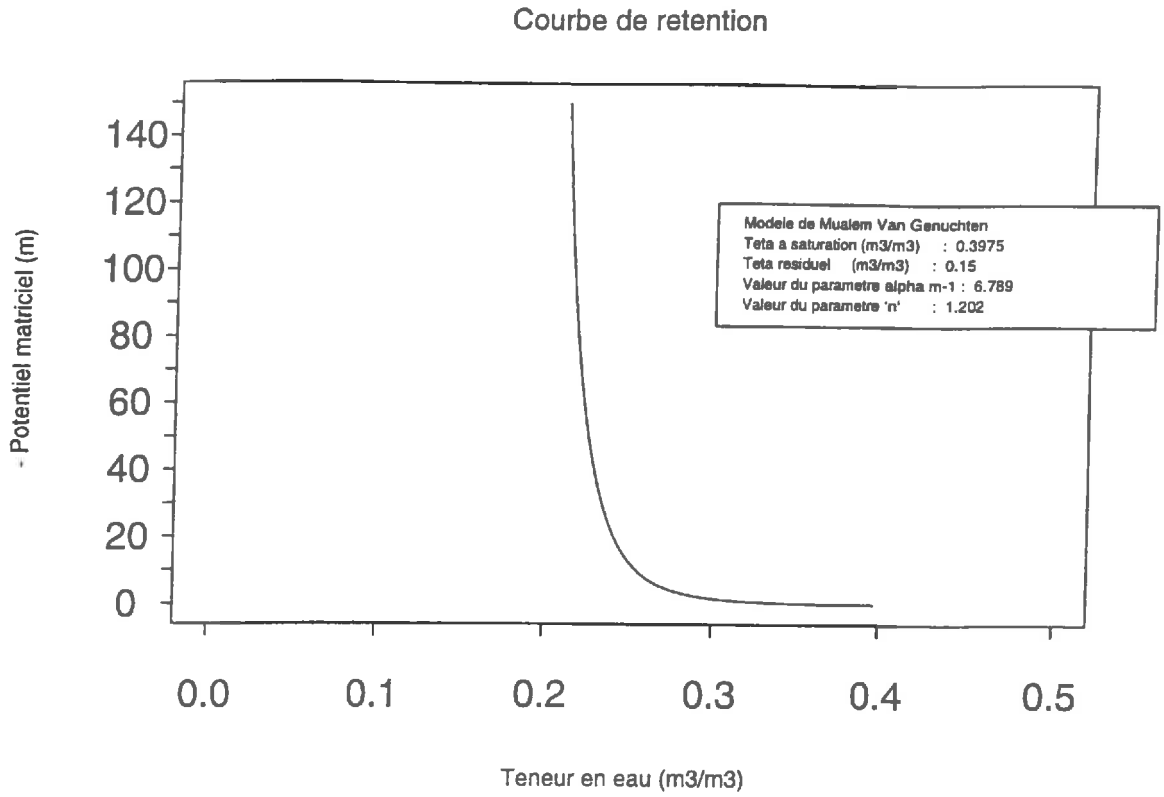
Position des racines cart4

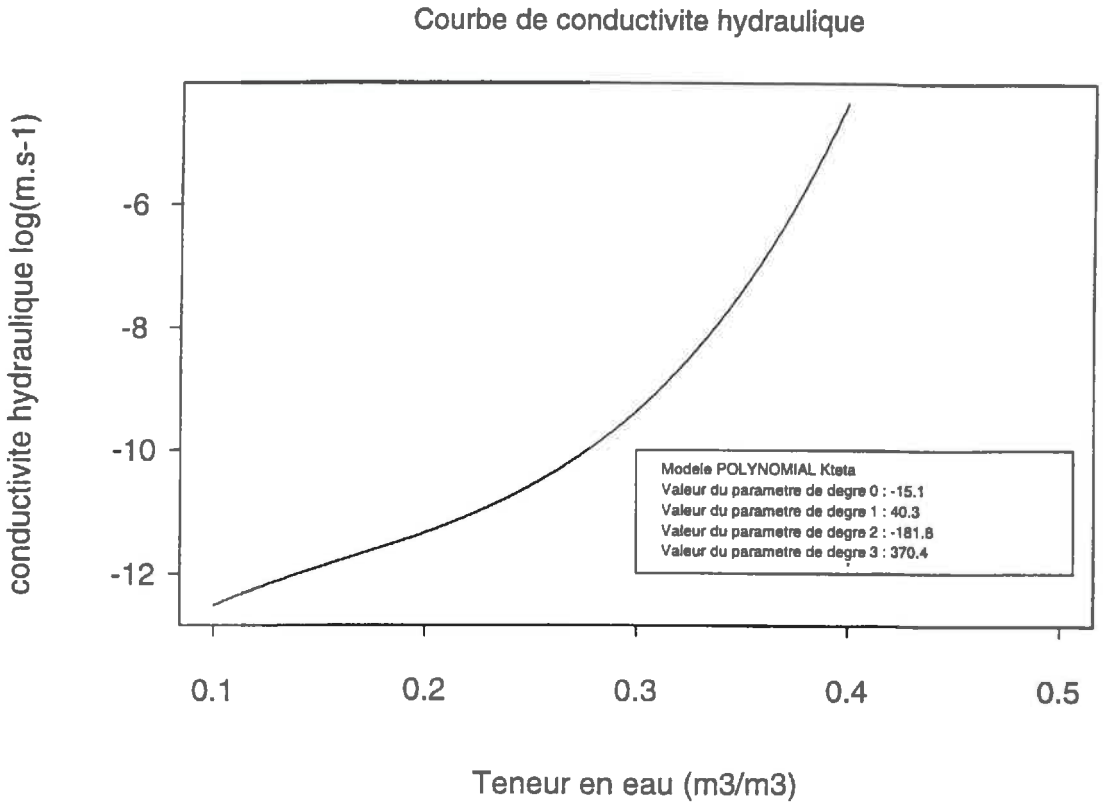


Position des racines cart5



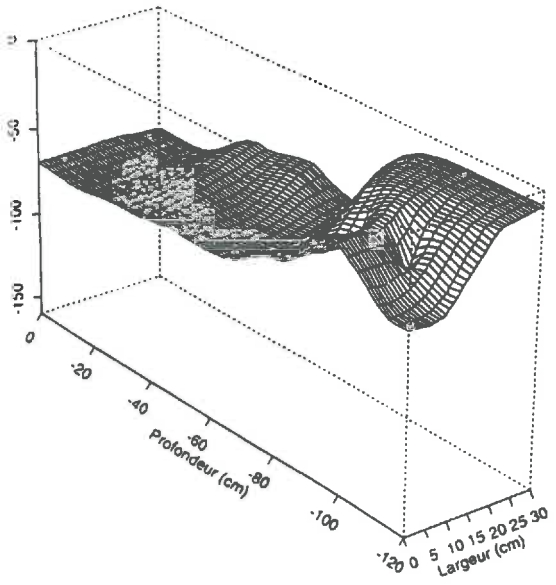
Annexe IV Caractéristiques hydrodynamiques retenues pour les scénarios de simulation.

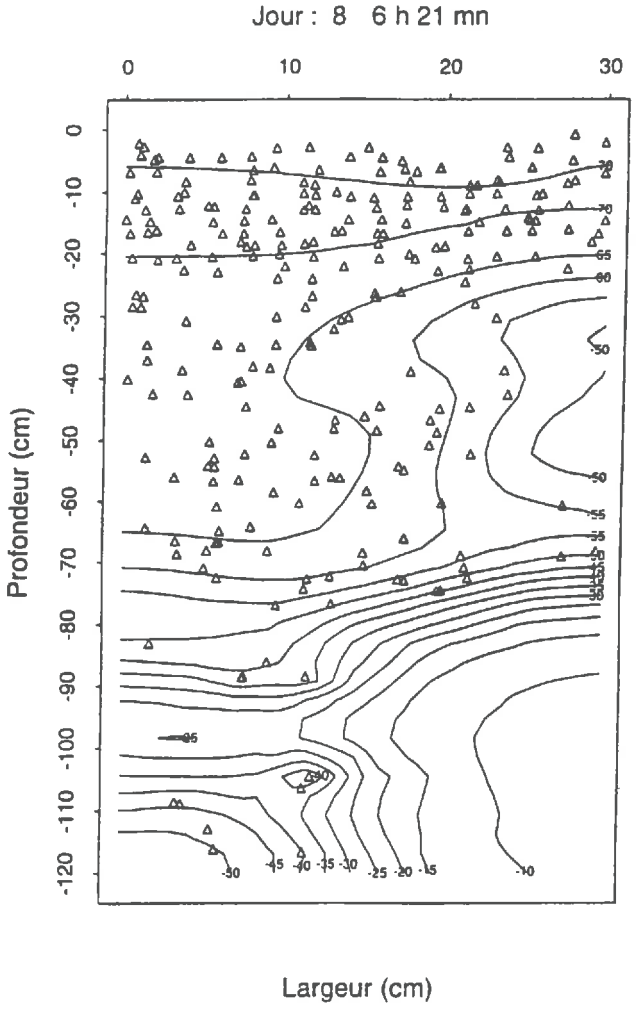




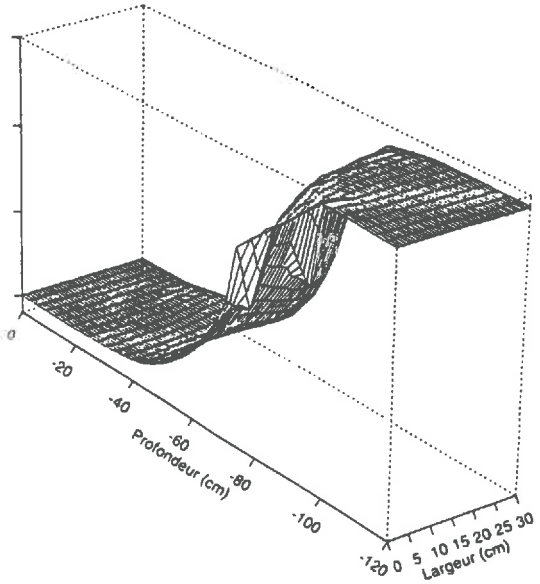
Annexe V Potentiel matriciel du sol après 8 jours de simulation pour des cultures pures

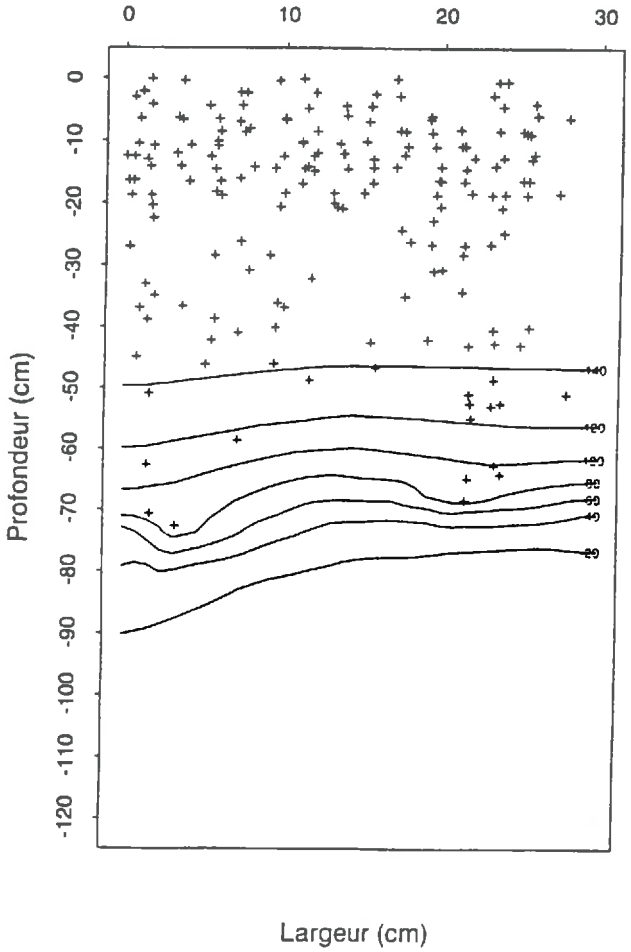
(1) Plante 1





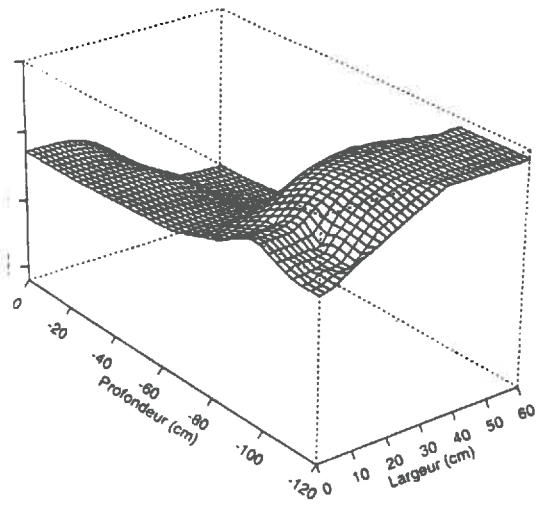
(2) Plante 2

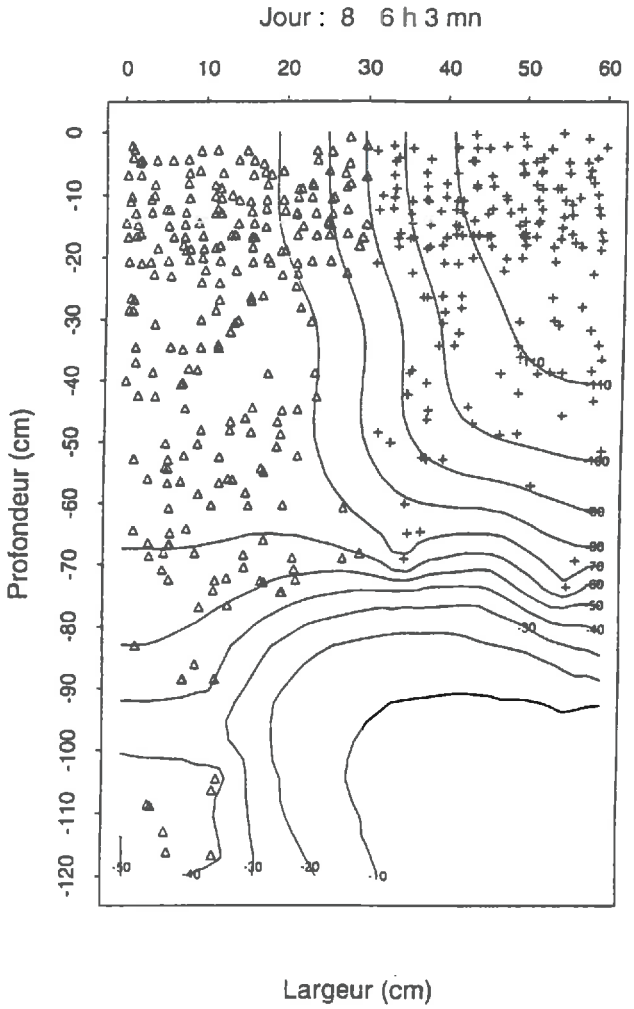
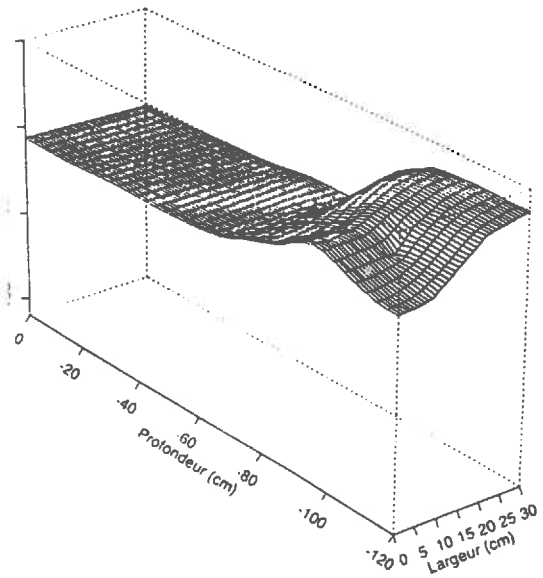
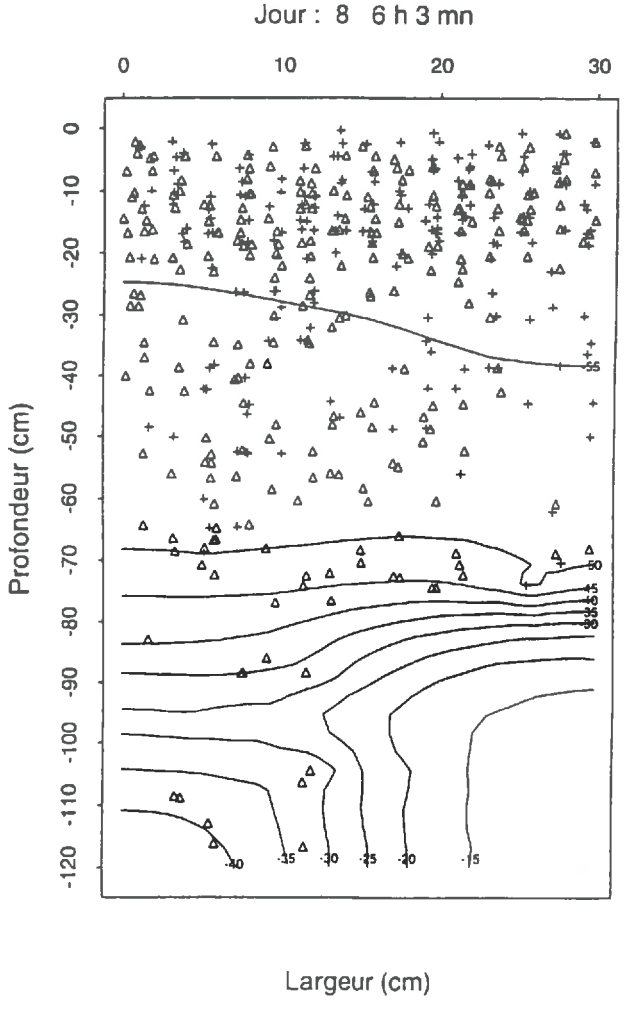




Annexe VI Potentiel matriciel du sol après 8 jours de simulation pour des cultures associées avec une demande d'absorption de 3 mm/j/m^2 pour chaque plante

(1) espacement entre les rangs de 60 cm





(2) espacement entre les rangs de 40 cm