

TH - HC 52

| | | |
|--|--|-------------------------------------|
| Institut National Agronomique Paris - Grignon | Université Pierre et Marie Curie (Paris VI) | Ecole Normale Supérieure |
| D.E.A. Fonctionnement physique, chimique et biologique De la biosphère continentale | | |

MEMOIRE

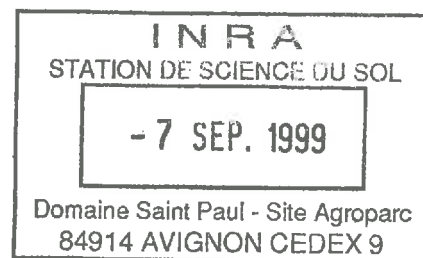
Présenté par Emmanuelle GARRIGUES

**Mise au point préliminaire d'un dispositif d'imagerie du
prélèvement racinaire dans un sol sableux par transmission
lumineuse**

pour l'obtention du diplôme d'études approfondie
commun à l'INA P-G, Paris VI et l'ENS



Institut National de la recherche Agronomique



Soutenu le : 24 septembre 1999
Sous la responsabilité de : L. Bruckler
Maître de stage : C. Doussan

Responsables du D.E.A. : A. Perrier, A. mariotti

REMERCIEMENTS

Je remercie Laurent BRUCKLER puis André CHANZY pour m'avoir accueillie dans leur laboratoire.

Je remercie tout particulièrement Claude DOUSSAN. Par son savoir et son expérience, j'ai beaucoup appris quant à la rigueur scientifique et à l'esprit critique face aux résultats. Sa patience m'a permis d'être encadrée dans de bonnes conditions.

Je remercie également Micheline DEBROUX qui par ses qualités professionnelles et humaines m'a permis de travailler dans des conditions optimales, à la fois sérieusement et toujours dans la bonne humeur.

Je tiens à remercier Laurent GARCIA pour son aide précieux lors des traitements statistiques et encore Laurent BRUCKLER pour son opinion avisé lors de la rédaction de ce rapport.

Je remercie José FABRE de l'Unité d'Ecophysiologie et d'Horticulture de l'INRA d'Avignon pour son aide lors de l'utilisation du phytotron.

Je remercie également toutes les personnes travaillant à l'Unité de Science du Sol pour la bonne ambiance qui y règne et surtout Nathalie de LOUVIGNY et Alain KAPRELIAN avec qui travailler dans le même bureau à vraiment été très agréable !

RESUME

Le compartiment sol étant opaque et solide, il existe actuellement peu de méthodes expérimentales permettant d'avoir une vision directe et répétitive du système racinaire et de l'évolution de l'eau dans ce milieu poreux. Pour compléter ces méthodes, nous avons tenter de mettre au point une technique de visualisation de l'évolution de la teneur en eau dans un sol colonisé par un système racinaire. Cette méthode repose sur l'enregistrement de la quantité de lumière traversant un milieu sableux, la quantité de lumière transmise augmentant avec l'accroissement de la teneur en eau du milieu. Le milieu doit être translucide et de faible épaisseur, donc assimilé à un milieu à deux dimensions. Malgré une chute de la sensibilité de la méthode dans les fortes teneurs en eau, on a pu obtenir les prélèvements hydriques distribués dans l'espace et son évolution dans le temps. A partir d'un même jeu de données, on a pu distinguer trois échelles spatiales de mesure : l'étude à l'échelle du système racinaire global définie par la taille du rhizotron ; l'étude suivant la profondeur en discrétisant l'image en couche horizontale ; et l'étude à proximité d'une section de racine en se focalisant sur une partie restreinte de l'image. On a pu ainsi mettre en évidence la formation d'un front de prélèvement hydrique qui se déplace en profondeur avec le temps. Les résultats à l'échelle d'une racine étayent l'hypothèse selon laquelle le prélèvement hydrique est déterminé dans ce cas par la disponibilité de l'eau à proximité des racines. En effet, de fort gradient de teneur en eau on pu être mis en évidence à proximité des racines.

Les contraintes apparues pouvant être améliorées, cette méthode apparaît prometteuse pour permettre une étude fine des interactions sol-racines.

MISE AU POINT PRELIMINAIRE D'UN DISPOSITIF D'IMAGERIE DU PRELEVEMENT RACINAIRE DANS UN SOL SABLEUX PAR TRANSMISSION LUMINEUSE.

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 1. | <i>Introduction</i> _____ | 2 |
| 2. | <i>L'absorption de l'eau par les racines</i> _____ | 3 |
| | Transferts hydriques dans le continuum Sol-Plante-Atmosphère (CSPA) _____ | 3 |
| | Présentation _____ | 3 |
| | Analogie ohmique _____ | 3 |
| | Alimentation hydrique de la plante _____ | 4 |
| | Rôle du sol _____ | 4 |
| | Rôle du système racinaire _____ | 5 |
| | Modèles d'absorption racinaire _____ | 5 |
| | L'approche microscopique de l'absorption _____ | 5 |
| | L'approche macroscopique de l'absorption _____ | 6 |
| | Les modèles d'extraction prenant en compte la structure du système racinaire _____ | 6 |
| 3. | <i>Méthode de mesure non destructive de teneur en eau</i> _____ | 7 |
| | Méthode de mesure ponctuelle _____ | 7 |
| | Méthodes utilisant des images _____ | 8 |
| | Tomographie _____ | 8 |
| | Méthode de « Transmission de la lumière » _____ | 8 |
| | Principe de la méthode : _____ | 8 |
| | Performances de la méthode _____ | 10 |
| 4. | <i>Matériels et Méthodes</i> _____ | 11 |
| | Le matériel végétal _____ | 11 |
| | Choix du milieu de culture _____ | 11 |
| | Les critères _____ | 11 |
| | Les essais _____ | 12 |
| | Mélange sableux _____ | 12 |
| | Mélange sable – argile _____ | 12 |
| | Mélange final _____ | 13 |
| | Le dispositif expérimental _____ | 14 |
| | Matériels et organisation du dispositif _____ | 14 |
| | Remplissage du rhizotron _____ | 14 |
| | Mise à saturation du milieu sableux _____ | 14 |
| | Conditions culturales _____ | 15 |
| | Description de l'expérimentation _____ | 15 |
| | Traitements des images _____ | 16 |
| | Ajustement des images _____ | 16 |
| | Etalonnage _____ | 16 |
| 5. | <i>Résultats</i> _____ | 17 |
| | Résultats de l'étalonnage _____ | 17 |

| | |
|--|-----------|
| Analyse qualitative des prélèvements d'eau par les racines | 19 |
| Description des images | 19 |
| Discussion | 20 |
| Distribution et évolutions des teneurs en eau | 21 |
| Evolution des humidités pondérales moyennes et transpiration sur le rhizotron en fonction du temps | 21 |
| Profils verticaux de teneur en eau pondérale | 22 |
| Etude d'un transect horizontal incluant plusieurs racines | 24 |
| 6. Conclusions – Perspectives. | 26 |

1. Introduction

Du point de vue des transferts hydriques, le sol, la plante et l'atmosphère forment un continuum : l'eau en provenance du sol transite par la plante avant de rejoindre l'atmosphère. Les flux hydriques qui traversent les végétaux revêtent une importance considérable car, par exemple, dans un cycle régional de l'eau, 60% des précipitations annuelles retournent dans l'atmosphère par évapotranspiration. La compréhension du fonctionnement hydrique des plantes est essentielle aussi bien d'un point de vue environnemental, que pour la gestion de la production agricole. Elle est un enjeu de recherche depuis longtemps.

Le phénomène de transpiration foliaire est à l'origine des mouvements d'eau qui traversent la plante. Cette eau transpirée doit être remplacée suffisamment rapidement sous peine de déshydratation irréversible ou de stress sévère de la plante. Ces pertes d'eau sont compensées par l'absorption continue de l'eau par les racines, essentielle à la croissance et la survie de la plupart des plantes.

Lors de cette absorption interviennent deux acteurs : les racines, par leur capacité physiologique de prélever l'eau du milieu environnant, et le sol, lieu de stockage de l'eau et des éléments nutritifs nécessaire à la plante.

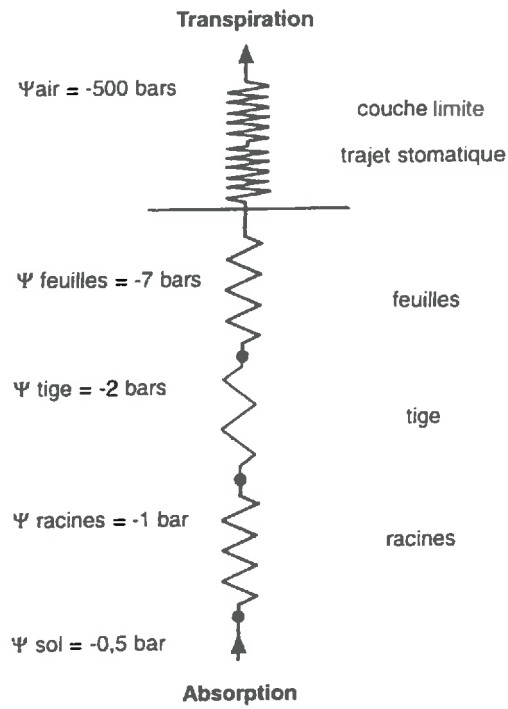
La compréhension de l'extraction hydrique repose sur une interaction entre une approche théorique et l'observation expérimentale.

C'est dans les années 60 que naît une vision dynamique de l'absorption hydrique avec les travaux de Gardner. Il pose les bases théoriques de l'écoulement vers une unique racine (approche 'microscopique' de l'absorption). Cependant, face aux difficultés d'étendre cette méthode à l'ensemble d'un système racinaire réel, s'est développée par la suite une approche dite 'macroscopique'. Dans cette démarche, le système racinaire est assimilée à une entité globale, distribuée dans le sol (densité racinaire), dont le comportement hydrique est représenté par un terme puits dans l'équation de Darcy-Richards des transferts d'eau dans le sol. Cependant, la disposition spatiale des racines dans le sol (Tardieu et al., 1992), les contacts sol-racine (Hekelrath et al., 1977, Jensen et al., 1993), les capacités d'absorption différenciées des racines (Steudle, 1994) ont une importance essentielle sur les potentialités de prélèvement hydrique de la plante. C'est pourquoi, depuis les années 90 on reconsidère les racines individuellement dans le sol pour mettre au point des modèles d'extraction racinaire hétérogène. Cependant, un des problèmes majeurs dans l'évaluation des modèles qui considère les racines individuellement est la difficulté de faire des mesures de teneurs en eau de manière non destructive (répétition des mesures) à une distance connue des racines et d'avoir des observations détaillées des prélèvements.

En effet, jusqu'à présent, les méthodes expérimentales ne permettaient pas d'avoir de vision directe et répétitive de cette évolution car le compartiment sol est opaque et solide. Vieux rêve expérimental, on assiste actuellement à l'émergence de nouvelles techniques, comme la Tomographie qui permettent de voir *in situ* le fonctionnement du système racinaire. Mais, les connaissances relatives au fonctionnement détaillé du système racinaire *in situ* restent encore limitées.

Ainsi, le but du stage est de mettre au point une technique pour observer le système racinaire et l'évolution de l'eau dans un milieu poreux, en les perturbant le moins possible et sans les détruire.

Nous nous attacherons de cette étude à (i) à mettre au point un dispositif permettant la croissance d'une plante et de son système racinaire et avec lequel on puisse obtenir des images d'évolution de la teneur en eau par une technique de transmission lumineuse, (ii) évaluer les performances de la techniques et analyser ces images afin d'obtenir le prélèvement hydrique distribué dans l'espace et son évolution dan le temps.



Condition de flux conservatif :
absorption = transpiration

- . un seul type d'élément, des résistances
- . équation de flux : $i = \Delta\Psi / R$

Figure 1 : Représentation de l'analogie ohmique.

2. L'absorption de l'eau par les racines

Transferts hydriques dans le continuum Sol-Plante-Atmosphère (CSPA)

Présentation

Le sol, la plante et l'atmosphère forment un continuum du point de vue des transferts hydriques, appelé Continuum Sol-Plante-Atmosphère (CSPA). Dans ce continuum, les processus mis en œuvre dans la circulation de l'eau sont interdépendants, tels les maillons d'une chaîne. La circulation de l'eau dans le CSPA est régie par les différences de potentiels hydriques existant dans et entre les différents compartiments. La force motrice à l'origine des flux est la demande climatique qui est, pour un climat donné, la perte en eau maximum que le climat peut induire sur une surface donnée. Elle dépend des caractéristiques climatiques (rayonnement incident, température, déficit de pression de vapeur d'eau et vent). En réponse à cette demande climatique de l'atmosphère un flux d'évaporation pour le sol, et de transpiration pour la plante s'établissent. Pour les végétaux, La chute de potentiel hydrique, liée au départ d'eau par les surfaces soumises à la transpiration, va se propager le long de la plante, des feuilles aux racines (théorie de tension-cohésion) via le xylème. Le potentiel hydrique des racines, chutant en dessous de celui du sol, va entraîner un transfert d'eau du sol au racines ; c'est la phase d'absorption. Une analogie électrique, l'analogie ohmique, peut illustrer de façon simple ces différentes étapes.

Analogie ohmique

Les étapes du transit dans le continuum sont : l'écoulement de l'eau du sol vers les racines, l'absorption racinaire, les transferts de la sève brute des racines aux différents organes de la partie aérienne par le système conducteur, la diffusion à travers les espaces intercellulaires et les stomates des feuilles, enfin le passage de l'eau dans l'atmosphère après avoir traversé la couche limite aérodynamique entourant la feuille.

Etant donné qu'en conditions normales la quantité d'eau transpiré quotidiennement par une plante est, à quelques pour cent près, égale à celle qu'elle absorbe à partir du sol par les racines, le flux d'eau à travers un végétal peut être considéré en première approximation comme « conservatif », c'est à dire que la transpiration est égale à l'absorption.

Dans ces conditions, on peut représenter les flux d'eau entre les différentes parties du CSPA par des équations du type de la loi d'Ohm :

$$\text{Absorption} = (\Psi_s - \Psi_r) / R_{sr} = (\Psi_r - \Psi_f) / R_{rf} = (C_f - C_a) / (R_s + R_a) = \text{Transpiration}$$

Où Ψ_s , Ψ_r , Ψ_f sont les potentiels hydriques du sol, des racines et des feuilles ; C_f et C_a les concentrations en vapeur d'eau dans les feuilles et dans la couche limite ; R_{sr} , R_{rf} , R_s et R_a sont les résistances à l'interface sol-racine, de la plante, stomatique et de la couche limite. La plante est donc réduite à un ensemble de résistances en série (**Figure 1**). Selon l'échelle où l'on se trouve, ce nombre de résistance peut varier.

Cette analogie électrique offre l'avantage de définir avec le même formalisme les différents compartiments, et l'interdépendance des processus physiques.

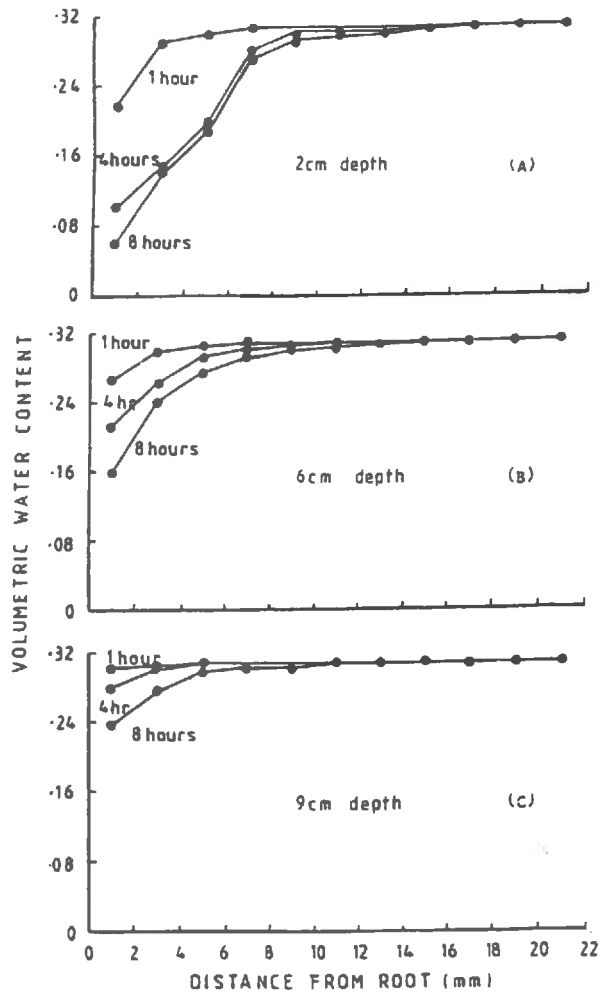


Fig. 1. Change to drawdowns of soil water content in proximity to a radish root at 2, 6 and 9 cm depth after one, four and eight hours transpiration.

Figure 2: Diminution de la teneur en eau à proximité d'une racine de radis à 2, 6 et 9 cm de profondeur, après 1, 4 et 8 heures de transpiration.

Alimentation hydrique de la plante

Avant l'absorption proprement dite par les racines a lieu la phase d'approvisionnement. Elle correspond à l'interception de l'eau par le système racinaire. Cette interception se réalise par les transferts d'eau dans le sol (rôle du sol), mais également par la croissance du système racinaire qui permet de coloniser des zones du sol non encore exploitées (rôle de la plante).

Rôle du sol

Dans l'alimentation hydrique des couverts végétaux, le sol va jouer deux rôles principaux : d'une part, il va être un régulateur vis à vis des phénomènes climatiques et d'autre part, il va jouer un rôle déterminant sur la vitesse de déplacement de l'eau, et donc, sur la satisfaction des besoins instantanés de la plante. Cette vitesse de déplacement dépend de l'état de l'eau dans le sol (potentiel hydrique) et des caractéristiques hydrodynamiques du sol (capacité de rétention et conductivité hydraulique). Ces caractéristiques sont fonction de la texture (granulométrie du sol) et de la structure (agencement des particules entre elles). Ainsi, la grande variabilité des types de sols va déterminer des conditions d'alimentation hydrique très variables d'un sol à l'autre, et même d'un point du sol à l'autre. Schématiquement, un dessèchement du sol par l'absorption racinaire provoque une diminution du potentiel hydrique et de la conductivité hydraulique, ce qui peut rapidement entraîner un stress hydrique de la plante par limitation de l'approvisionnement (Reicosky et Ritchie, 1976).

Pour une racine prise isolément, l'absorption hydrique induit un développement d'un gradient de potentiel hydrique dans la rhizosphère sur une distance de quelques mm. Hainsworth et Aylmore (1989) observent, par tomographie à rayon X, le développement de tels gradients dans les 10 mm localisés autour des racines de radis et lupin (**Figure 2**). D'autre part, cette étude permet de rejeter l'hypothèse d'uniformité des prélèvements d'eau le long de l'axe racinaire. Ces mêmes auteurs démontrent que, dans le cas général où l'eau contient des solutés, les gradients de potentiel matriciel observés dans la rhizosphère diminuent par rapport au cas où l'eau est pure, car la diminution du potentiel osmotique due à la présence des solutés réduit le flux d'absorption racinaire.

Au niveau d'un système racinaire, toute absorption de l'eau par celui-ci modifie immédiatement le champ des teneurs en eau l'entourant, la distribution spatiale des potentiels de l'eau et des conductivités hydrauliques (Lafolie et al, 1991 ; Bruckler et al, 1991). Cette analyse montre que l'intensité de ces gradients est très fortement liée à l'intensité de la demande climatique, aux propriétés hydrodynamiques du sol, et à la densité spatiale des racines. Cette multitude de facteurs d'action expliquerait pourquoi des résultats contradictoire existent dans la littérature sur l'importance relative des résistances au niveau du sol, comparées aux résistances liées au système racinaire proprement dit lors de la phase d'approvisionnement. Certains travaux suggèrent que le sol représente la plus forte résistance dans le système sol-plante (Gardner, 1960 ; Newman, 1969), alors que d'autres conclusions opposées existent (Blizzard, 1980 ; Passioura, 1988). Quant à la phase d'absorption proprement dite, la résistance au transfert de l'eau à l'interface sol-racine est directement liée à la qualité du contact entre le sol et la racine (Herklerath et al, 1977).

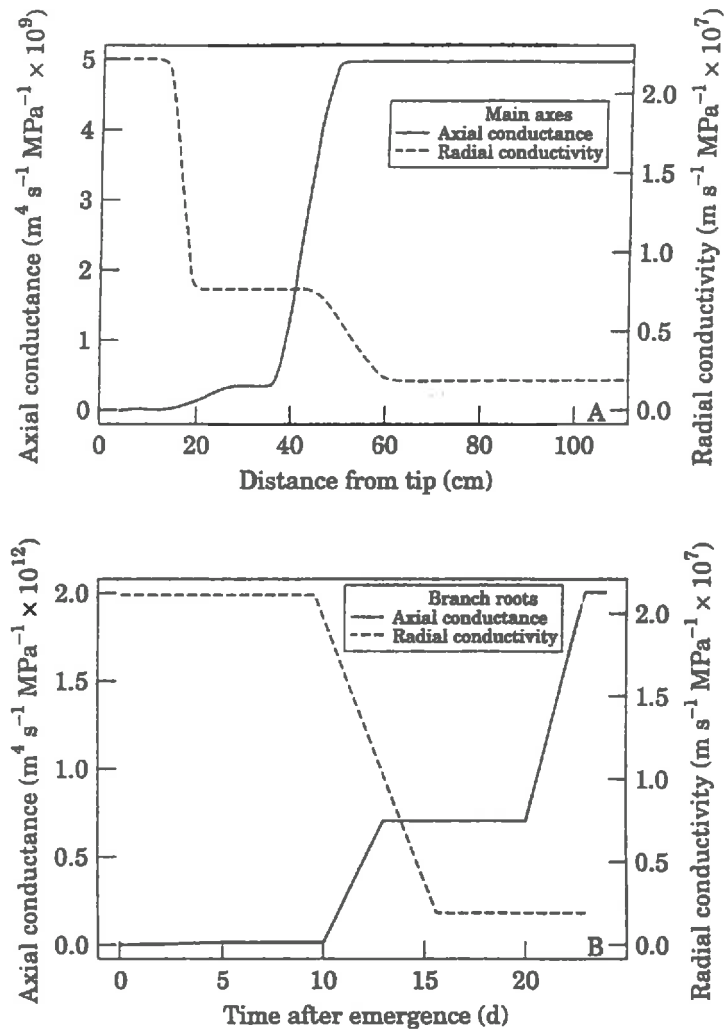


Figure 3 : Evolution en fonction de la distance à l'apex et du temps après émergence des conductances axiale et radiale des racines primaires et secondaires de maïs obtenue par calage du modèle d'Arbre Hydraulique du Système racinaire (tiré de Doussan *et al*, 1998).

Enfin, d'un point de vue purement physique, on peut concevoir une exorption d'eau des racines vers des zones de sol desséchées. Une telle exorption a été mise en évidence (Baker et Van Bavel, 1988 ; Xu et Bland, 1993) La question de savoir si une plante peut transférer des quantités significatives d'eau des horizons profonds et humides du sol vers les horizons superficiels plus secs est ainsi posée et reste une question d'actualité.

Rôle du système racinaire

Le système racinaire va jouer à la fois le rôle d'une surface d'échange mobile avec le sol, et d'un système de transport de l'eau absorbée jusqu'au collet.

L'absorption d'eau par une racine dépend des forces de nature hydraulique et osmotique (Dalton et al, 1975). L'importance relative de ces forces dépend de l'intensité du flux transpiratoire. Lorsque la plante transpire activement, le terme osmotique est considéré comme négligeable. Par contre sa contribution est prépondérante quand la plante transpire peu (pendant la nuit par exemple).

En première approche, le modèle le plus simple pouvant rendre compte du fonctionnement d'une racine absorbant de l'eau peut être décrit en deux phases : la phase d'absorption et la phase de transport. Ce modèle présente l'avantage de distinguer clairement les deux principales voies de résistance au transfert d'eau : la voie radiale (phase d'absorption), traversant le cortex jusqu'au cylindre central de la racine contenant les vaisseaux, la voie axiale (phase de transport) le long des vaisseaux de xylème jusqu'aux sites d'évaporation. A ces deux voies différentes d'absorption et de transferts sont associées des conductivités hydrauliques différentes : les conductivités axiale et radiale.

Les flux d'absorption des racines évoluent dans l'espace et dans le temps à cause d'une variation des propriétés physiologiques le long des axes racinaires (Varney et Canny, 1993). En effet, la conductivité radiale et axiale ne sont pas constantes dans le système racinaire, mais sont fonction de la distance à l'apex de la racine (Figure 3), c'est à dire qu'elles sont fonction de l'âge des tissus des racines et de leur maturation. Ainsi, à l'échelle du système racinaire, comme la distribution des conductances est hétérogène, la distribution spatiale de l'eau absorbée est également hétérogène. L'eau sera donc prélevée de façon différente dans les sols si on a affaire à une racine jeune ou âgée.

Enfin, la croissance du système racinaire va permettre la colonisation de zones nouvelles et la re-exploitation de zones possédant de l'eau ou venant d'en recevoir. Cette croissance est stimulée lors d'un stress hydrique.

Modèles d'absorption racinaire

L'approche microscopique de l'absorption

Gardner (1960) a été un des premiers à conceptualiser l'extraction d'eau par le système racinaire avec une vision dynamique et à en proposer une formulation analytique. Dans ce modèle, la racine est considérée comme un cylindre infiniment long (écoulement radial) prélevant de l'eau à débit constant dans un sol présentant des caractéristiques hydrodynamiques très simplifiées. Par la suite, cette approche a été étendue à un ensemble de

racines en supposant que celles-ci étaient identiques et réparties idéalement de façon homogène en cylindres parallèles dans le sol.

Cette approche simplifiée a permis de mettre en relief un certain nombre de comportements, comme par exemple, une durée de plusieurs jours pour extraire l'eau disponible dans un rayon de quelques centimètres autour de la racine et donc la nécessité pour la plante d'avoir un système racinaire dense pour pouvoir extraire rapidement de l'eau dans le sol. De plus, elle a permis de formaliser une vision des transferts qui était restée jusque là très expérimentale. Cependant, en plus du fait de ne pas pouvoir élargir le formalisme analytique d'une racine à l'ensemble du système racinaire, le système racinaire n'est pas une entité homogène avec la profondeur, du point de vue spatial (système ramifié) et physiologique. Il en est de même pour le sol dont les caractéristiques et les propriétés physiques varient avec la profondeur. D'où la nécessité ressentie d'une approche plus globale considérant le système racinaire dans son ensemble dans le sol.

L'approche macroscopique de l'absorption

Dans les années 80, face à la difficulté d'appréhender la géométrie complexe du système racinaire et les mécanismes en jeu participant au transfert de l'eau vers et dans les racines, il apparaissait très difficile de décrire analytiquement l'ensemble des flux d'eau existant au niveau de la rhizosphère. Une approche alternative a été développée cherchant à appréhender le système racinaire dans un ensemble. Un terme « puits » distribué dans le sol est combiné à l'équation de Darcy-Richards des transferts dans le sol, et simule l'extraction racinaire. La fonction puits racinaire est exprimée en volume d'eau extrait par unité de volume de sol et par unité de temps. Différentes fonctions puits ont été proposées pour décrire l'extraction de l'eau par un système racinaire. Certains étant basés sur des considérations physiques [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 dépendant de la teneur en eau), et de la densité racinaire], ou peuvent être totalement empirique. Le sol est discrétisé en couches successives pour rendre compte de l'hétérogénéité du système racinaire.

Ces modèles nécessitent des calages pour les différents paramètres à partir de mesure (Molz, 1981).

Les inconvénients majeurs de cette approche est qu'elle ne prend pas en compte la plante dans sa diversité et complexité (géométrie et extension dans l'espace, variabilité des capacités d'absorption des racines, transferts dans la plante) et ne peut donc pas prendre en compte des interactions sol-racine.

Les modèles d'extraction prenant en compte la structure du système racinaire

En effet, la disposition spatiale des racines dans le sol (Tardieu et al., 1992), les contacts sol-racine (Hekelrath et al., 1977, Jensen et al., 1993), les capacités d'absorption différenciées des racines (Steudle, 1994) ont une importance essentielle sur les potentialités de prélèvement hydrique de la plante. C'est pourquoi, depuis les années 90 on reconsidère les racines individuellement pour mettre au point des modèles d'extraction racinaire hétérogène.

Des modèles sol-plante définis de façon bidimensionnelle (Lafolie et al., 1991 ; Bruckler et al., 1991) ou tridimensionnelle (Clausnitzer et Hopmans, 1994) existent, prenant en compte la variabilité spatiale des teneurs en eau du sol et la répartition hétérogène des racines dans le sol.

Une voie de progrès actuelle est une meilleure prise en compte des propriétés de la plante dans l'absorption. Ceci est possible car il existe actuellement des modèles d'architecture racinaire qui décrivent la géométrie, les connections entre racines, et la croissance du système racinaire de manière réaliste tout au long de la vie de la plante (Pagès et al, 1989). Ce type de modèle couplé à un modèle de transferts hydriques vers et dans la racines permet d'obtenir un 'modèle d'arbre hydraulique du système racinaire' et donne une vision détaillée de l'absorption hydrique (flux et potentiels hydriques) de l'échelle de la racine à celle du système racinaire global (Doussan et al., 1998b).

Ainsi, avec ces modèles qui considèrent les racines de façon individuelle, se pose le problème de leur validation expérimentale. En effet, cette validation implique, entre autre, de pouvoir faire des mesures à l'échelle locale de la racine (distribution de l'eau autour de la racine) et globale (distribution de l'eau dans le milieu colonisé par les racines) et de manière non destructive. Jusque dans les années 85-90, il n'existait pas de système permettant ce genre de mesure et il y a toujours actuellement une lacune méthodologique des mesures fines du champ de teneur en eau évolutif dans le temps dans un sol colonisé par des racines.

3. Méthode de mesure non destructive de teneur en eau

Il existe actuellement différentes méthodes de mesures non destructives de teneur en eau. Elles peuvent être classées en deux grandes catégories : les méthodes de mesures ponctuelles ou intégrées dans l'espace et les méthodes d'imagerie.

Méthodes de mesure ponctuelle

On peut citer les sondes capacitives [la sphère d'influence, c'est à dire le volume de sol influençant la mesure, étant seulement de quelques centimètres cube (Chanzy, 1998)]. Cette méthode utilise la relation entre l'humidité et les propriétés diélectriques des sols. Elle est basée sur la mesure de la permittivité diélectrique relative du sol à l'aide d'un pont capacitif, la permittivité relative de l'eau étant nettement supérieure à celle des autres constituants (solides du sol, air).

Les sondes TDR (Time Domain Reflectometry) sont basées sur le même principe de mesure de la permittivité diélectrique en mesurant le temps de réflexion d'une onde électromagnétique sur un guide d'onde, mais elles ont un volume d'influence plus élevées : elles permettent des *mesures intégrées* sur toute la hauteur du guide d'onde.

Les sondes à neutrons sont également des mesures intégrées. Cette méthode repose sur les propriétés d'interaction entre un flux de neutrons rapides et les noyaux d'hydrogène surtout présents dans les molécules d'eau. Ces interactions génèrent d'autre particules (neutrons lents) qui sont émis dans toute les directions et mesurés dans une direction donnée.

L'inconvénient de ces méthodes est l'emplacement fixe des mesures par rapport à la position des racines qui évoluent avec le temps, ainsi que leur encombrement stérique.

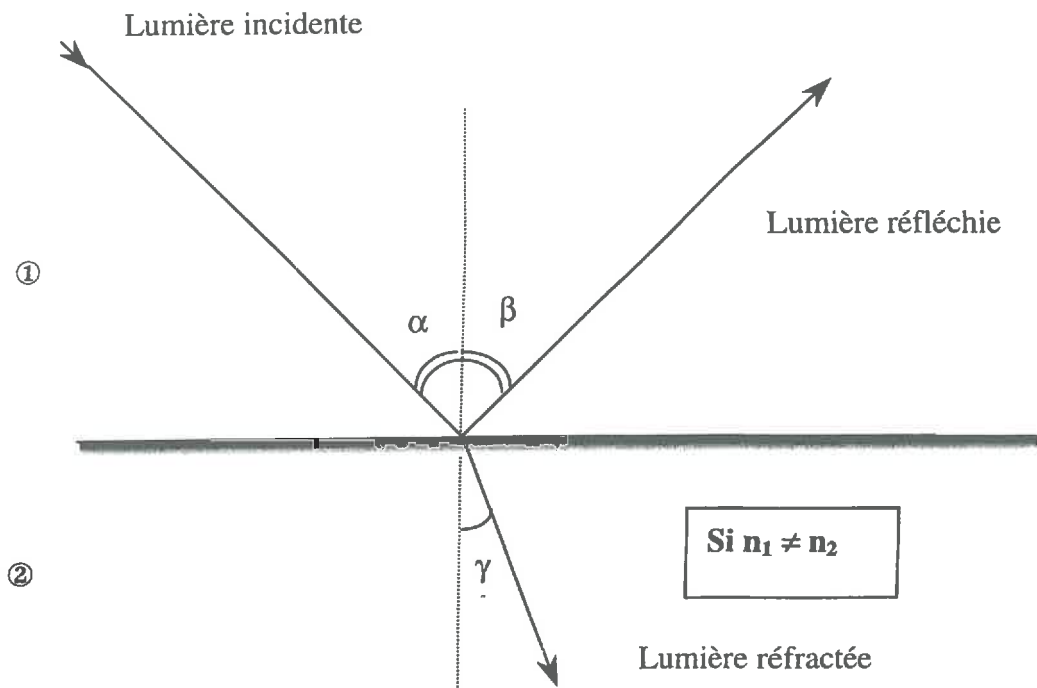


Figure 4 : Illustration des phénomènes de réflexion - réfraction de la lumière (angle d'incidence α , de réfraction γ) à la traversée de deux milieux d'indice de réfraction différents.

Méthodes utilisant des images

Ces méthodes permettent d'acquérir une grande quantité de mesures (plusieurs centaines de milliers) de façon quasi-simultanée.

Tomographie

Dans ces méthodes on peut citer la Tomographie Assistée par Ordinateur (CAT) appliquée à des mesures d'atténuation de rayons X et γ (Hainsworth et Aylmore, 1985 et 1989).

La CAT consiste à diviser l'objet examiné en pixels. Le but de cette méthode est de déterminer la teneur en eau de chaque pixel en se basant sur la relation théorique entre l'humidité et l'atténuation de rayons X ou γ . Cette méthode permet d'étudier la dynamique des processus de transport à une petite échelle. Par exemple, l'application de la CAT à des mesures d'atténuation de rayons X permet de mettre en évidence des changements de teneur en eau de l'ordre de 0.006 g/cm^3 sur une distance de 1.5 mm (Hainsworth et Aylmore, 1983).

Outre l'instrumentation très sophistiquée et peu accessible que nécessite la CAT, les principaux inconvénients de la CAT sont (i) que les mesures dépendent simultanément de la teneur en eau et de la densité du milieu. Or, lors de la croissance du système racinaire, il existe des phénomènes de compaction du sol entourant les racines et (ii) le temps d'acquisition des données varie avec le volume du milieu. Plus la taille augmente, plus le temps d'acquisition des images est long pour une énergie donnée. Par exemple, pour un petit volume rectangulaire de 25.2 cm^3 , il faudrait 2 minutes pour avoir tous les points. Or, le temps d'acquisition est particulièrement important dans l'évaluation des changements de teneurs en eau ou de flux dans le sol car ces phénomènes peuvent être très rapides. Ainsi, même si actuellement on dispose des instruments, on reste limité par les capacités de résolution spatiale et temporelle de ces instruments.

Une méthode alternative à ces problèmes serait souhaitable dans l'étude des transferts sol-racine. Parmi les méthodes utilisant le rayonnement, une méthode fondée sur la « Transmission de lumière » au travers du milieu pourrait constituer un bon compromis.

Méthode de « Transmission de la lumière »

Principe de la méthode :

C'est une technique de visualisation de la teneur en eau basée sur l'observation physique que la lumière transmise à travers un sable s'accroît avec l'augmentation de la teneur en eau.

En effet, la lumière qui passe à travers un milieu poreux sableux rencontre, du sable, de l'air et de l'eau. A travers chacune de ces phases, la lumière est, d'une part, absorbée exponentiellement, et d'autre part, comme la lumière rencontre plusieurs interfaces (air-eau, sable-air, sable-eau), elle est réfractée et réfléchi. L'intensité de la lumière transmise à travers le milieu est fonction des indices de réfraction des deux phases et de l'angle d'incidence. A la **Figure 4** est illustré la lumière transmise et réfractée par passage d'un milieu 1 à un milieu 2 :

Les indices de réfraction absolu du milieu 1 et 2 (n_1 et n_2 respectivement). Ils correspondent au rapport de la vitesse de propagation de la lumière dans le vide (c_0) sur la vitesse de propagation de la lumière dans le milieu considéré (c_1 ou c_2) ;

$$n_i = c_0 / c_i \quad (1)$$

L'indice de réfraction du second milieu par rapport au premier, noté n , correspond au rapport des indices de réfraction absolue, mais également au rapport du sinus de l'angle d'incidence α au sinus de l'angle de réfraction γ ;

$$n = n_1 / n_2 = \sin \alpha / \sin \gamma \quad (2)$$

En supposant une incidence normale de la lumière, le facteur de transmission lumineuse τ (rapport de l'intensité lumineuse transmise sur l'intensité incidente) est donné par la loi de Fresnel :

$$\tau = 4n / (n+1)^2 \quad (3)$$

L'intensité de la lumière transmise I_v à travers un milieu poreux sableux contenant de l'eau est donné par l'expression suivante [issue de la publication de Tidwell et Glass (1994)] en considérant que les coefficients d'absorption lumineuse de l'air et de l'eau sont quasiment identiques :

$$I_v = I_{vd} (\tau_{sw} / \tau_{sa})^{2p} \quad (4)$$

Où I_{vd} est la lumière transmise pour un échantillon sec, τ_{sw} et τ_{sa} les facteurs de transmission lumineuse de l'interface sable-eau et sable-air respectivement (ces facteurs sont constants) et p le nombre de pores remplis d'eau.

Avec les indices de réfraction du sable, de l'eau et de l'air (1.6, 1.33 et 1.0 respectivement), quand l'interface sable-air est remplacée par l'interface sable-eau, le facteur de transmission lumineuse passe de $\tau_{sa} = 0.946$ à $\tau_{sw} = 0.991$. Ainsi, dans l'équation (4), le rapport des facteurs de transmission étant supérieurs à 1, plus le nombre de pores remplis d'eau augmente, plus la lumière transmise avec la réfraction augmente.

La relation entre la valeur de la lumière transmise et l'humidité du milieu peut être obtenue de plusieurs façons : à l'aide d'un étalonnage (Darnault, 1997) ou par des considérations purement physiques basées sur des hypothèses quant à la répartition de l'eau dans un milieu poreux (Tidwell, 1994) :

➤ L'étalonnage consiste à acquérir des photos de compartiments identiques pour l'épaisseur et le milieu à analyser, où la teneur en eau est connue. On peut ainsi relier intensité lumineuse transmise et teneur en eau.

➤ Par calcul, avec l'équation (4) on voit que l'on peut relier l'intensité lumineuse au nombre de pores remplis d'eau. Le nombre de pores remplis d'eau peut être relié au taux de saturation en eau (rapport entre teneur en eau volumique et porosité totale) par l'expression suivante :

$$p = S k \quad (5)$$

où S est le taux de saturation et k le nombre moyen de pores à travers l'échantillon. Pour cela, il faut faire l'hypothèse que chaque pore est soit plein soit vide d'eau. Il faut également connaître le nombre de pores dans le milieu. Ceci peut être fait par l'utilisation d'arguments géométriques pour un milieu homogène.

Jusqu'à présent, la méthode de transmission lumineuse a été essentiellement utilisée pour mettre en évidence des phénomènes de digitation lors d'une infiltration dans un sable (Glass, 1989), étudier le déplacement d'un fluide dans un milieu poreux sableux (Tidwell, 1986) ou visualiser la teneur en eau et en huile dans un écoulement transitoire diphasique (Darnault, 1998). Dans toute ces publications, les milieux utilisés sont des sables « grossiers ».

Par contre, cette méthode n'a jamais été utilisé pour étudier les prélèvements d'eau par les racines et les transferts sol-racine.

Performances de la méthode

Dans le but d'utiliser cette méthode dans l'étude des prélèvements hydriques par les racines, nous allons d'abord évaluer ses points forts et faibles par rapport à d'autres méthodes de mesure des teneurs en eau.

Tidwell (1994) compare la transmission lumineuse à des mesures gravimétriques, gammamétriques et à des mesures d'atténuation de rayons X. Pour la méthode de transmission lumineuse, les humidités sont obtenues par la théorie. Les mesures sont effectuées dans 3 chambres de 60 cm de haut, 25 cm de large et 1 cm d'épaisseur remplies avec 3 sables ayant le même mode granulométrique mais dont la dispersion varie : 0.42-0.3 mm, 0.59-0.21 mm, et 0.84-0.149 mm. La chambre étant initialement saturée, on laisse le milieu drainer jusqu'à l'équilibre. Puis, le milieu est réhumecté par une charge d'eau de 20 cm et draine de nouveau jusqu'à l'équilibre. Les mesures sont effectuées au cours ces trois phases. Trois comparaisons sont faites, elles vont du plus petit au plus grand degré de résolution spatiale et portent sur : (1) La teneur en eau moyenne totale de l'échantillon, (2) le profil de saturation, pour les mesures gammamétriques, de rayons X et la transmission lumineuse, et (3) une comparaison directe point par point de la teneur en eau par les mesures aux rayons X et la transmission lumineuse.

Les résultats montrent des différences entre chaque méthode qui donnent un coefficient de variation de 5% sur la teneur en eau. La plus grande déviation rencontrée est de 10%. Cette différence est obtenue pour les profils de saturation, au niveau des points d'inflexions dans la zone sèche.

La technique de transmission lumineuse semble donc se comporter de façon tout à fait satisfaisante pour mesurer des teneurs en eau.

Les points forts de cette méthode sont : (i) le temps requis pour faire une mesure de plusieurs centaines de milliers de points de façon simultanée (quelques $1/100^{\text{ième}}$ de seconde) ; (ii) une bonne résolution théorique du signal (à chaque point est assigné 255 niveaux de gris, ou plus suivant la caméra utilisée) ; et (iii) une bonne résolution spatiale, la technique permettant des mesures d'ensemble ou beaucoup plus ciblées suivant l'éloignement de la caméra à la scène et la taille des pixels de la matrice CCD.

Cependant cette technique présente des limites importantes : le milieu doit être plus ou moins translucide et donner un contraste suffisant, c'est à dire une différence d'intensité lumineuse transmise entre le milieu à l'état sec et à l'état saturé suffisamment grande. Ceci est facilement obtenu avec des sables grossiers ($> 200 \mu\text{m}$), mais lorsque la taille des grains diminue l'épaisseur du milieu doit diminuer également pour laisser passer la lumière. Généralement dans le cas des sables grossiers l'épaisseur de la chambre de mesure est de 1 cm.

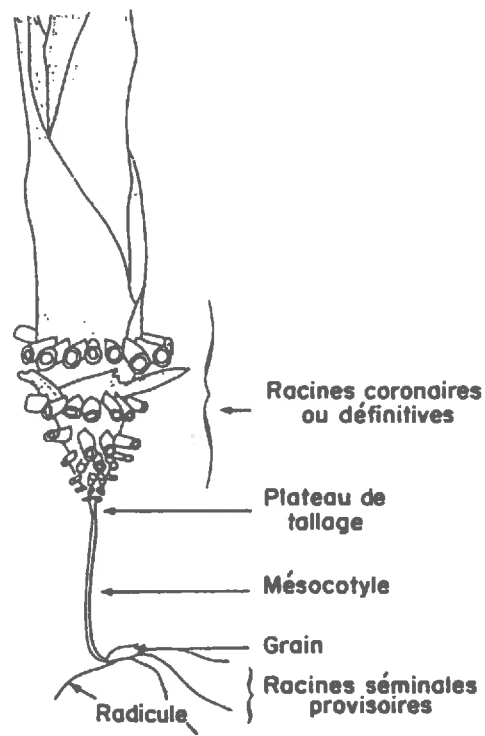


Figure 5 : Le système racinaires du maïs : des racines issus de la graine et de la tige.

Dans les paragraphes suivant, nous allons nous attacher à voir si la méthode de transmission lumineuse est adaptable pour un sol de type sableux colonisé par des racines et si on peut obtenir des renseignements d'ordre quantitatif sur le prélèvement hydrique distribué dans l'espace et son évolution dans le temps.

4. Matériels et Méthodes

Le matériel végétal

La plante utilisée est le maïs (*Zea mays*, variété DECA 604) plante annuelle monocotylédone. A partir de la graine se mettent en place la radicule et les racines séminales, avec un léger décalage dans le temps. Ce système racinaire séminale alimente la plante jusqu'au stade « 5-6 feuilles ». Ensuite, des racines nodales (appelées aussi racine coronaires à la **Figure 5**) apparaissent à partir du premier nœud, et ensuite jusqu'au nœud 7-8. Elles complètent progressivement l'alimentation hydrominérale et assurent l'ancrage au sol de la plante.

Chez le maïs, le développement du système racinaire s'effectue en trois temps : (i) émergence de la racine, (ii) croissance et (iii) ramification. La ramification va jusqu'à l'ordre 3 (tertiaires).

Les racines séminales ont un diamètre de l'ordre du millimètre, et les racines nodales ont un diamètre basal qui croît avec l'ordre du nœud d'émission de 1 à 5 mm au maximum.

Choix du milieu de culture

Les critères

Les critères guidant le choix du milieu de culture doivent satisfaire à la fois les contraintes imposées par la technique de transmission lumineuse (milieu non opaque, bon contraste de luminosité entre l'état sec et saturé) et les contraintes d'alimentation hydrique de la plante, pour lesquelles le milieu doit se rapprocher au mieux d'un « sol naturel », et non pas d'une culture en hydroponie.

Concernant la transmission lumineuse, le sable de quartz est un matériau de choix car il est relativement translucide suivant sa pureté. Il est disponible dans différentes granulométries. Ce sera le composant majoritaire du milieu. Les différents mélanges seront testés quant à leur translucidité et contraste (c'est à dire : milieu non opaque à l'état sec et grande dynamique de la lumière transmise entre l'état sec et saturé). Nous voulons obtenir un milieu non opaque à l'état sec pour avoir une idée de la structure du milieu pour soustraire son influence sur les mesures, mais face à la difficulté de dessécher le rhizotron colonisé par des racines, la structure sera observée via la saturation.

L'épaisseur de la chambre de culture doit ne pas être trop importante (< 1 cm) pour que la lumière incidente ne soit pas complètement absorbée par le milieu et suffisamment grande pour laisser un passage aux racines. Enfin, cette épaisseur doit être compatible avec une description bidimensionnelle des transferts étudiée. La taille imposée dans cette étude, pour satisfaire à ces contraintes, est de 4 mm.

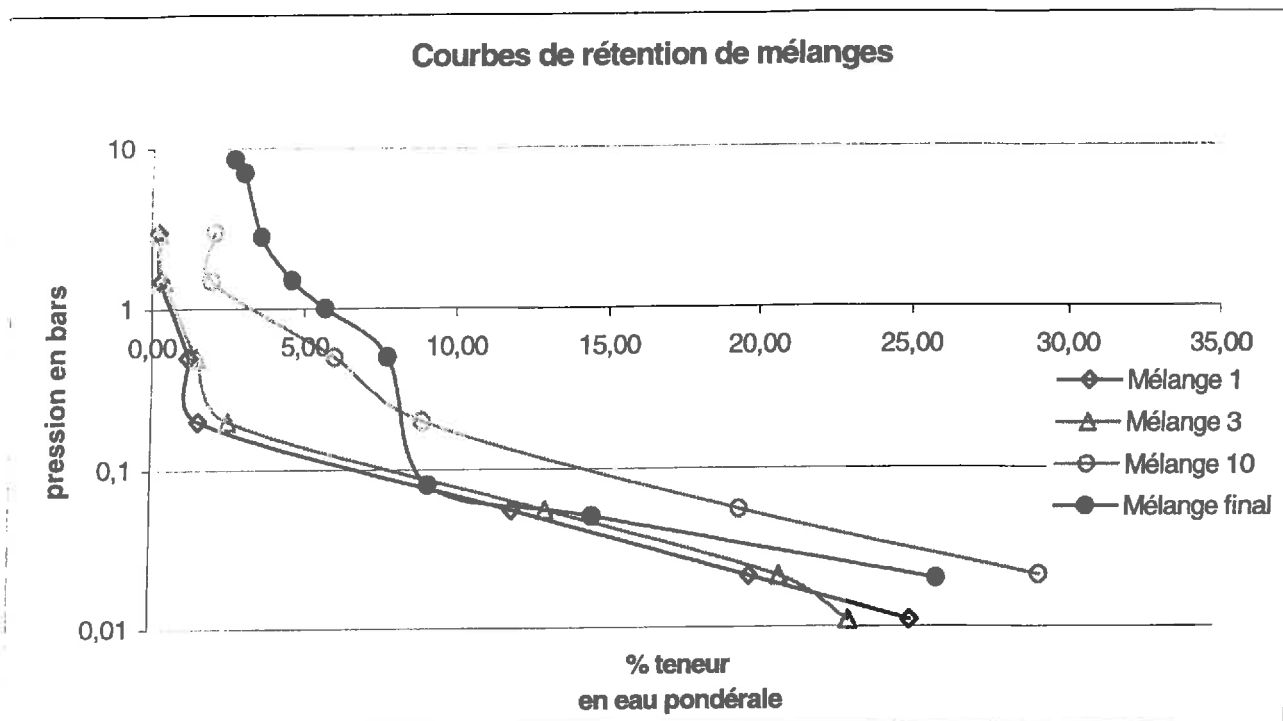


Figure 6 : Exemple de courbes de rétention de 3 essais de milieu non retenus et du mélange final utilisé :

Mélange 1 : 20 % de S1
10 % de S31
70 % de F15

Mélange 3 : 25 % de S1
60 % de F15
15 % de Fontainebleau

Mélange 10 : 20 % de S1
10 % de S31
60 % de F15
10 % de vermiculite

Mélange final : 1.5% d'Hectorite
98.5% de Fontainebleau

Concernant la « qualité » du milieu par rapport aux prélèvements de la plante et aux transferts sol-plante, le principal problème d'un sable est qu'il réagit comme un milieu « tout ou rien » avec une Réserve Utile très faible. Il s'agit d'augmenter cette réserve utile, par exemple en jouant sur l'étendue de la granulométrie du milieu et/ou sa texture. Pour cela on étudiera donc la courbe de rétention de différents mélanges sableux, en prenant comme référence un point à 3 bars de cette courbe où on essaiera d'avoir la plus forte teneur en eau possible.

Les essais

Pour chaque essai, on teste le critère de translucidité à l'aide d'une chambre constituée de deux plaques de verres espacées de 0.4 cm et de 10 cm de haut et 20 cm de large. Cette chambre est remplie du mélange étudié et placée derrière une boîte à lumière constituée de 3 néons de 18 watts chacun. On enregistre les valeurs de lumière transmise en sec et lors d'une infiltration horizontale.

Ensuite, on mesure la teneur en eau du milieu étudié après équilibre à 3 bars dans une presse Richards en faisant une moyenne sur 3 répétitions (équilibre de 24 heures sous pression et séchage de 24 heures à 105°C pour l'humidité).

On détermine l'ensemble de la courbe de rétention, les mesures étant effectuées avec 3 répétitions.

Mélange sableux

Les premiers mélanges testés sont des sables de granulométries différentes en différentes proportions : S1 (45 μ m), S31 (100 μ m), sable de Fontainebleau (175 μ m) et F15 (200 μ m) afin d'étaler la courbe de distribution granulométrique du milieu (**annexe 1**, mélange 1 à 9). Des billes de verre de différentes tailles ont également été testées pour améliorer la translucidité, mais les teneurs en eau restent très faibles à 3 bars dans tous les cas.

La **Figure 6** illustre ce résultat pour deux mélanges sableux. On voit que, pour ces mélanges constitués uniquement de sables, on obtient des courbes caractéristiques qui présentant de très fortes variations d'humidité pour de faibles variations de potentiel matriciel entre 0 et 0.2 bars. De plus, dès 0.2 bar, le sable est déjà très sec (humidité pondérale < à 1 %). Ces types de milieux ne conviennent pas à une étude pour les transferts sol-racine.

Mélange sable – argile

Par l'ajout d'argile, on va pouvoir introduire une plus grande gamme de porosité et donc améliorer de façon conséquente la rétention de l'eau. Mais le choix de la proportion d'argile ne va pas jouer uniquement sur la rétention, cela va aussi jouer sur l'aération, la structuration, la conductivité hydraulique et les propriétés mécaniques du milieu (Halilat, 1998). Il y a donc un effet texture (sur la rétention de l'eau) et un effet structure qui peut aboutir à la génération de fissures si le milieu subit des cycles de dessiccation - humectation.

La proportion d'argile aura des conséquences primordiales sur les propriétés des sols influençant la croissance des racines (diffusion de l'oxygène, teneur en eau, résistance mécanique du sol), toute ces propriétés étant interdépendantes (par exemple si le milieu sèche, la diffusion de l'oxygène se fait plus facilement et est plus favorable à la croissance des

racines, mais la résistance du sol devient moins favorable (Klepper, 1991)). De plus, ces proportions seront déterminantes sur la stabilité du milieu, le suivi temporel des prélèvements d'eau par transmission lumineuse impliquant un milieu qui soit le plus stable possible.

Les premiers essais d'ajouts ont été faits avec de la vermiculite (micas déshydraté à haute température) finement broyée, puis de la kaolinite (**annexe 1**, mélanges 10 à 17). Le problème rencontré avec ces matériaux est qu'ils opacifient très fortement le milieu. En augmentant la rétention d'eau de cette manière, on opacifie également le milieu.

Par exemple, sur la **Figure 6** se trouve la courbe de rétention du mélange 10 contenant 10% de vermiculite mélangée aux sables S1, S31 et F15. Par rapport aux mélange sableux on observe bien l'amélioration de la rétention de l'eau, mais pour cette proportion de vermiculite, le milieu est trop opaque à l'état sec.

Il faut donc trouver une proportion seuil d'argile au delà de laquelle le milieu n'est plus assez translucide et en dessous de laquelle la rétention n'est pas notablement améliorée. Cependant, dans les mélanges étudiés, l'effet opacifiant de la vermiculite ou de la kaolinite l'emporte sur l'amélioration de la rétention d'eau. Les proportions d'argile qui satisfont le critère de translucidité sont insuffisantes pour améliorer la rétention de l'eau du milieu.

Mélange final

Dans la majorité des cas, les argiles sont opaques, mais il en existe quelques unes qui sont translucides, comme par exemple l'hectorite du gisement d'Hectore en Californie, que nous avons utilisé (BENTOME MA®, RHEOX). L'hectorite est une argile gonflante qui, ajoutée en faible proportion à l'eau forme un gel. Elle est utilisée sous forme purifiée envoyée par le fournisseur, sa granulométrie est inférieure à 1 μm .

D'autre part, nous avons sélectionné le sable de Fontainebleau car sa pureté offre une bonne translucidité.

Nous avons effectué des mélanges de ces deux composants en différentes proportions (**annexe 1**, mélanges 18 à 21). Quand l'hectorite est mélangée à moins de 3% au sable de Fontainebleau, il n'apparaît pas d'importantes fissurations après saturation et dessiccation du milieu. L'hectorite présente toutes les qualités requises. D'après les teneurs en eau restantes à 3 bars, les tests sur la translucidité et la stabilité, le mélange final sélectionné est constitué de *98.5% de sable de Fontainebleau et 1.5% d'hectorite*.

La courbe de rétention de ce mélange est présentée à la **Figure 6**. Elle présente 2 zones de forte variation de l'humidité avec le potentiel hydrique, l'une vers 0.04 bars et l'autre vers 2 bars (correspondant à des diamètres de pores de 75 et 1.4 μm respectivement). La partie de la courbe où la teneur en eau est supérieure à 10 % est liée à la présence du sable, et la dernière partie aux modifications apportées par l'hectorite. Ce mélange, translucide à l'état sec, va donc permettre d'étaler la restitution de l'eau du milieu initialement à saturation lors des prélèvements par les racines.

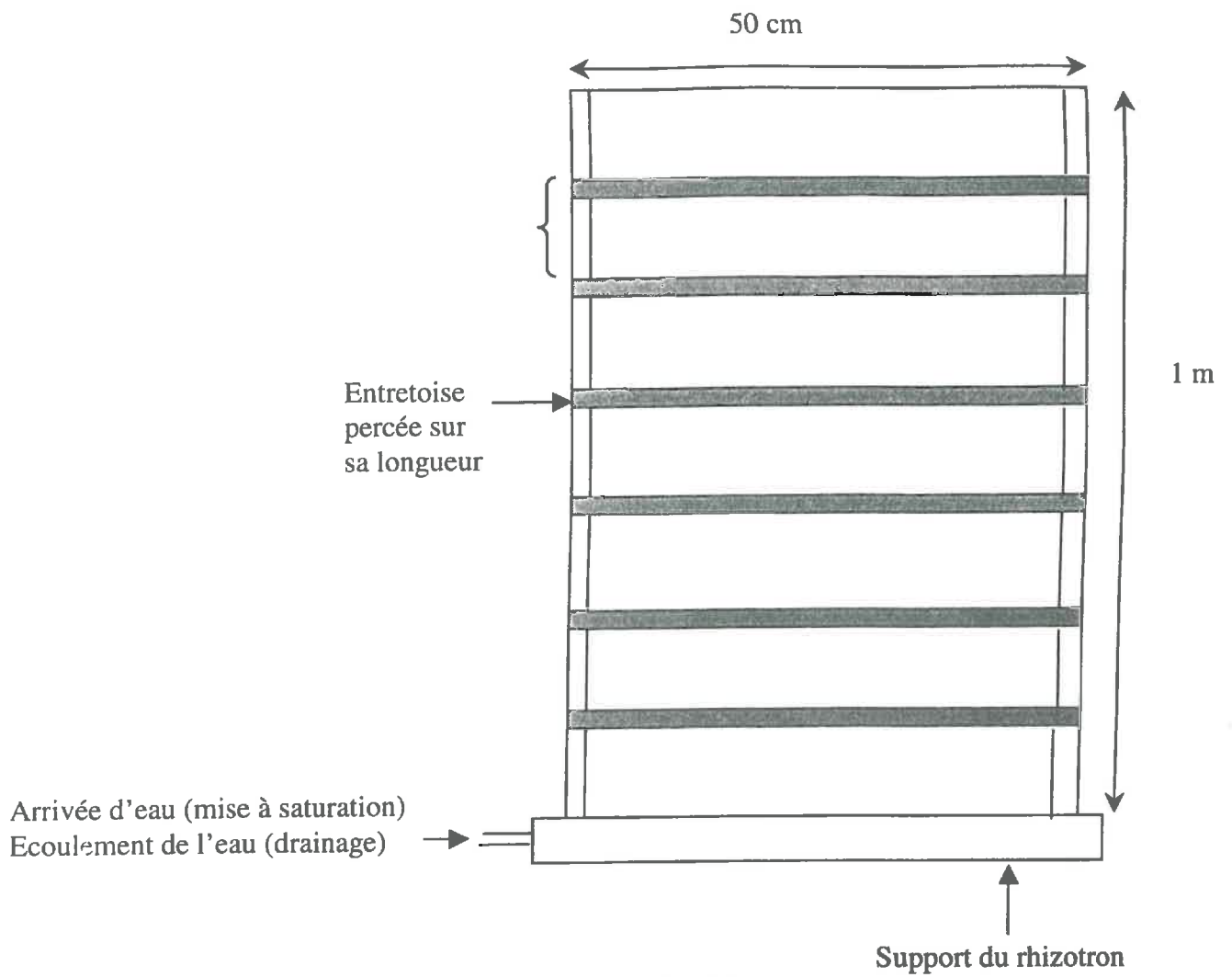


Figure 7 : Vue de face du rhizotron

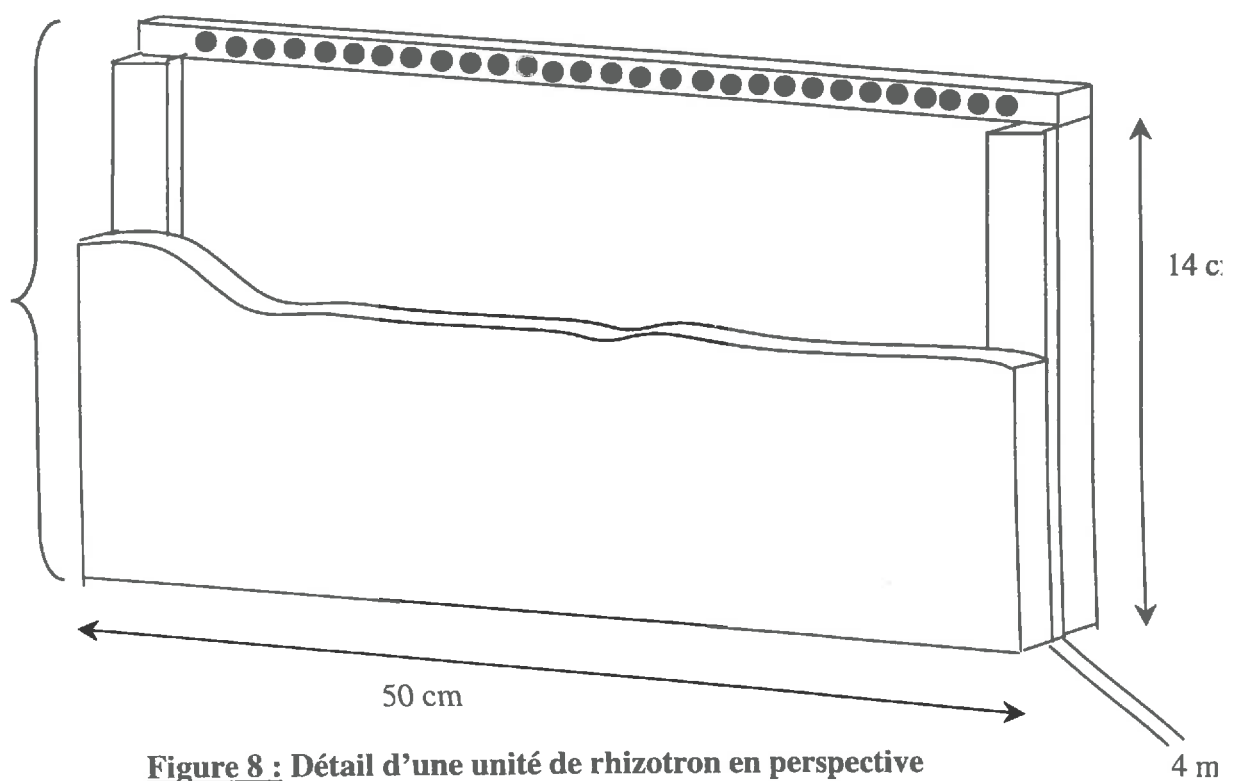


Figure 8 : Détail d'une unité de rhizotron en perspective

Le dispositif expérimental

Matériels et organisation du dispositif

Le mélange sableux doit ensuite être introduit dans un rhizotron transparent permettant les mesures de transmission lumineuse et le suivi de la croissance des racines.

Un schéma du rhizotron est donné aux **Figure 7 et 8** : il mesure 100 cm de haut sur 50 cm de large pour 0.4 cm d'épaisseur. Chaque paroi est constituée de 7 plaques de verre de 14cm de hauteur sur 50 cm de large. Entre les plaques de verres sont disposées des entretoises en PVC percées de trous de 2 mm de diamètre tous les 4 mm sur les 50 cm de longueur. Ces entretoises permettent une aération du milieu : ces trous sont suffisamment grands pour que l'air diffuse dans le milieu et suffisamment petits pour que l'eau et le mélange sable-argile ne sortent pas en absence de charge d'eau. Le rhizotron repose sur un tube carré percé des trous sur la surface commune avec la base du rhizotron. Ce support répond à plusieurs exigences : il est résistant (le dispositif pèse plus de 20 kilos), il permet l'arrivée d'eau pour la mise à saturation du milieu par le bas, et permet le drainage du milieu le surmontant pendant l'expérience.

L'organisation du dispositif expérimental est schématisé à la **Figure 9** : Le rhizotron (de profil) est placé devant une source lumineuse plane. Elle est constituée de 19 néons de 18 watts chacun, 56 cm de long et disposés sur une hauteur totale de 116 cm. Une plaque d'altuglass (référence : 27 018) diffusante et pigmentée blanche de 4 mm d'épaisseur est disposée devant la boîte à lumière pour homogénéiser la lumière provenant des différents néons.

L'intensité lumineuse transmise à travers le rhizotron et le mélange sableux est enregistrée au moyen d'une caméra noir et blanc CCD (Watek WAT-505EX CCIR) disposée à deux mètres de la face extérieure du rhizotron. La numérisation de l'image effectuée par une carte numérique d'acquisition vidéo reliée à un ordinateur, permet d'avoir une résolution de 752 * 582 pixels, codés par une intensité de gris allant de 0 à 255.

Remplissage du rhizotron

Le remplissage se fait parallèlement au montage du rhizotron : on introduit le mélange sableux entre les deux plaques en verres, avant d'installer les suivantes, pour avoir un milieu le plus homogène possible. Chaque étape de remplissage se fait de manière identique : on apporte en une seule fois la quantité de sable remplissant un compartiment, puis on tasse le sable en tapant le même nombre de coup sur le sommet du dispositif.

Mise à saturation du milieu sableux

D'après la construction du rhizotron, l'eau arrive par le bas du dispositif. La mise à saturation s'effectue donc par l'application d'une charge d'eau. L'eau n'est pas introduit par la partie supérieure du rhizotron pour éviter un phénomène de piégeage de l'air.

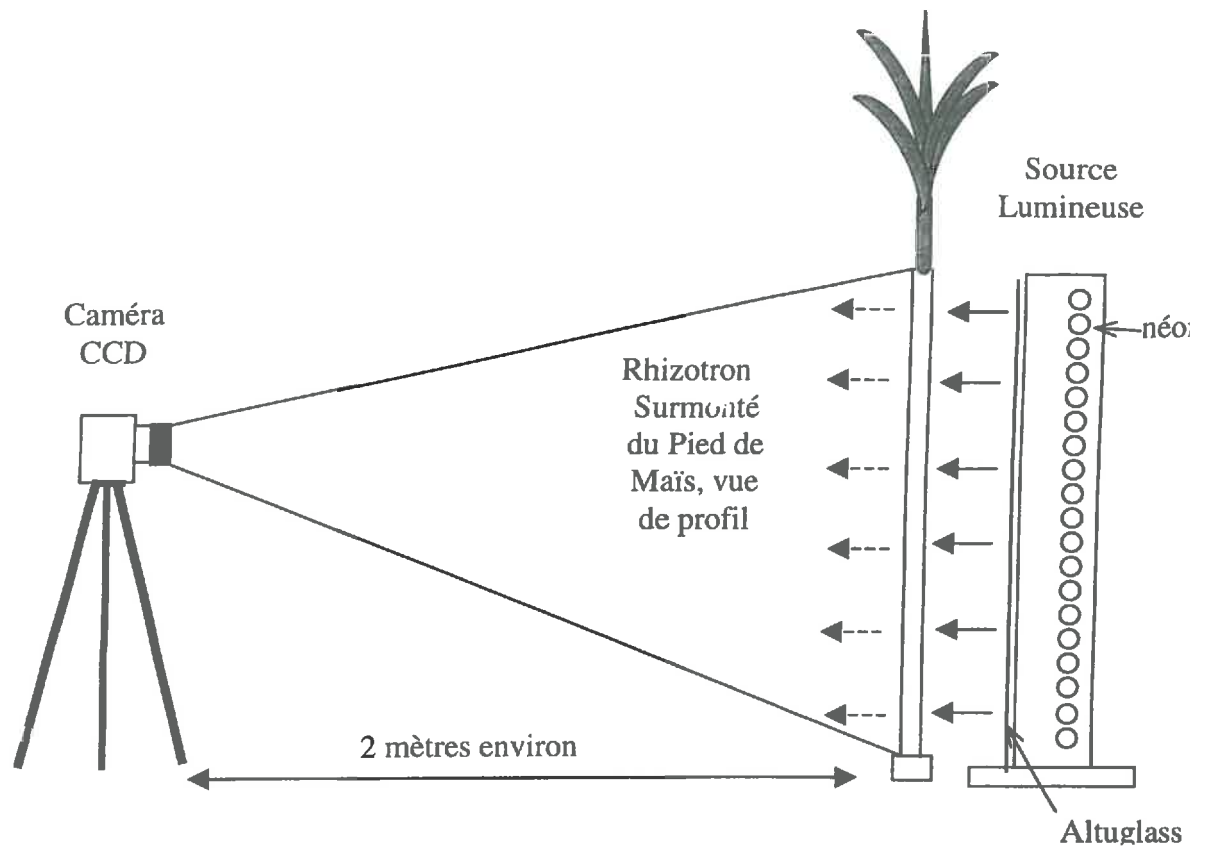


Figure 9 : organisation du dispositif expérimental.

Dans la pratique, nous avons été confronté aux problèmes de fuites d'eau au niveau des entretoises quand la charge d'eau appliquée devenait trop forte. Nous avons donc changé de tactique : la saturation a été effectuée par immersion progressive et totale du rhizotron dans l'eau. Ne disposant pas de récipient suffisamment haut, il a fallu incliner le rhizotron, ce qui entraîna quelques pertes de sable à des endroits localisés autour des trous des entretoises. Ainsi, la structure du milieu à l'état saturé n'est pas strictement identique à celle de l'état sec initial.

Conditions culturales

L'expérimentation a été effectuée dans un phytotron (chambre de culture à environnement contrôlé). Les conditions de croissance ont été choisies avec une thermopériode de 24°C le jour et de 20°C la nuit dans un premier temps (pendant les 15 premiers jours), puis de 30°C le jour et de 24°C la nuit, avec une intensité lumineuse de 450 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. La rampe de lumière a été allumée pendant 13 heures par jour. L'hygrométrie est imposée à 60 % pendant la croissance du maïs et à 45 % pendant la phase d'expérimentation.

Le milieu, initialement saturé, permet l'implantation d'une graine de maïs pré-germée. Ensuite, le plant de maïs est arrosé avec une solution nutritive Hoagland semi-normale modifiée (**annexe 2**).

Description de l'expérimentation

Nous voulons suivre l'évolution temporelle des prélèvements d'eau par les racines de maïs après un apport d'eau saturant le rhizotron, jusqu'à un dessèchement avancé du rhizotron. L'étude se fait à deux échelles temporelles : comportement des prélèvements sur une journée et sur plusieurs jours.

Pour l'étude journalière, les prises de vue débutent avant le 'lever du jour' (programmé à 8h) pour pouvoir mettre en évidence les redistributions d'eau durant la nuit. Elle se terminent après le début de la 'nuit' (programmé à 21h). L'intervalle entre chaque mesure est de 40 minutes ou 1 heure.

Pour l'étude sur plusieurs jours, la fréquence des prises de vue est moindre dans la journée : avant et après le 'lever du jour', à la mi-journée, à la fin d'après midi et à la fin de journée.

Nous avons effectué deux séries de mesures. Ces deux séries correspondent à un suivi de 7 jours consécutifs. A chaque série correspond un unique apport d'eau. Chaque journée est organisée comme suit :

Arrosage régulier pendant la journée du 15/07/99.

Première série :

- Le 16/07/99 : mesures toutes les 40 minutes de 7h50 à 21h30.
- Le 17/07/99 : mesures toutes les 40 minutes de 7h50 à 21h30.
- Le 18/07/99 : 5 mesures dans la journée, à 7h50, 9h10, 13h50, 18h30 et 20h30.
- Le 19/07/99 : 5 mesures dans la journée, à 7h50, 9h10, 13h50, 18h30 et 20h30.

Arrosage goutte à goutte pendant la nuit du 19 au 20.

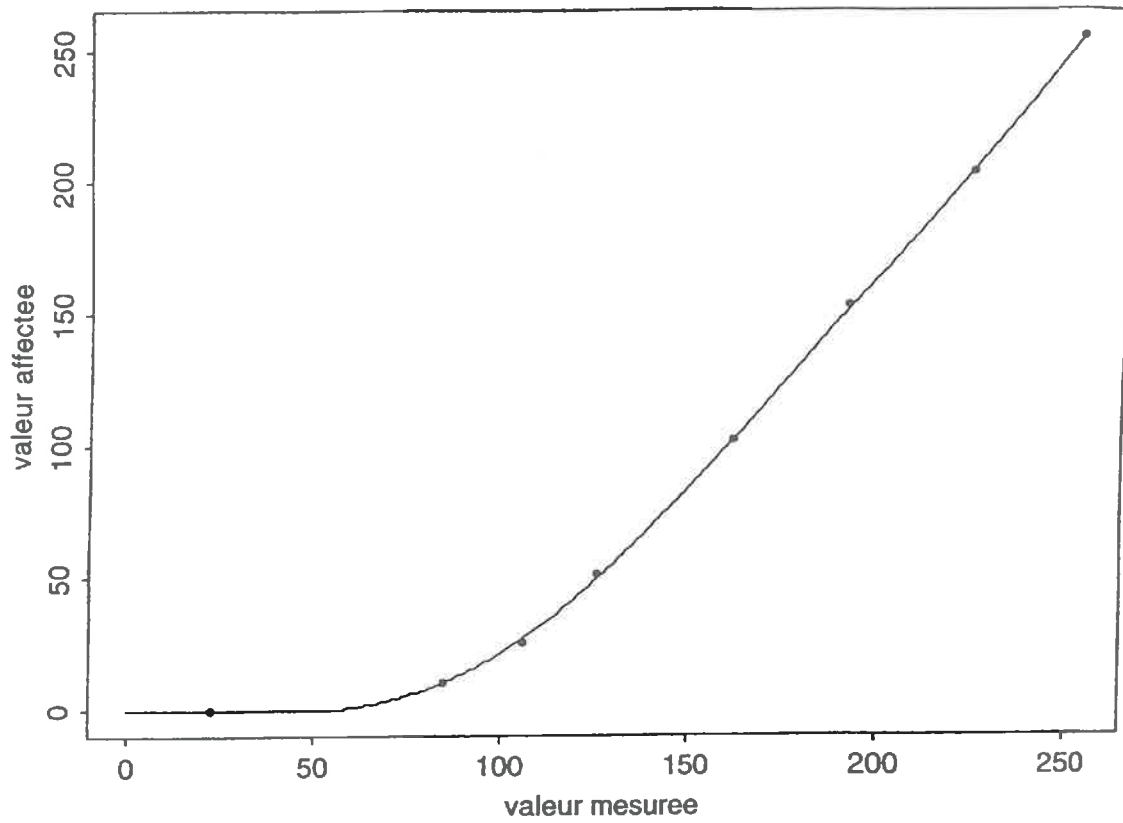


Figure 11 : Exemple de relation pour la transformation des valeurs mesurées d'intensités des gris de la photo en valeurs normalisées.

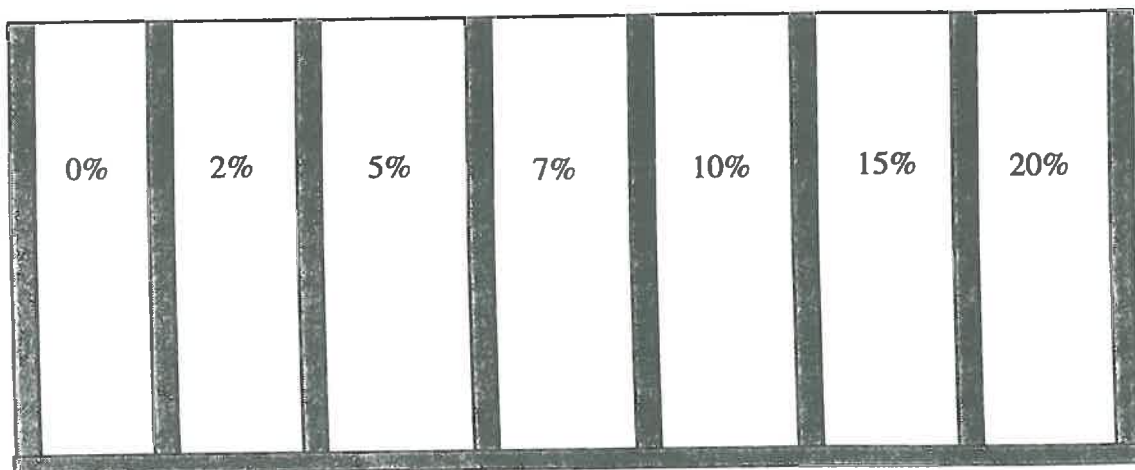


Figure 12 : Vue de face de la chambre d'étalonnage.

Deuxième série :

- Le 20/07/99 : mesures toutes les heures de 7h50 à 8h50, puis une mesure à 21h30.
- Le 21/07/99 : mesures toutes les heures de 7h50 à 8h50.
- Le 22/07/99 : mesures à 7h50, 08h50, 13h50 et 19h00.

Les mesures commencent alors que le maïs est âgé de 1 mois et ½, la plante possède 8 feuilles, les dernières racines nodales émises proviennent du quatrième nœud.

Dans les analyses qui suivent, nous décriront plus particulièrement les résultats concernant la première série.

Traitements des images

Ajustement des images

Des variations d'intensités lumineuses, non causées par des variations de teneurs en eau, peuvent intervenir lors de l'expérimentation. Elles peuvent être dues à des bruits thermiques de la caméra (la photo prise avec le cache sur l'objectif indique un écart type de 1.3) ou des bruits de lumière. Pour les éliminer, nous utilisons une mire constituée de 8 bandes d'intensités de gris différentes répartie régulièrement de 0 à 255 (**Figure 10**) :

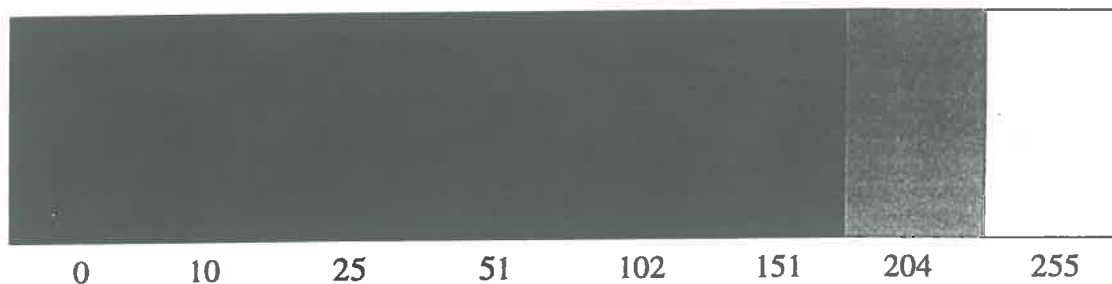


Figure 10 : bandes de 8 intensité de gris différents formant la mire.

D'autre part, l'acquisition des images pouvant se faire à différentes vitesses, correspondant à des temps d'acquisition des images plus ou moins long, c'est à dire à des luminosités de l'image plus ou moins forte pour un même état physique, la mire permet aussi de corriger les variations d'intensité lumineuse dues aux différentes vitesses utilisées.

Concrètement, la mire permet de corriger chaque image en la ramenant à une échelle de gris normalisée, invariable, grâce à une relation ajustée 'valeurs mesurées / valeurs normalisées' qui doit être déterminée pour chaque photo (**Figure 11**). Les valeurs normalisées calculées sont donc comparables pour toutes les photos.

Etalonnage

Grâce à l'étalonnage, ces intensités de gris normalisées vont être converties en teneurs en eau. L'acquisition de la lumière transmise à travers l'étalon se fait dans les mêmes conditions que celle du rhizotron : même distance à la caméra et à la boîte à lumière.

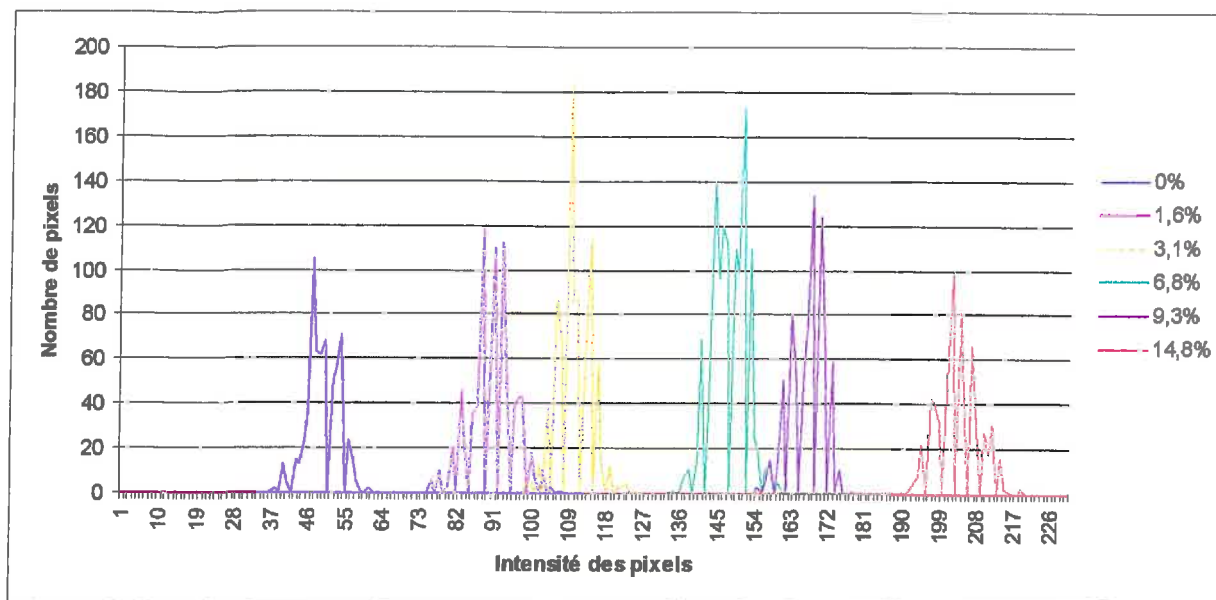


Figure 13 : Distribution de 1000 intensités de gris pour différents teneurs en eau de la photo brute de l'étalonnage

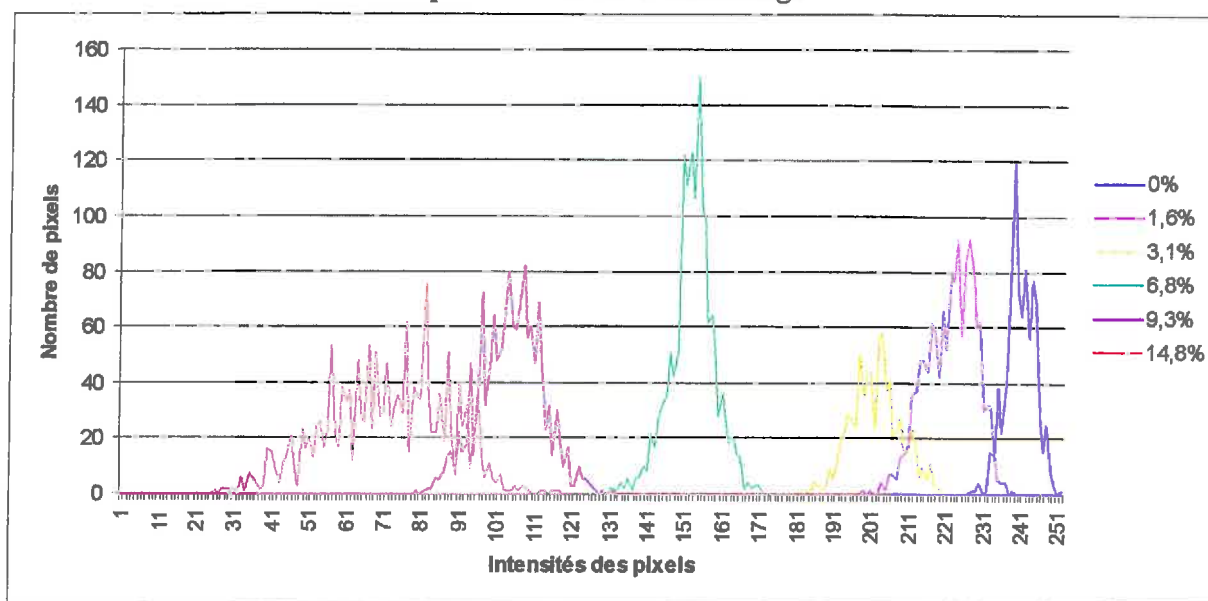


Figure 14: Distribution de 1000 intensités de gris pour différents teneurs en eau de la photo normalisée et soustraite de l'étalonnage

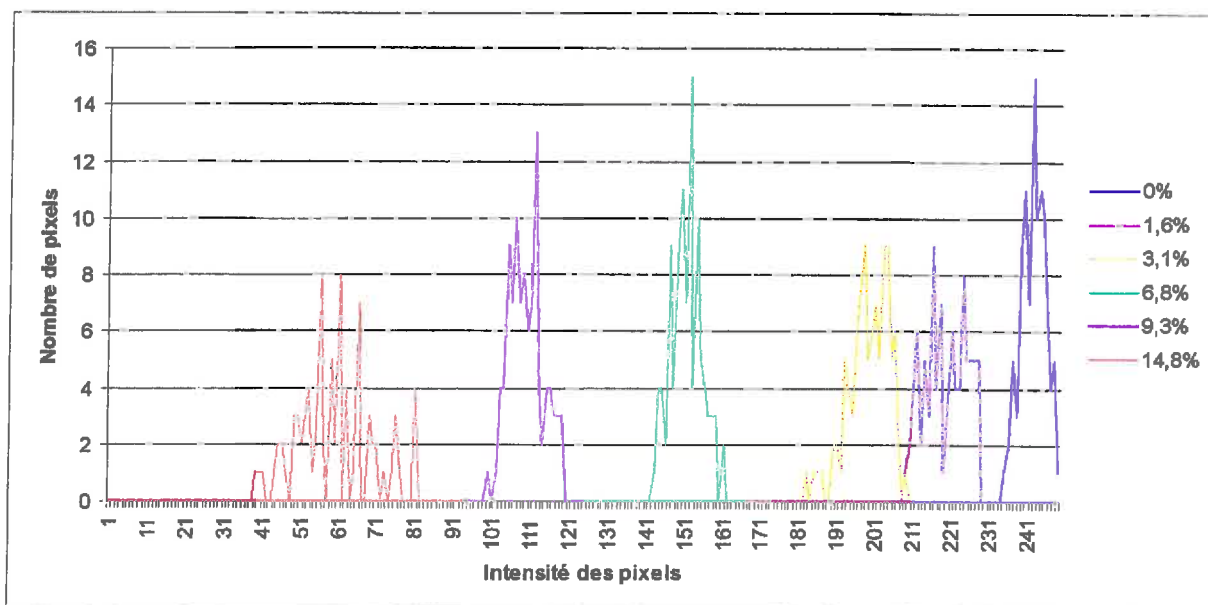


Figure17 : Distribution de 100 intensités de gris pour différents teneurs en eau de la photo normalisée et soustraite de l'étalonnage

Pour obtenir la courbe d'étalonnage reliant la teneur en eau à l'intensité de gris normalisée dans le mélange sable-argile, une chambre d'étalonnage à 2 dimensions a été construite (**figure 12**). Elle est composée de 7 compartiments différents, dans lesquels seront introduit du mélange sableux d'humidité connue : 0, 2, 5, 7, 10, 15 et 20% de teneur en eau pondérale.

Un étalonnage préliminaire contenait les teneurs en eau de 0, 5, 10, 15, 20 et 25 %. Mais les intensités lumineuses mesurées ne permettant pas de différencier les deux dernières teneurs en eau, on a supprimé la teneur en eau de 25 % de l'étalonnage.

Les dimensions de la chambre d'étalonnage sont de 50 cm de large, 14 cm de hauteur. L'épaisseur entre chaque plaque de verre est de 4 mm. Chaque cellule a une largeur de 6 cm et une hauteur de 13 cm.

Les teneurs en eau pondérale du mélange sont obtenues en mélangeant la quantité d'eau exacte, obtenue par pesée, avec le mélange sable-argile dans un petit récipient. Pour que la répartition de l'eau soit la plus homogène possible, on laisse s'équilibrer les mélanges humidifiés recouvert d'un film plastique toute une nuit au réfrigérateur.

Le remplissage est effectué de la même façon pour tous les compartiments. Chaque mélange déjà humidifié est incorporé dans une cellule à l'aide d'une spatule en s'appliquant à ce que le mélange soit bien tassé et homogène.

Pour vérifier la précision des pesées et les pertes éventuelles d'eau par évaporation lors des différentes étapes de préparation et de remplissage de la chambre d'étalonnage, on récupère les restes des mélanges ayant permis le remplissage de chaque compartiment. Les petites quantités recueillies ne permettent pas de faire de répétition. On obtient les teneurs en eau pondérales finales de : 0, 1.6, 3.1, 6.8, 9.3, 14.8 et 19.8%.

Le remplissage des compartiments de l'étalonnage donne un milieu avec une structure de sol différente de celle du rhizotron. Pour s'affranchir des effets de structure, on met à saturation chacun des compartiments de l'étalon après l'étalonnage, et l'image de l'étalon à saturation est soustraite de l'image de l'étalon à l'état brut (après avoir vérifié que les images sont parfaitement superposables). On suppose que la mise à saturation ne modifie pas la structure.

5. Résultats

Résultats de l'étalonnage

La qualité de l'étalonnage est donnée, dans un premier temps, par la distribution des intensités de gris pour les teneurs en eau de chaque compartiment. En utilisant l'image brute de l'étalonnage, c'est à dire sans de transformation par rapport à la mire, on obtient la **Figure 13**. On voit que les maximums des courbes sont bien distincts. On note toutefois un léger recouvrement dans la distribution des intensités de pixels entre les teneurs en eau de 1.6 et 3.1% et entre 6.8 et 9.3%. Ces résultats sont obtenues en sélectionnant un milliers de pixels dans chaque compartiment.

Les images brutes pourraient être utilisées directement si le milieu était suffisamment homogène, si sa structure était comparable à celle du rhizotron et si on pouvait négliger les bruits thermiques de la caméra et de la source lumineuse, ce qui n'est pas le cas.

Après normalisation et soustraction de l'image de référence, on obtient la distribution des intensités de gris pour les teneurs en eau de chaque compartiment à la **Figure 14**. Ces courbes correspondent à un échantillonnage d'un millier de points par compartiment. On voit

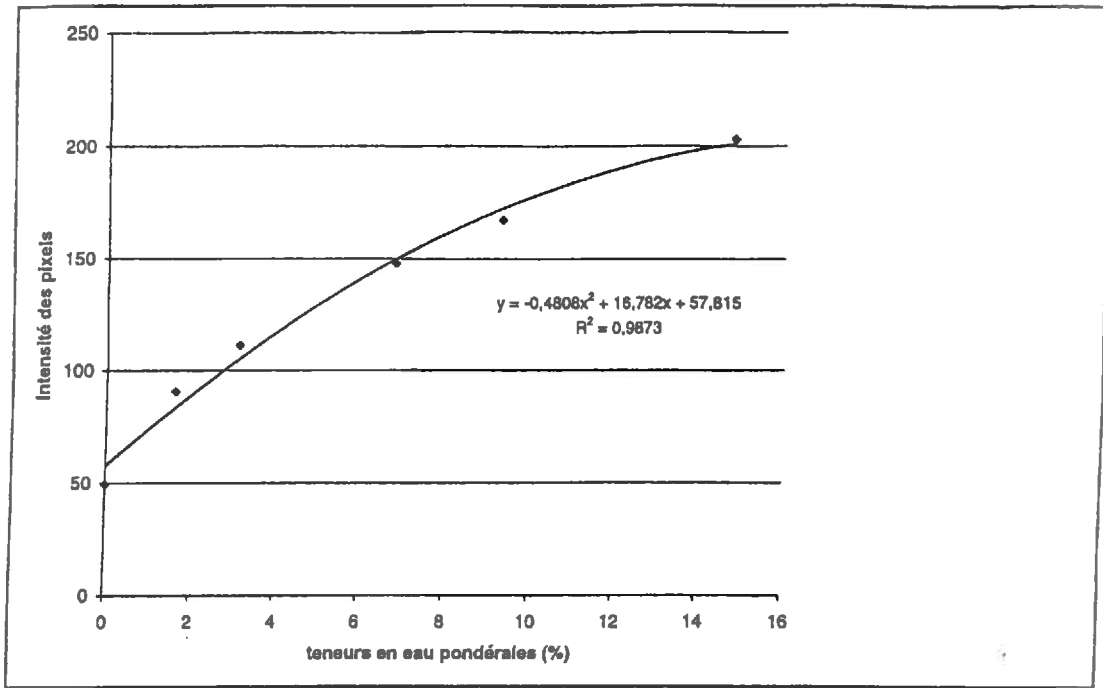


Figure 15 : régression obtenue par l'image brute de l'étalonnage.

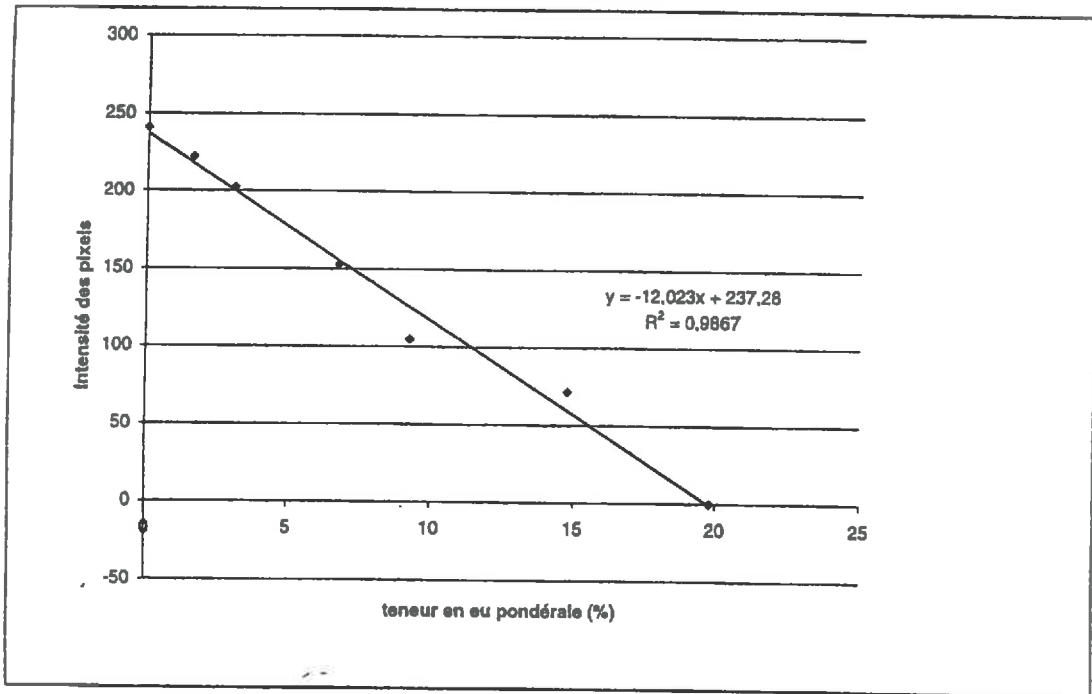


Figure 16 : Régression obtenue par l'image normalisée et soustraite à l'image de référence, avec un échantillonnage de 1000 points.

une plus grande variabilité de la distribution. Seule la courbe de 6.8% est bien distinctes des autres. Cette variabilité n'est pas du à la mesure en elle même, mais à la procédure pour mettre à saturation. La mise à saturation a provoqué des changements dans la structure qui aurait pu être évité par l'utilisation d'une autre procédure.

Si on considère uniquement les valeurs moyennes des intensités de pixels pour la photo brute et la photo normalisée et soustraite, on n'obtient pas le même type de régression. Pour la photo brute de l'étalonnage, à la **Figure 15.**, on voit que la régression qui passe au mieux par les moyennes est polynomiale. Alors que pour la photo normalisée et soustraite, la régression qui passe au mieux est linéaire (**Figure 16**). On ne linéarise pas à proprement parler, mais probablement à cause de la dispersion des mesures on ne voit pas la courbure.

La soustraction à l'image saturée introduit donc une plus grande variabilité et on obtient par ailleurs une relation d'étalonnage plus « linéaire ».

En diminuant le nombre de pixels échantillonnés de 1000 à 100 par compartiment, on peut sélectionner des zones dans chaque compartiment qui soient le plus homogène possible. Ceci peut être fait si les moyennes obtenues pour chaque compartiment avec 1000 et 100 pixels ne sont pas différentes. Le test de comparaison des moyennes nous permet de ne pas rejeter l'homogénéité des moyennes à un risque de 5 %.

La distribution des intensités de gris pour les teneurs en eau de chaque compartiment est à la **Figure 17**. Les distributions ne présentent pas de recouvrement. La sélection de zones homogènes a permis cette amélioration dans les distributions.

Si on considère la droite de régression qui prend en compte, non plus les moyennes, mais l'ensemble des points échantillonnés, on peut comparer l'effet du nombre d'échantillon sur la variabilité de la relation d'étalonnage. On obtient comme régression linéaire :

◇ pour un échantillonnage de 1000 points :

Equation de la régression $Humidité = -0.079 Intensité + 19.21$

$R^2 = 0.947$

Erreur résiduelle = 1.2% d'humidité pondérale

◇ pour un échantillonnage de 100 points :

Equation de la régression $Humidité = -0.078 Intensité + 18.69$

$R^2 = 0.9834$

Erreur résiduelle = 0.63% d'humidité pondérale

En jouant sur le nombre de pixels échantillonnés et sur l'emplacement des zones sélectionnées, on arrive donc à diminuer la variabilité et les erreurs résiduelles.

Darnault et al (1985) utilise également une chambre d'étalonnage pour convertir des intensités de lumière transmise, à travers une chambre à deux dimension rempli avec du sable grossier, en teneur en eau. La chambre d'étalonnage est constituée de 6 compartiments contenant le sable à 6 différentes saturation connues. Il ne mesure pas des intensités de gris mais des teintes composées du rouge, vert et bleu. Pour chaque compartiment, la teinte est mesurée à travers 100 pixels centrées sur une ligne horizontale et les images ne subissent pas de transformation. Les résultats de la distribution des teintes pour différentes teneur en eau de leur étalonnage est donné à la **Figure 18**. En comparaison à la **Figure 17**, on observe qu'on a une meilleure distribution dans la mesure où leur résultat présente des recouvrements, mais le nombre de pixel associé aux pics est inférieur pour notre étalonnage, c'est à dire qu'on a un étalement des mesures plus important. On a donc globalement des résultats comparables.

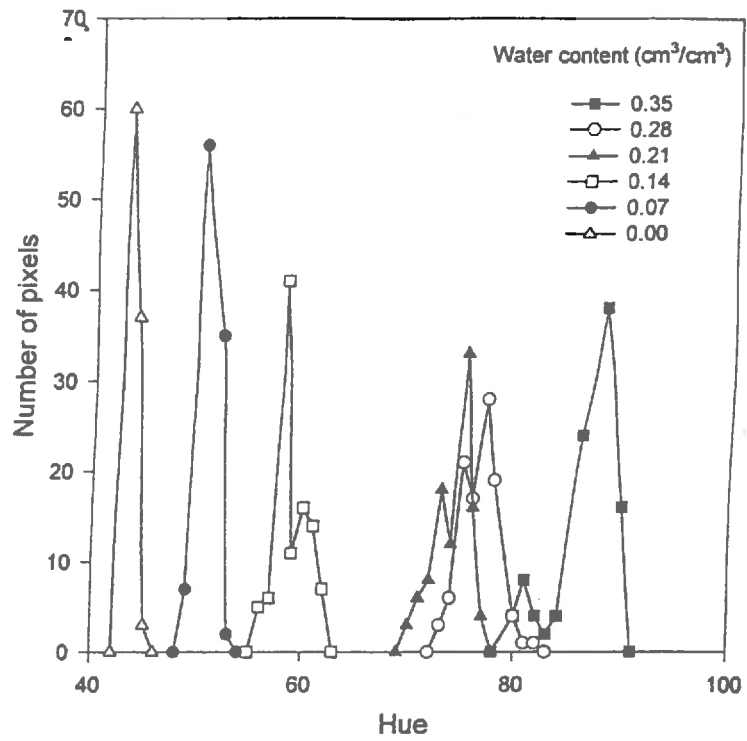


Figure 18 : Distribution des teintes pour différentes teneurs en eau de l'étalonnage (Darnault et al, 1998).

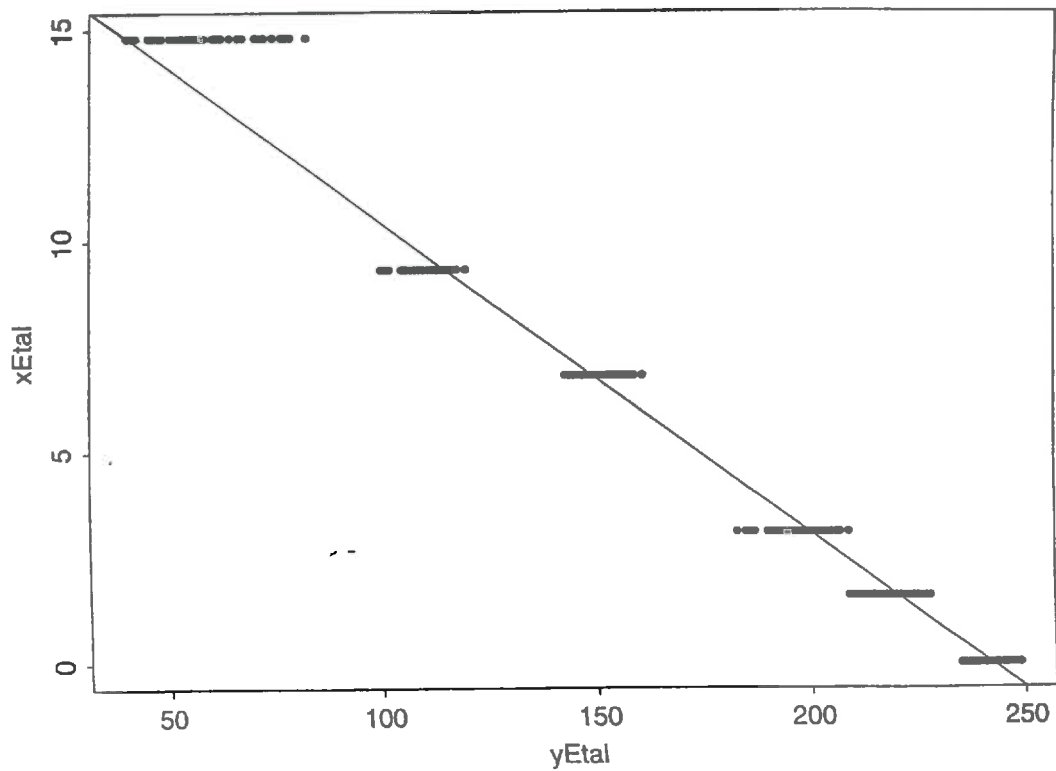


Figure 19 : Relation d'étalonnage obtenue par régression linéaire pondérée pour un échantillonnage de 100 points par humidité.

Pour établir l'équation de la relation d'étalonnage, on considère donc l'image de l'étalon normalisée et soustraite à l'image de l'étalon saturé avec un échantillonnage de 100 points par compartiment. Il faut, au préalable, déterminer si les variances des intensités de pixels pour les différentes humidités sont significativement différentes, car dans ce cas, il faudra pondérer la régression linéaire. Pour cela, on effectue le test de Hartley sur la comparaison des variances (**annexe 3**). Le test est significatif au seuil de confiance de 95 %, on peut conclure à l'inégalité des variances.

La détermination des poids affectés à chaque variable est détaillée à l'**annexe 4**. A la **Figure 19** se trouve le résultat de la régression linéaire pondérée et l'ensemble des 100 points échantillonnés dans chaque compartiment. La relation d'étalonnage obtenue est :

Equation de la régression $Humidité = -0.073 Intensité + 17.74$

$R^2 = 0.9874$

Erreur résiduelle = 0.18% d'humidité pondérale.

L'équation de la relation d'étalonnage ne nous permettra pas de calculer des teneurs en eau pondérales supérieures à 18 % alors que la courbe de rétention du mélange atteint les 25%. Vers la saturation on sous-estimera les teneurs en eau.

Le calcul de l'erreur d'étalonnage est détaillé à l'**annexe 5**. Les humidités H mesurées ont 95% de chance d'appartenir à l'intervalle Humidité mesurée $\pm 0.33\%$.

Ainsi, on a pris en compte l'erreur sur la pente et l'ordonnée à l'origine de l'équation d'étalonnage. Nous allons considérer que la variabilité rencontrée lors de l'étalonnage est la même que celle rencontrée lors de la prise des images du rhizotron. En supposant qu'on se trouve dans les mêmes conditions, on maximise ainsi l'erreur de la mesure.

Analyse qualitative des prélèvements d'eau par les racines

Description des images

Pour illustrer l'évolution photographiée des teneur en eau, les images normalisées par rapport à la mire pour 3 moments différents d'une même journée sont présentées aux pages suivantes. Le maïs est âgé d'un mois et ½. Les temps considérés sont : 07 h50, avant que les lumières s'allument ; 13h50 et 18h30. Chaque jour des 2 séries de mesure est présenté. Plus les pixels sont sombres, moins il y a d'eau dans le rhizotron.

Première série :

Par rapport à l'image à saturation prise la veille vers 18h00, l'image du 16 à 07h50 montre que les teneurs en eau baissent dans la moitié supérieure du rhizotron. A l'image suivante, les continuent de baisser dans la moitié supérieure, mais elles diminuent également progressivement plus en profondeur. La dernière image de la journée montre la même tendance.

Les trois jours suivant, le 17, 18 et 19, l'eau ayant déjà fortement diminuée dans la moitié supérieure dès le premier jour, la diminution se poursuit dans une moindre mesure dans cette moitié et progressent en profondeur. Plus on avance dans les journées, moins on distingue de différences entre les images d'une même journée.

80 cm

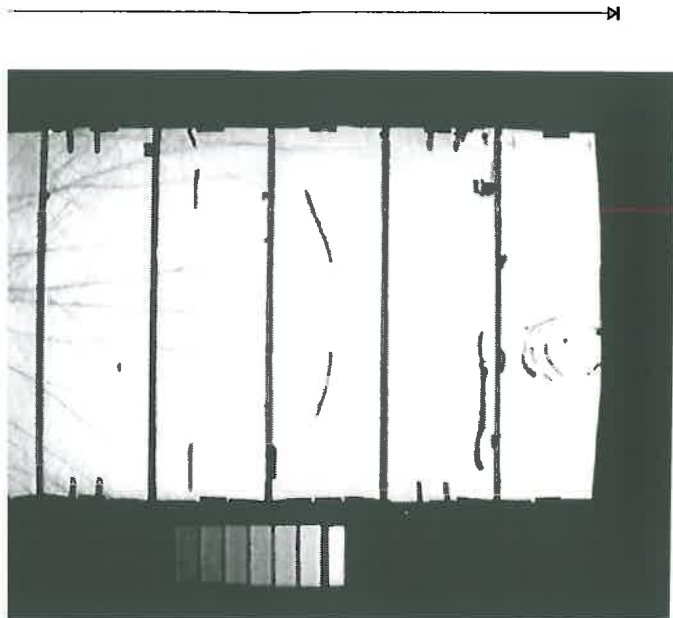
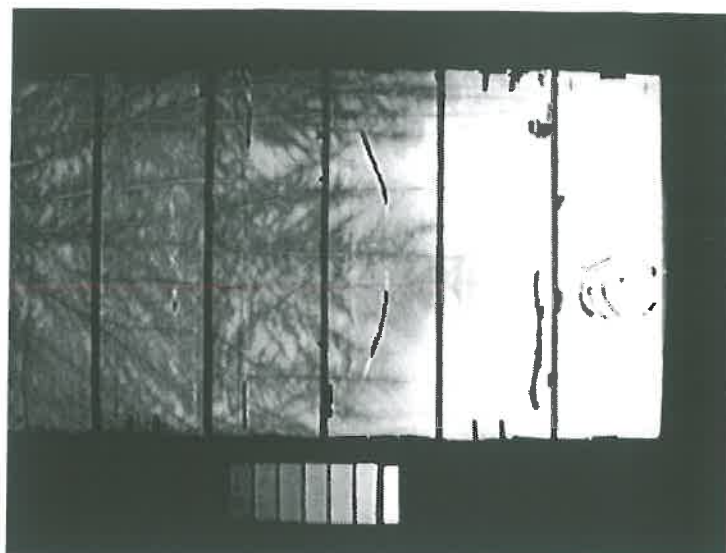
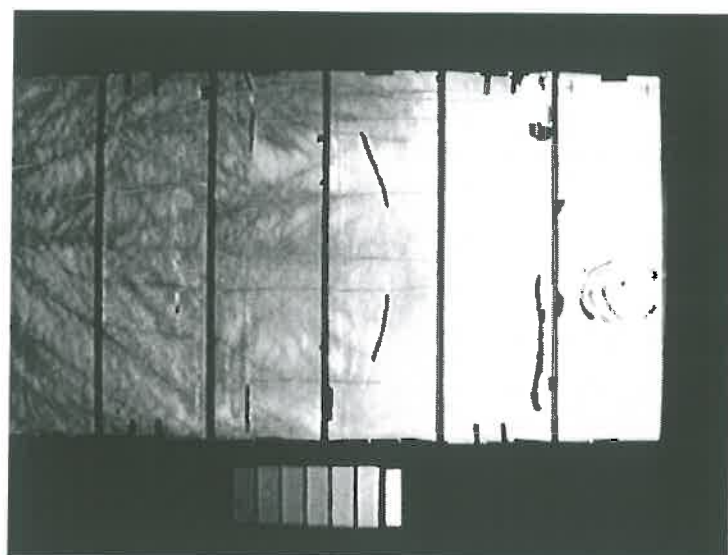


Image à saturation de la série 1
(16/07/99 18:00)

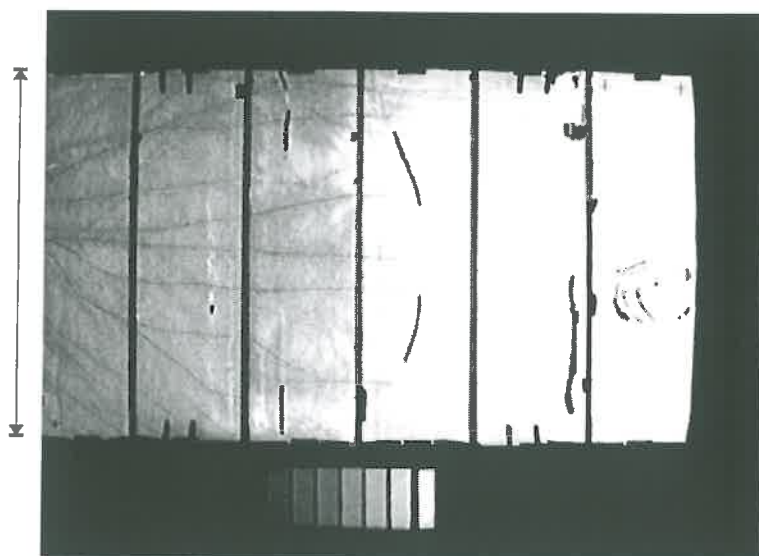


16/07/99 18:30

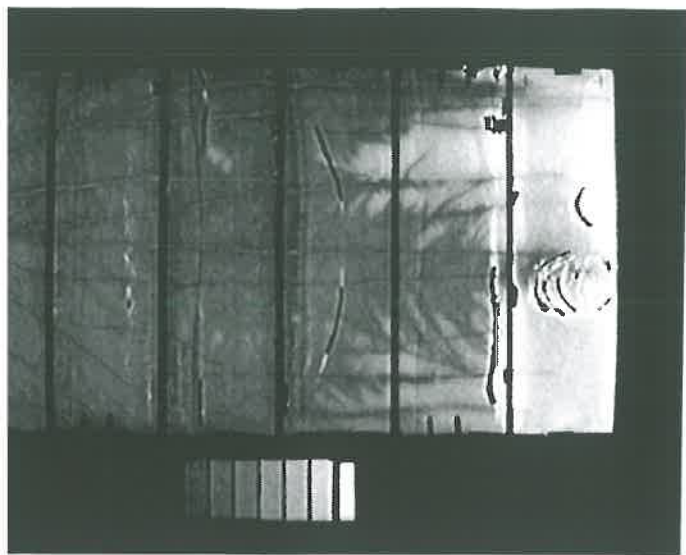


16/07/99 13:50

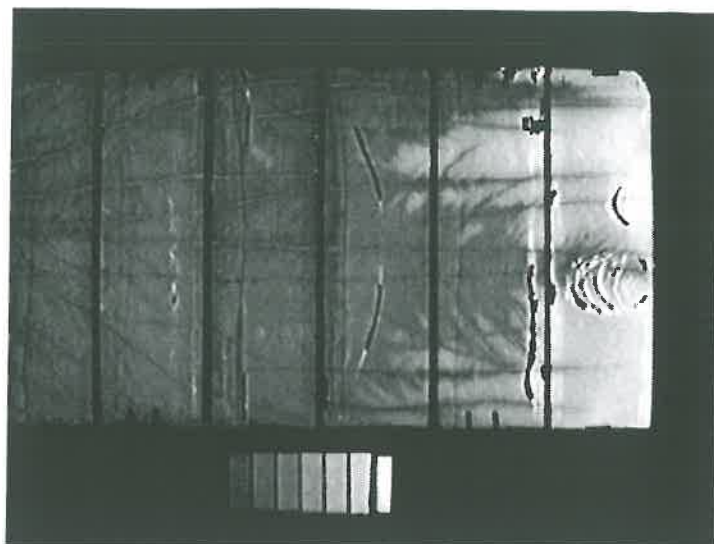
50 cm



16/07/99 07:50



20/07/99 07:50



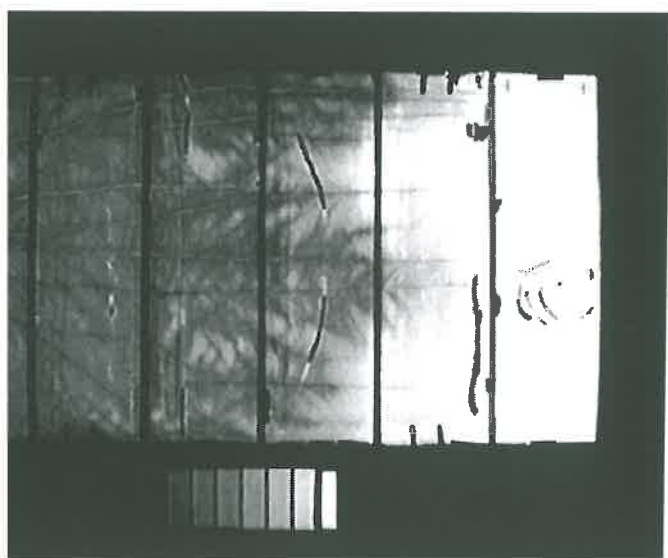
19/07/99 18:30



20/07/99 07:50



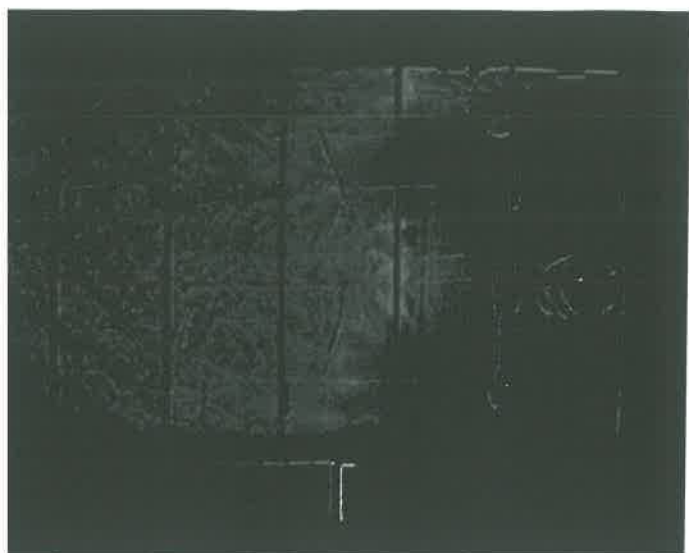
18/07/99 18:30



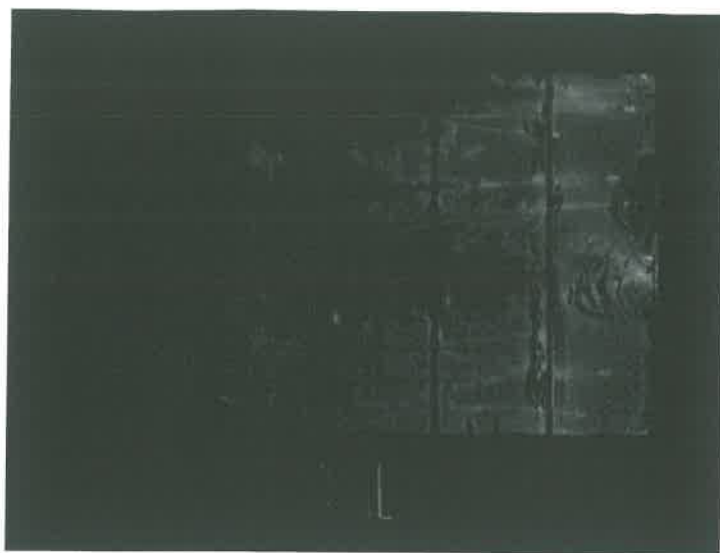
20/07/99 07:50



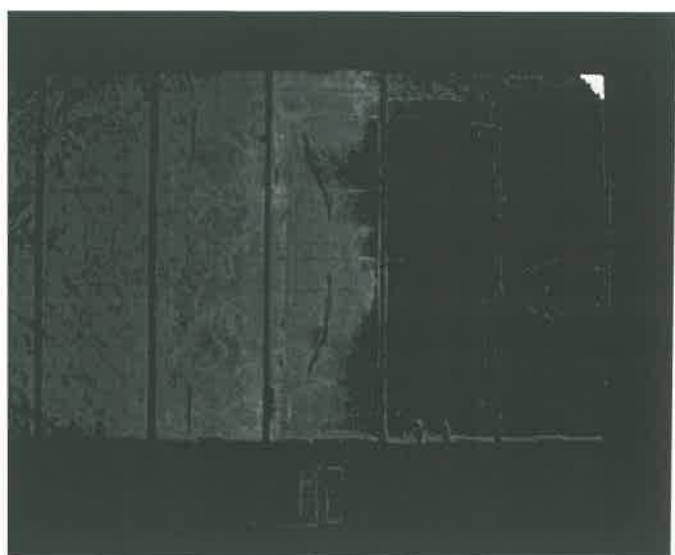
17/07/99 18:30



15/07/99 19h50- 18h30



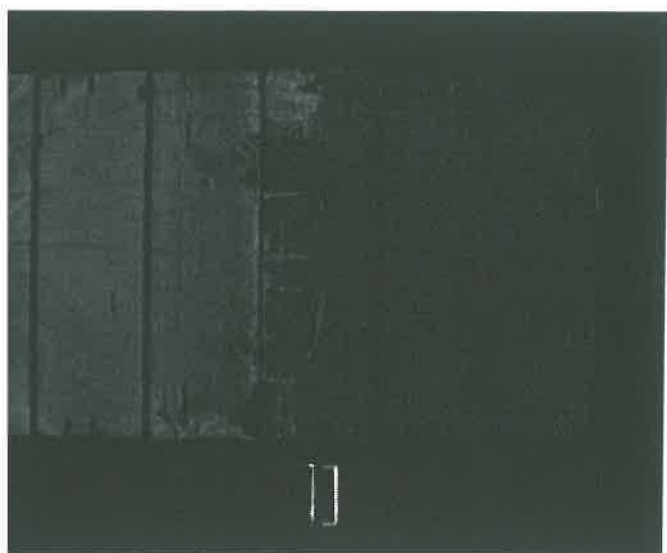
19/07/99 13h50 - 9h10



16/07/99 15h10- 13h50



18/07/99 13h50 - 9h10



15/07/99 9h10 -- 7h50



17/07/99 9h50- 8h30

Deuxième série :

On observe les mêmes tendances que la première série, les photos sont présentées en **annexe 6** : le premier jour après l'apport d'eau, les diminutions de teneur en eau se font principalement dans la partie supérieure du rhizotron, puis progressent en profondeur. Les jours suivant, elles s'estompent dans la partie supérieure alors qu'elles continuent à progresser en profondeur.

Pour cette série, les diminutions d'eau sont plus importantes car, à la fin du troisième jour, on se trouve dans une situation hydrique comparable à la fin du quatrième jour de la première série. Deux facteurs peuvent expliquer ce plus fort prélèvement : il y a une quantité plus importante de racines par rapport à la première série (croissance racinaire), et ces diminutions ont lieu immédiatement après que la plante ait subi un stress hydrique important. En effet, le port du pied de maïs à la fin du dernier jour de la première série était affaibli et les feuilles étaient fortement enroulées sur elles même.

L'ensemble de ces photos montrent aussi la localisation des racines. Seuls quelques racines plaquées contre la paroi peuvent être mises en évidence à saturation, mais les autres restent invisibles. Elles apparaissent lors des dessèchements : on obtient donc « radiographie » du système racinaire, c'est à dire une image fidèle de la localisation des racines par l'intermédiaire du dessèchement du milieu.

Pour affiner la description, la soustraction de deux images prises à des temps rapprochés permet de visualiser la progression des prélèvements qui apparaît en clair. Plus les pixels sont clairs, plus les prélèvements entre les deux horaires indiqués sont forts.

Première série :

Pour les deux premiers jours, l'intervalle de temps entre chaque image est de 80 minutes. On voit sur la première image du 16 que la zone de forte variation de teneur en eau, assimilée à du prélèvement, est répartie régulièrement dans la partie supérieure du rhizotron. Entre 13h50 et 15h10 cette zone n'est plus homogène : le plus fort prélèvement étant observé dans les parties les plus basses (phase de transition d'un prélèvement homogène vers un front de prélèvement). Entre 18h30 et 19h50 on observe la même tendance mais accentuée : dans la partie supérieure du rhizotron, on observe des plages de différences nulles plus larges que pour l'image précédente ; par contre, les zones les plus lumineuses de fortes différences sont plus concentrées dans l'espace autour des racines, en particulier sur les racines au centre du rhizotron.

Le deuxième jour, seuls subsistent les « impacts » de fortes différences de prélèvements autour des parties terminales des racines qui semblent les plus profondes.

Pour les deux derniers jours, l'intervalle de temps considérés est à peu près 4 fois plus grand que précédemment. On observe également des différences de prélèvements très ciblés dans l'espace.

Deuxième série :

On met en évidence le même comportement d'un prélèvement hétérogène qui se concentre dans l'espace au fur et à mesure que le milieu se dessèche (**annexe 6**).

Discussion

Si on considère l'ensemble du système racinaire, à l'échelle de la journée, pour une demande climatique identique, dans une même série : plus on avance dans les journées, moins on distingue de différences entre les images d'une même journée. Pour des teneurs en eau

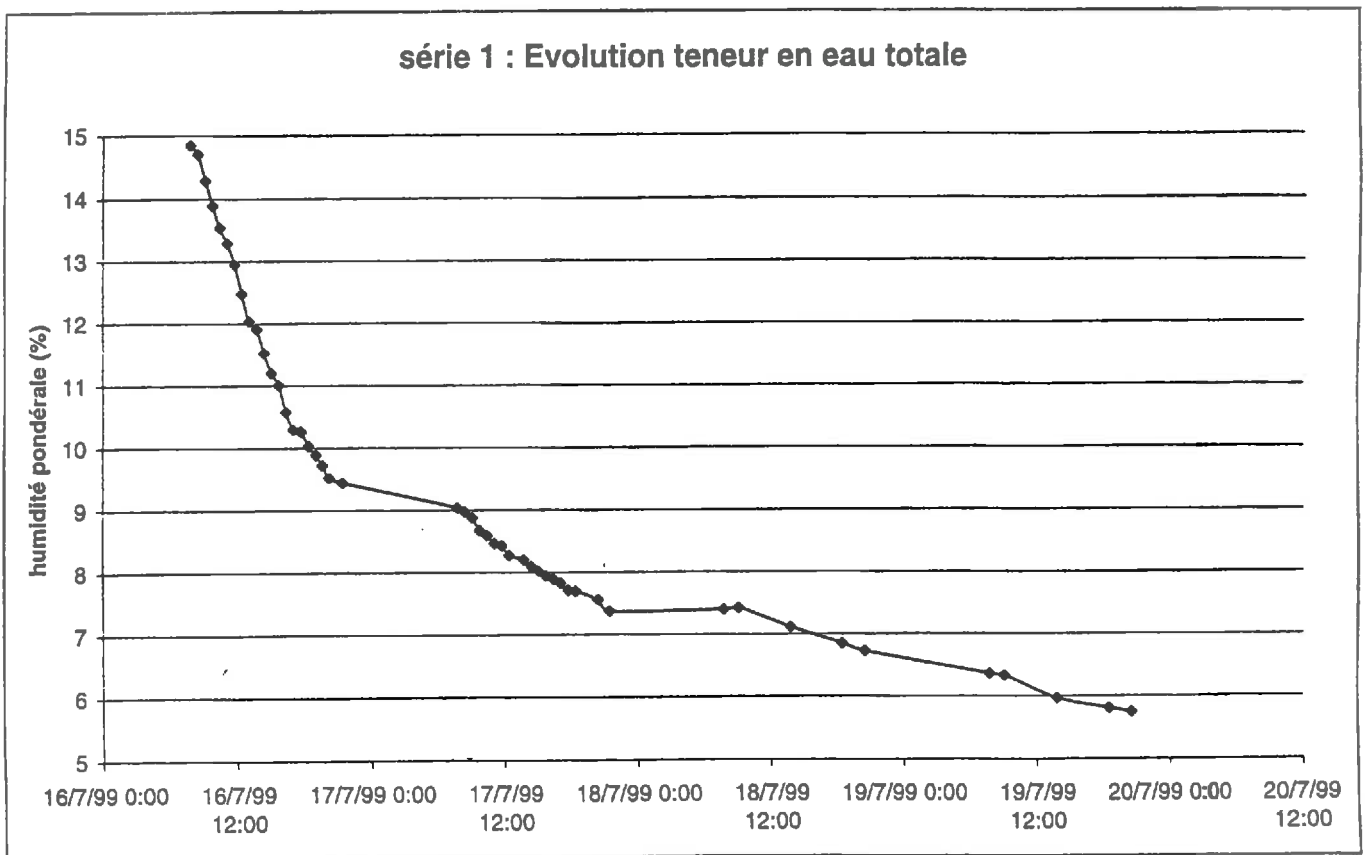


Figure 20 : Evolution des humidités pondérales moyennes de la série 1.

initiales différentes, les prélèvements apparaissent plus faible pour des teneurs en eau initiales inférieures. Ceci peut être dû à un plus faibles gradient de potentiel le long du continuum sol-plante-atmosphère dans le cas d'une faible teneur en eau initiale. Les prélèvements seraient également plus faible à cause d'une diffusivité inférieure autours des racines et d'une diminution de contact sol/racine. Ceci implique un accroissement de la résistance au transfert de l'eau du sol, un des facteurs contrôlant les prélèvements racinaires.

Les résultats montrent également des prélèvements qui ont lieu, dans un premier temps, au niveau de la partie supérieure du système racinaire. Trois facteurs contrôle ceci : la disponibilité de l'eau dans le milieu, la densité racinaire et la capacité d'absorption différenciée des racines. Ces prélèvements ont lieu après un apport d'eau massif, l'eau est donc disponible. La densité du système racinaire pour une plante bien alimentée en eau (condition de croissance de notre maïs) est forte à la surface du sol et diminue avec la profondeur (Klepper, 1991). L'acteur principal de l'absorption (les racines) est donc présent en densité supérieure par rapport au reste du rhizotron. Si on considère les conductances radiale et axiale des racines primaires et secondaires, la **Figure 2** montre que l'absorption se fait préférentiellement à une distance proche de l'apex. Or dans la partie supérieure du rhizotron on trouve à la fois des racines secondaires car la plante est âgée d'un mois et ½, et des racines primaires grâce à l'émission continue de racines nodales à partir du collet. Les capacités d'absorption doivent donc être très favorables.

La mise en évidence de la formation d'un front de prélèvement qui progresse en profondeur au cour du temps s'explique par la disponibilité en eau qui diminue en surface. Mais comme les capacités d'absorption seraient plus forte en surface et que la densité racinaire diminue avec la profondeur, ceci expliquerait la concentration dans l'espace des prélèvements.

Distribution et évolutions des teneurs en eau

Evolution des humidités pondérales moyennes et transpiration sur le rhizotron en fonction du temps

Pour déterminer les teneurs en eau totales du rhizotron, il a fallu calculer l'intensité lumineuse moyenne transmise à travers tout le rhizotron en excluant les zones des entretoises. Les images utilisées sont les images normalisées par rapport à la mire et soustraite à l'image de référence du rhizotron à saturation.

Les résultats de la première série sont représentés à la **Figure 20**. La teneur en eau totale débute vers 15%, mais cette valeur peut être sous-estimée car la relation d'étalonnage ne nous permet pas de différencier des teneurs en eau supérieures à 18 %. Néanmoins cette courbe confirme les tendances mises en évidence lors de l'étude qualitative : la quantité d'eau transpirée est maximale le premier jour (pertes de 5.4 %), puis diminue le deuxième jour (pertes de 1.6 %) pour se stabiliser les deux derniers jours (pertes de 0.6 % dans les deux cas).

Ces données permettent d'évaluer la transpiration sur une journée pour les quatre jours de la première série de mesure (densité sèche du sol = 1.6 g/cm³). Pour cela, on émet l'hypothèse que les différences d'intensité lumineuse mesurées sont dues uniquement à de

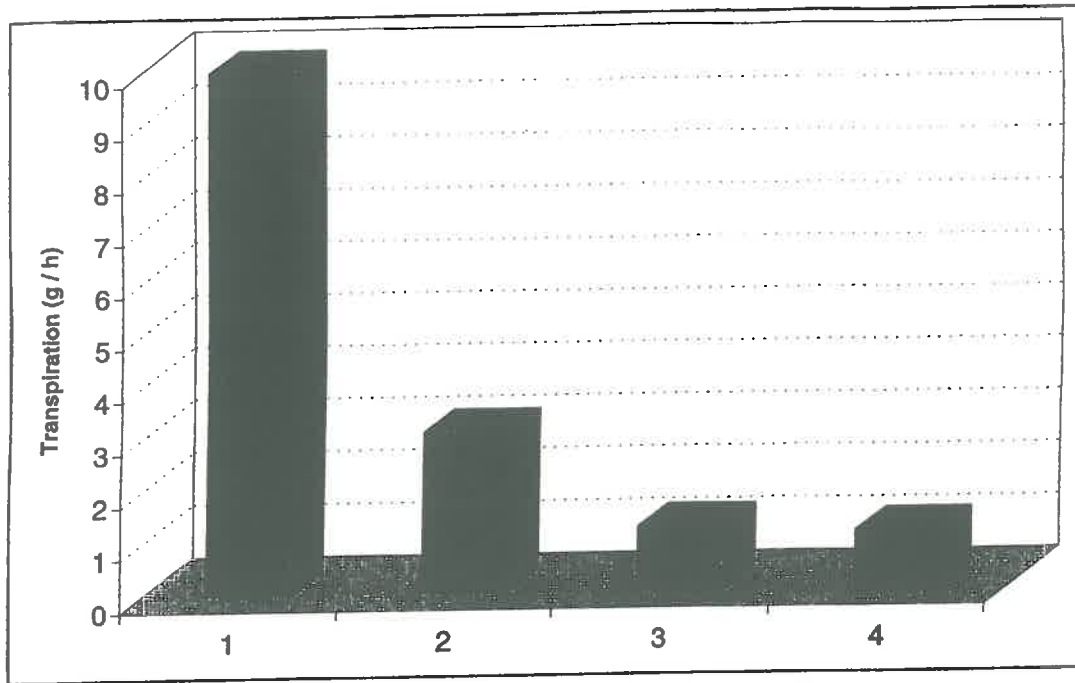


Figure 21 : Résultats de l'évaluation de la transpiration sur une journée pour les 4 jours de la série 1.

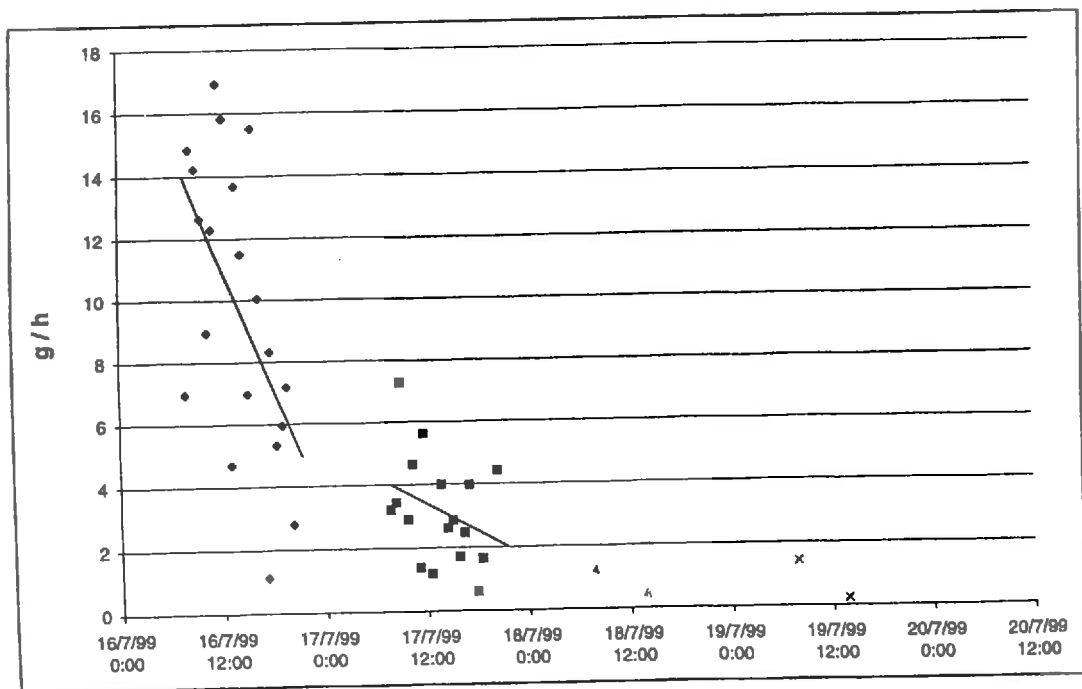


Figure 22 : Evolution de la transpiration à l'échelle journalière pour la série 1.

l'absorption car on n'observe pas de drainage. On voit sur la **Figure 21** une différence très nette de la transpiration moyenne sur la journée du premier jour qui est très supérieure à celle des jours suivants. En proportion, la transpiration du deuxième jour est divisée par 3 par rapport au premier jour, ainsi que celle du troisième jour par rapport au deuxième jour. Le quatrième jour, le niveau de la transpiration s'est stabilisé à un niveau très bas de 1 g/h.

Sur la **Figure 22** est présentée l'évolution de cette transpiration à l'échelle journalière. Pour les deux premiers jours chaque point est obtenu à partir d'un intervalle de temps de 40 minutes, pour les deux derniers jours l'intervalle est de 5 heures. On observe de grandes fluctuations du niveau de transpiration. Ces variations, d'environ 0.6 g/h, peuvent être dues aux erreurs de mesures, mais aussi à la réponse de la plante aux variations de l'environnement. En effet, la température et surtout l'humidité relative peuvent fluctuer pendant la journée.

Les tendances observées sont une nette chute de la transpiration durant le premier jour : diminution de plus de la moitié du niveau au début de journée. Le deuxième jour, on observe également une chute de moitié de la transpiration, mais cette chute est moins importante car elle concerne des quantités inférieures. Entre ces deux journées le niveau de la transpiration n'a pas augmenté le matin alors que pour les deux derniers jours on observe une augmentation de la transpiration le matin par rapport à la veille. Ceci peut être une erreur d'estimation, mais cela peut aussi être interprété par l'existence d'une redistribution nocturne de l'eau permettant d'augmenter la teneur en eau à proximité des racines, offrant plus d'eau disponible pour la transpiration le matin. L'étude d'un transect horizontal à proximité des racines pourra traiter de cette question à une échelle d'espace plus adéquate.

De façon générale, on observe que moins il y a d'eau disponible moins la transpiration varie. On observe également que la transpiration diminue avec la diminution de la teneur en eau du milieu. Les deux derniers jours il reste respectivement en moyenne 7 et 6 % de teneur en eau pondérale totale, ce qui correspond d'après la courbe de rétention à un potentiel matriciel de 1 bar, alors que la transpiration est à un niveau très bas. A cette date, la plante présente également des caractéristiques de stress hydrique important : feuilles très enroulées et port affaissé. Trois hypothèses peuvent expliquer ce phénomène : la courbe de rétention et/ou la relation d'étalonnage sont erronées (ce qui n'est pas le cas) ou bien le potentiel hydrique à proximité des racines est beaucoup plus faible (< 10 bars) que ce potentiel moyen sur le rhizotron. Il faudra vérifier cette hypothèse sur l'étude du transect horizontal.

Cette échelle d'étude du rhizotron en entier est donc insuffisante pour expliquer tout les phénomènes observés. Intéressons nous aux profils verticaux de teneur en eau.

Profils verticaux de teneur en eau pondérale

Pour déterminer le profil de teneur en eau en fonction de la profondeur, on divise le rhizotron en bandes horizontales de 5 pixels de large (≈ 0.6 cm). La teneur en eau moyenne est calculée pour chaque bande. On utilise les images normalisées et soustraites à une image du rhizotron à saturation.

Intéressons nous à la première journée après l'apport d'eau, là où les prélèvements d'eau sont les plus importants quantitativement. Quatre profils instantanés de teneurs en eau répartis régulièrement sur la journée du 16/07/99 (série 1) sont représentés sur la **Figure 23**. L'apport d'eau a été arrêté la veille en fin d'après midi. Le dispositif permettant de récolter

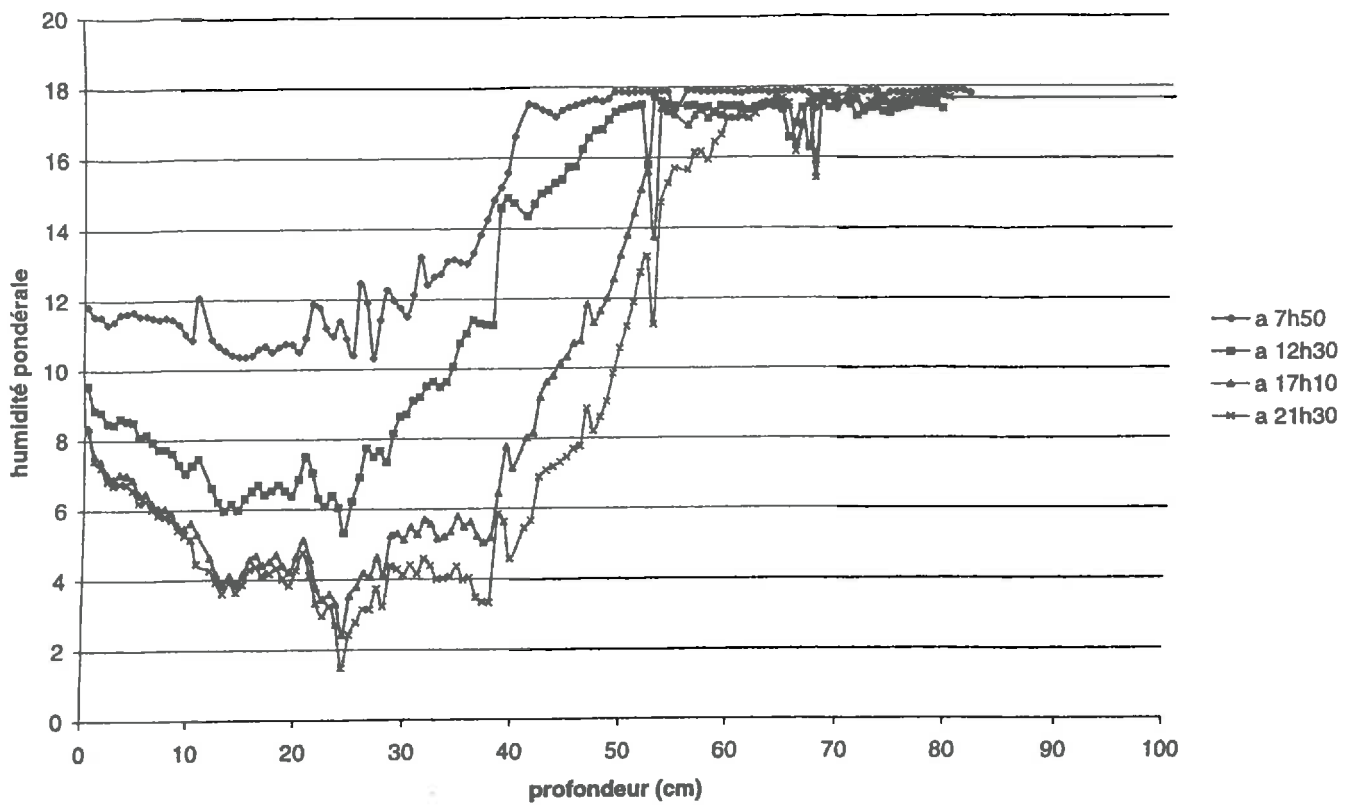


Figure 23 : profils instantanées de profils de teneur en eau de la journée du 16/07/99 (série 1).

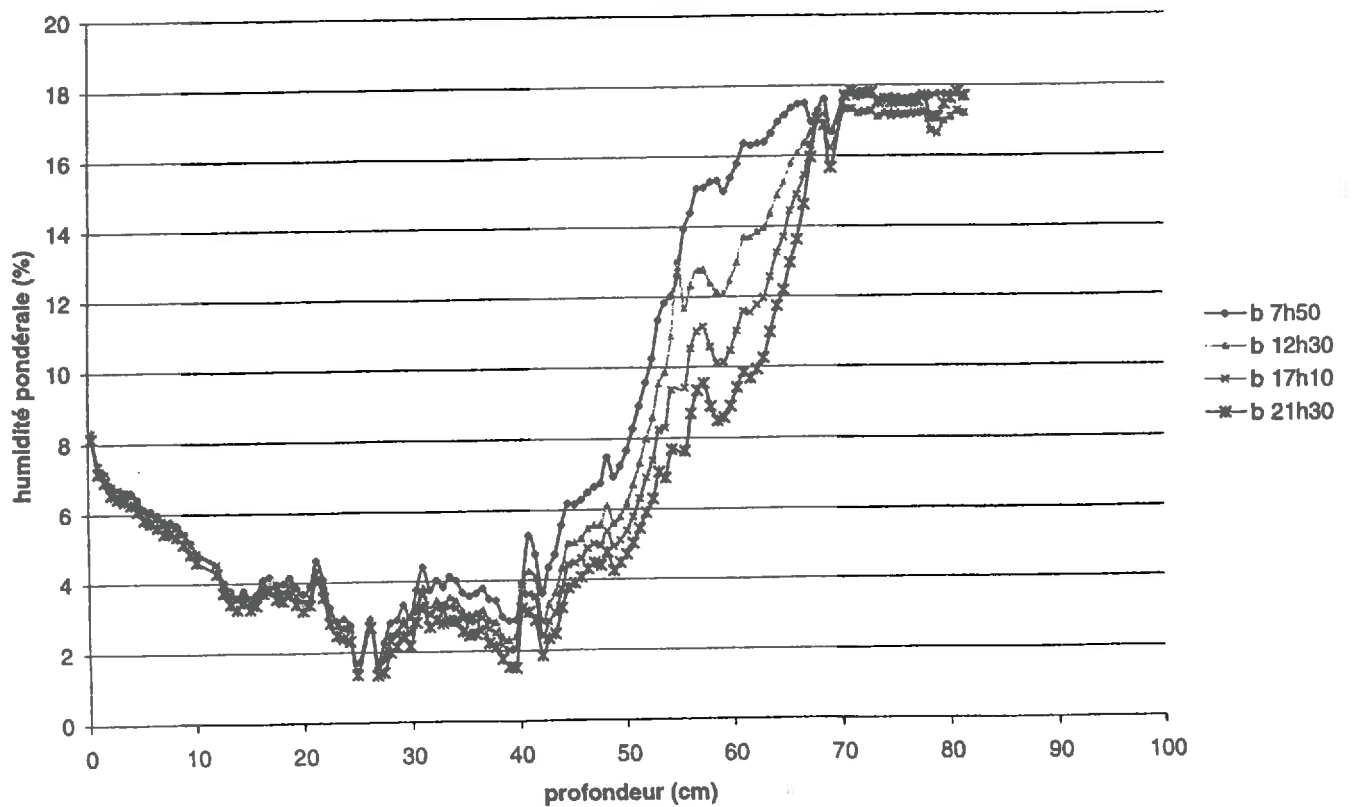


Figure 24 : profils instantanées de profils de teneur en eau de la journée du 17/07/99 (série 1).

l'éventuelle eau de drainage, nous n'avons pas observé de drainage pendant cette période. Un film plastique empêchant l'évaporation de l'eau par la surface supérieure du rhizotron, les diminutions de teneur en eau sont donc uniquement dues aux prélèvements par les racines. Lors de la détermination des profils, il a fallu auparavant exclure des zones à l'intérieure du rhizotron qui ne représentent pas le milieu étudié, comme par exemple les entretoises mais aussi les zones ayant perdu du sable lors de la mise à saturation. Seul les zones les plus grossières ont été exclus par commodité de traitement. Ainsi, des artefacts dans les mesures peuvent apparaître à certaine profondeur. Sur les profils cela se détecte par des variations brusques le long du profil qui vont dans le sens opposé à la tendance générale.

A 7h50, le rhizotron n'est pas à saturation tout le long du profil. On observe un profil constant dans les 20 premiers cm, puis une forte augmentation de la teneur en eau jusqu'à 40cm. En dessous, on est à un niveau constant de teneur en eau.

Jusqu'à 17h10 on observe une chute de la teneur en eau et donc des prélèvements d'eau dans les 50 premiers centimètres, ensuite, il n'y a pas de différence significatif dans les profils de teneur en eau dans les 20 premiers centimètres. Ainsi, dès la première journée, les prélèvements se trouvent limités dans la partie supérieure du rhizotron. On observe également une migration de ces prélèvements d'à peu près 25 cm, atteignant ainsi 65 cm de profondeur à la fin de la journée.

A partir de 17h10 on note que la teneur en eau minimale n'est pas à la surface du rhizotron, mais vers 20 cm. Ceci peut être du à un artefact dans les mesures. En effet, avec la soustraction à l'image saturée, plus les pixels sont sombres, plus il y a d'eau dans le milieu. Or, des racines apparaissent en sombres en quantité importante en haut du rhizotron (photo du 16/07/99 à 20h50, par exemple), induisant donc probablement une augmentation artificielle de la teneur en eau dans ces couches. Peut être est-ce du à un problème de diffraction - réfraction de la lumière sur les grosses racines.

Globalement, sur cette journée on obtient une bonne cohérence dans l'évolution des humidités.

La deuxième journée, le 17/07/99, les profils sont présentés à la **Figure 24**. On observe une diminution de la teneur en eau uniquement dans la zone de profondeur de 40 à 70 cm. En dehors de cette zone la différence n'est pas significative. L'eau a donc été prélevée dans une zone délimitée en profondeur, alors que les racines disposent d'eau également plus en profondeur et qu'elles y sont présentes. On note toutefois une petite incohérence sur cette journée : à partir de 70 cm de profondeur, les valeurs du profil de 17h10 sont inférieures à celles de 21h30. Cette incohérence va se répercuter dans l'estimation des prélèvements, cette zone ne sera donc pas exploitable.

Les profils du troisième et quatrième jour sont présentés à la **Figure 25** et **26**. les variations d'humidités ont lieu uniquement en dessous de 50 cm de profondeur.

L'estimation des prélèvements, exprimés en cm^3 d'eau / cm^3 de sol / heure, permettent de mettre en évidence quantitativement et précisément les zones de prélèvements. Trois profils obtenus au cours de la première journée de la première série se trouve à la **Figure 27**. Ils sont obtenus à partir d'intervalle de temps de 4h40. De façon général, on observe que les prélèvements ne sont pas homogènes dans l'espace. Pour chaque profil, on observe une profondeur spécifique où les prélèvements sont moins important de part et d'autre, cela correspond à un front de prélèvement. Plus précisément, les deux derniers profils de la journée présentent des prélèvements qui diminuent très fortement en dessous de cette profondeur spécifique, alors que la diminution est plus tamponnée pour les prélèvements de la matinée. On voit, sur cette journée, la formation d'un front (période 7h50-12h30) qui se propage vers la profondeur au cours du temps, avec une dispersion qui baisse avec le temps.

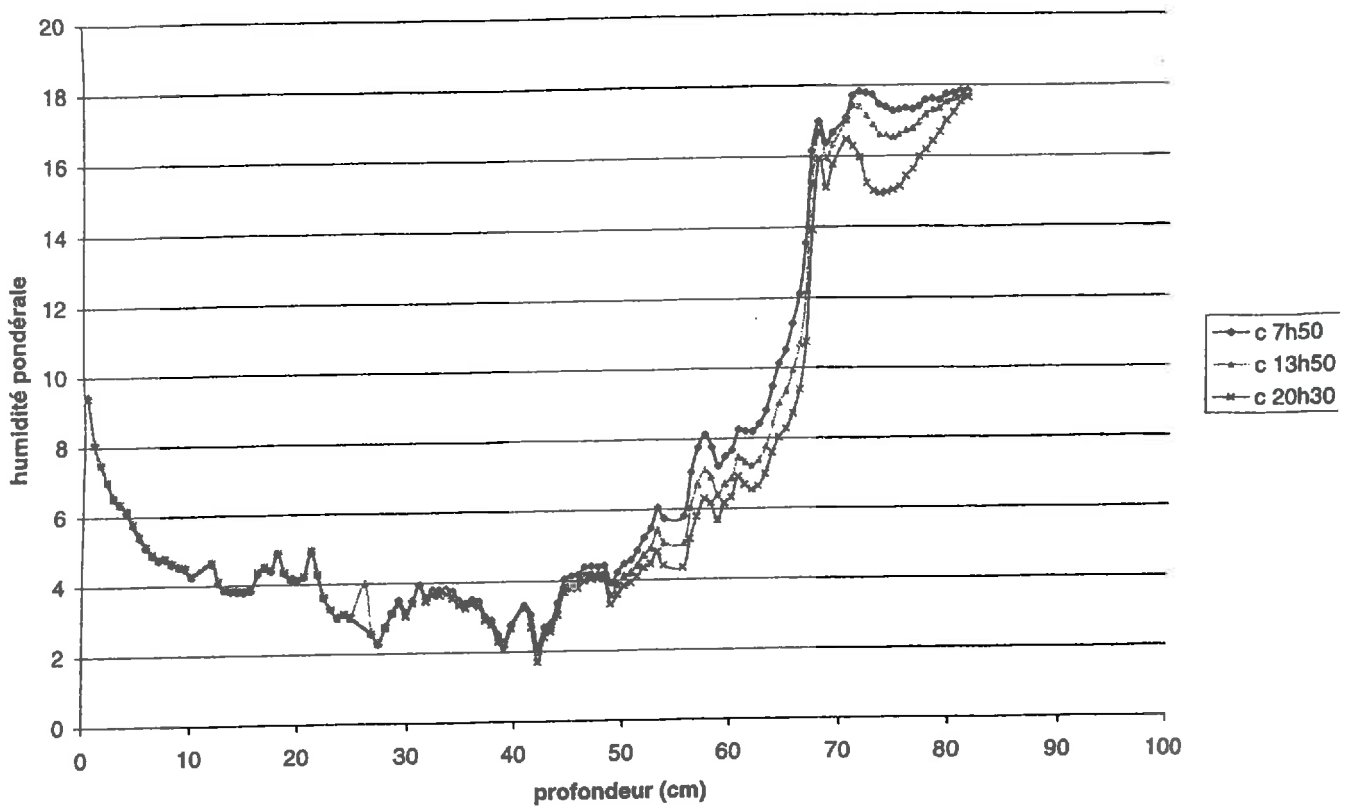


Figure 25 : profils instantanées de profils de teneur en eau de la journée du 18/07/99 (série 1).

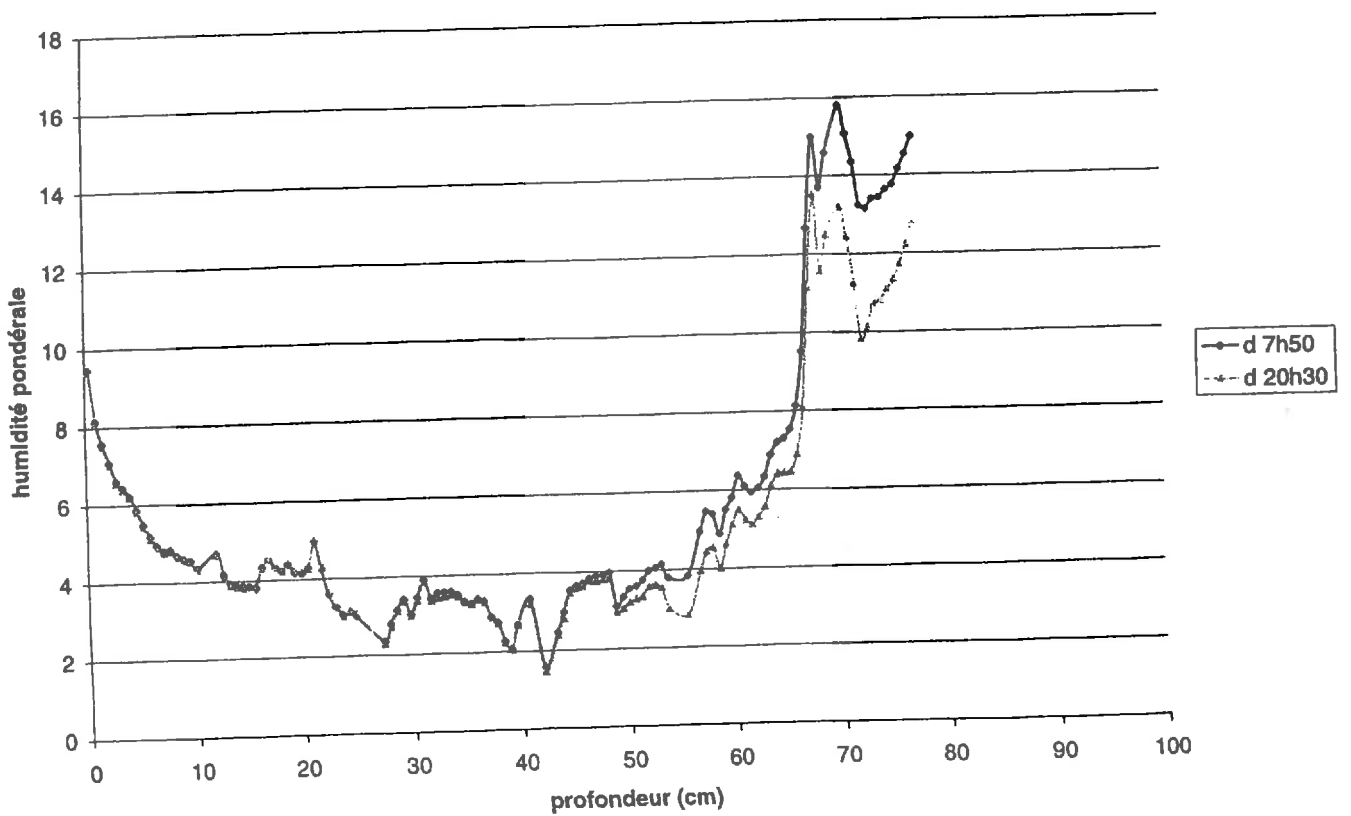


Figure 26 : profils instantanées de profils de teneur en eau de la journée du 19/07/99 (série 1).

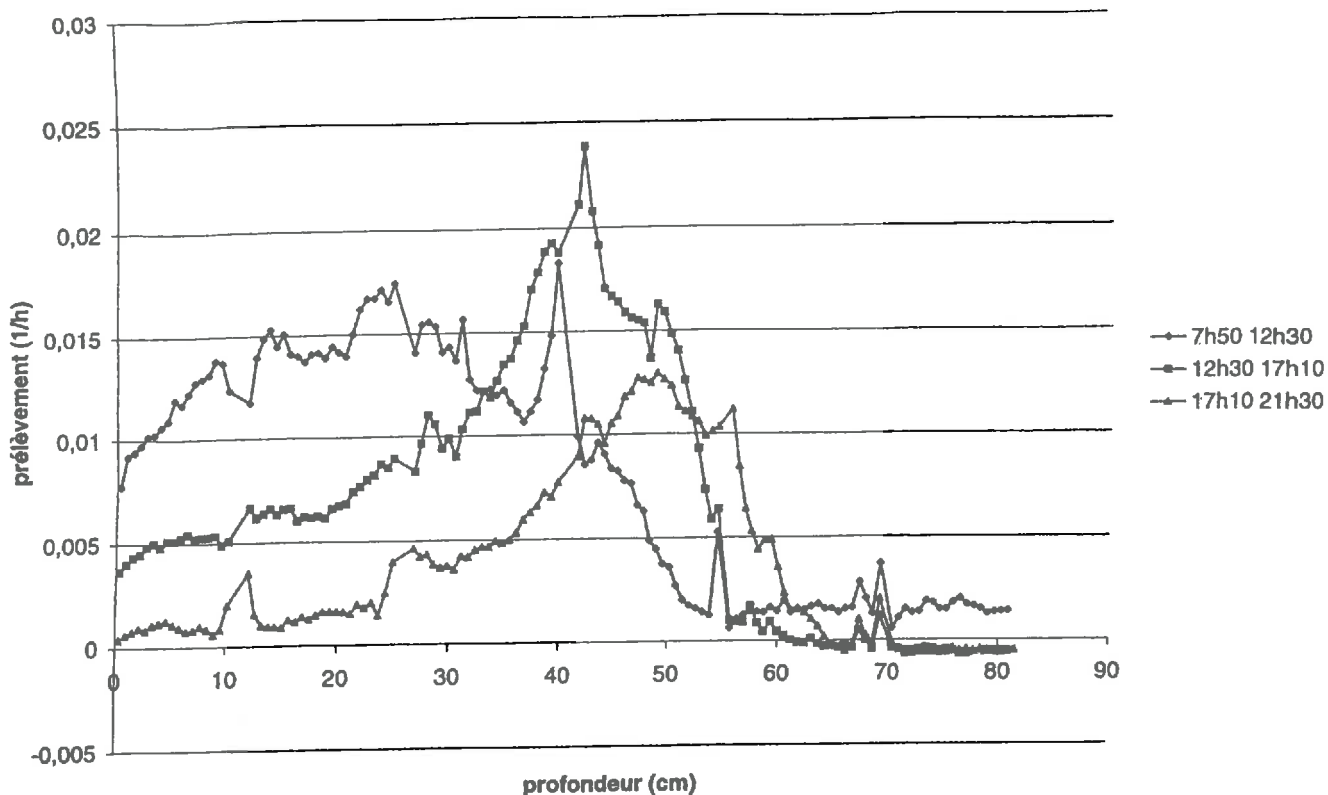


Figure 27 : Profils des prélèvements hydriques exprimés en cm^3 d'eau / cm^3 de sol / heure, de la journée du 16/07/99 (série 1).

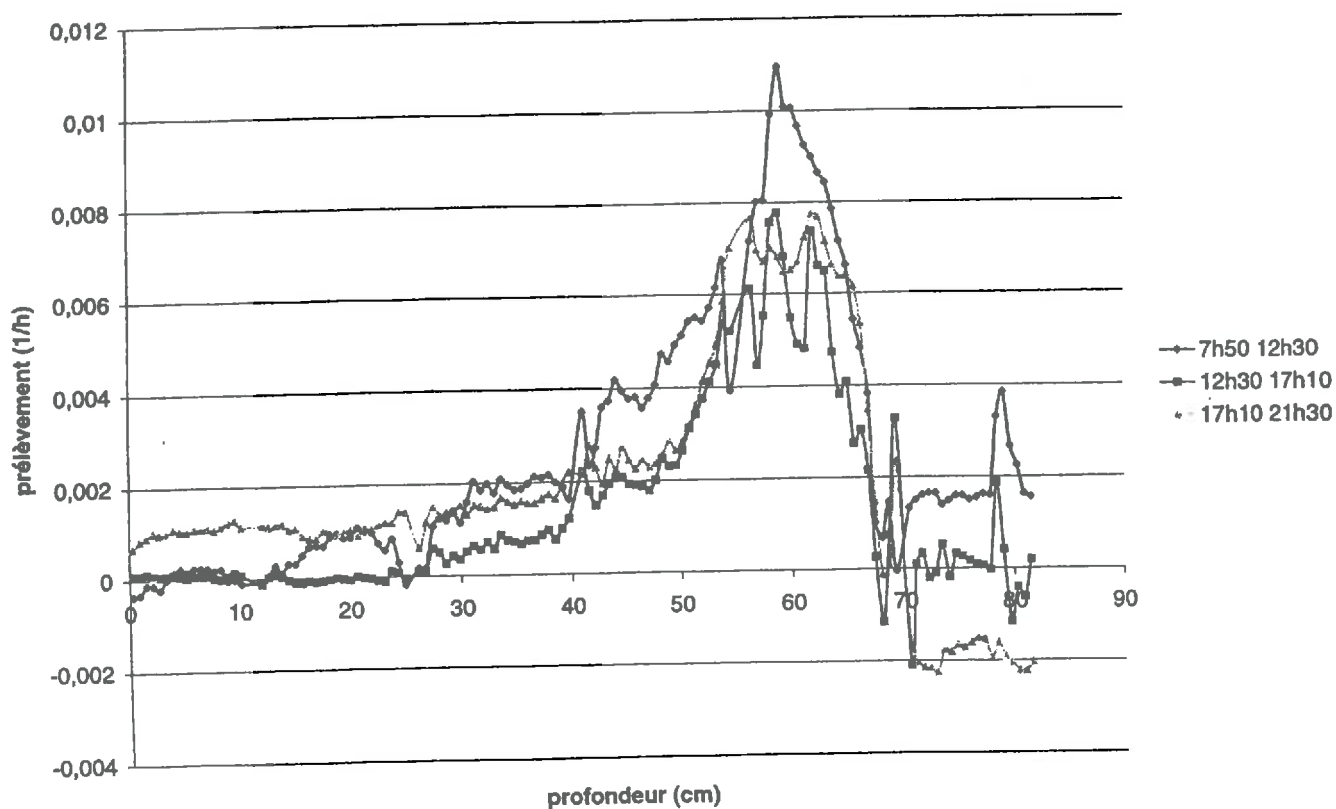


Figure 28 : Profils des prélèvements hydriques exprimés en cm^3 d'eau / cm^3 de sol / heure, de la journée du 17/07/99 (série 1).

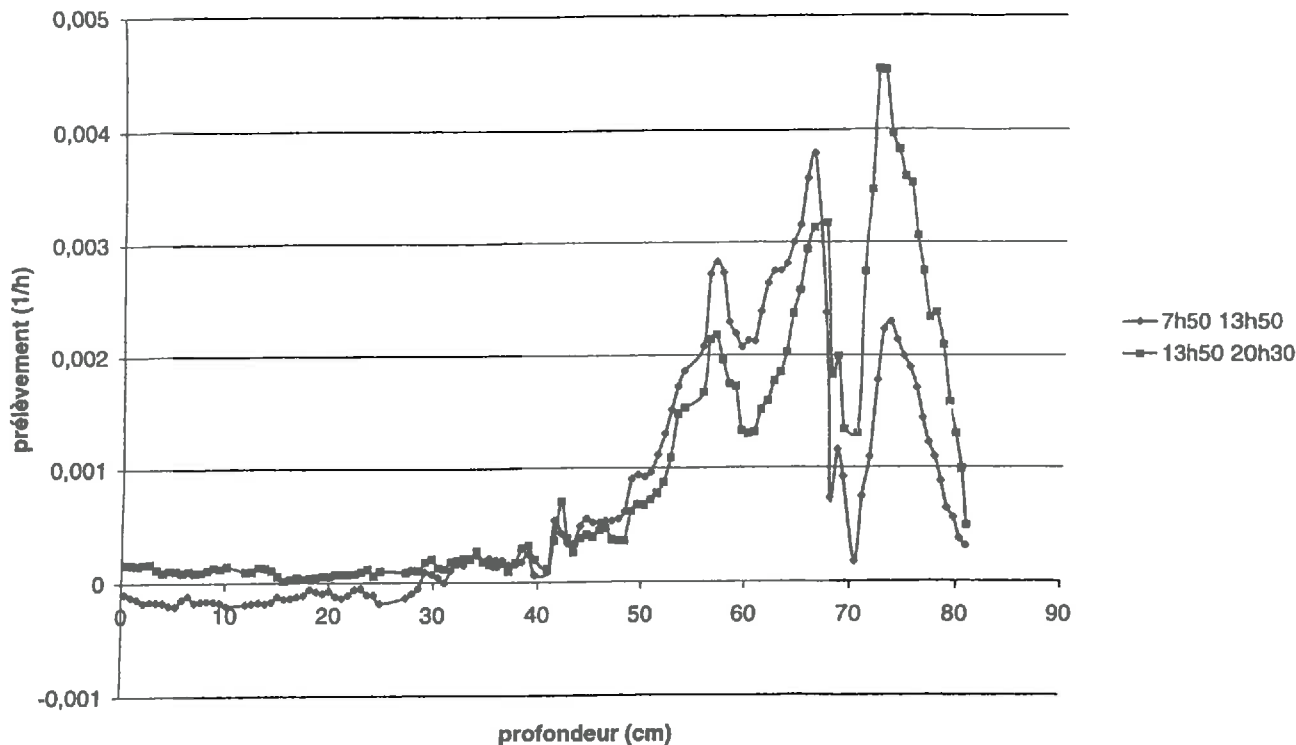


Figure 29 : Profils des prélèvements hydriques exprimés en $\text{cm}^3 \text{ d'eau} / \text{cm}^3 \text{ de sol} / \text{heure}$, de la journée du 18/07/99 (série 1).

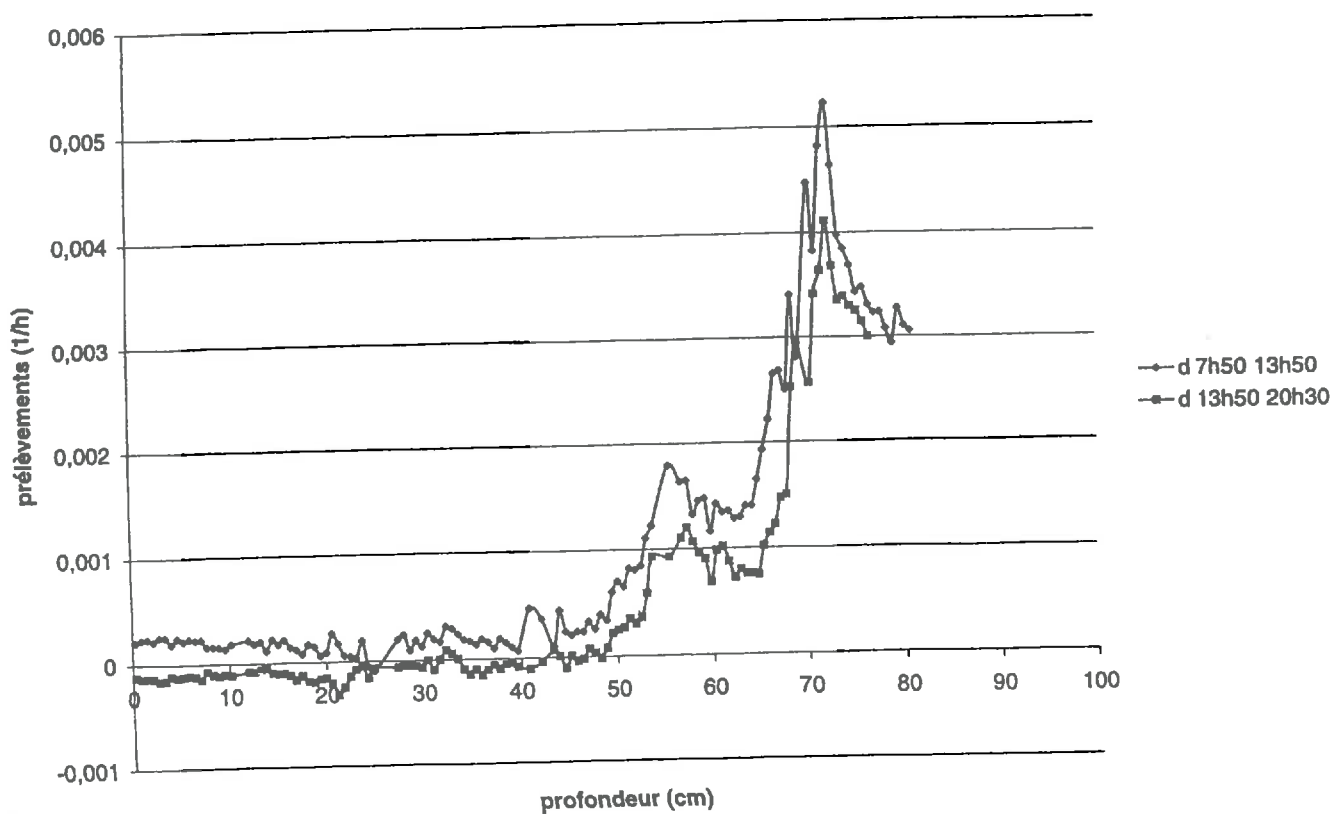
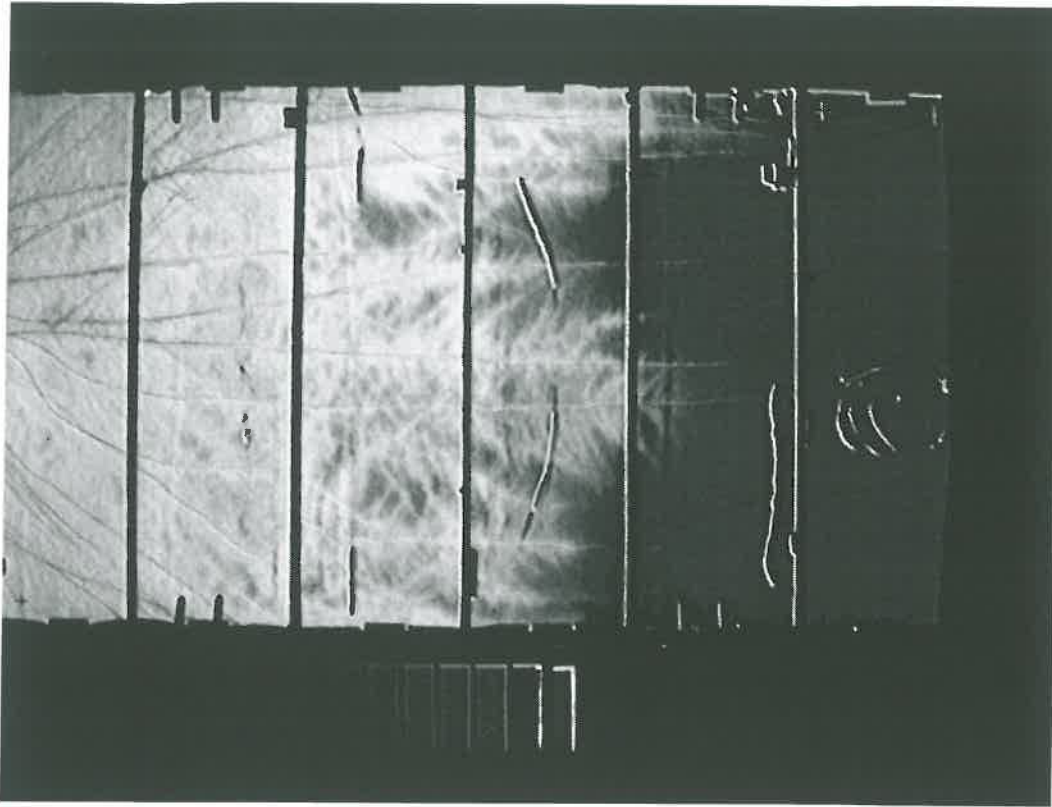
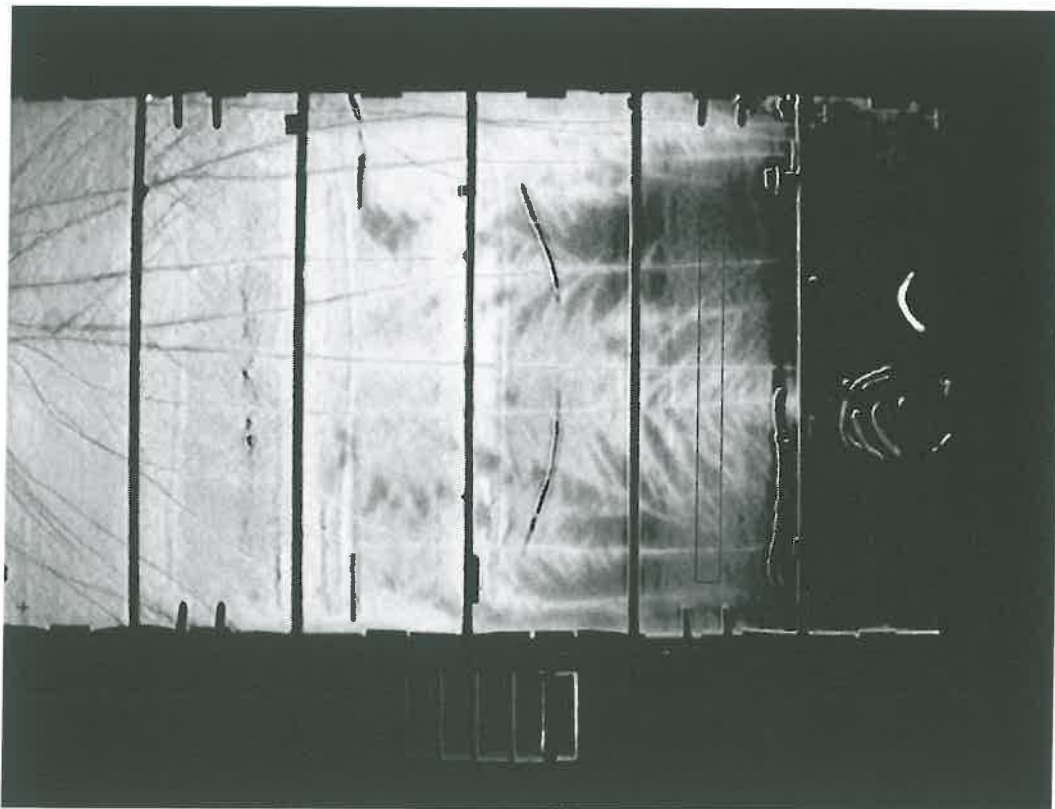


Figure 30 : Profils des prélèvements hydriques exprimés en $\text{cm}^3 \text{ d'eau} / \text{cm}^3 \text{ de sol} / \text{heure}$, de la journée du 19/07/99 (série 1).



16/07/99 à 20h50: on observe les plus grosses racines dans la première partie du rhizotron en sombres.



17/07/99 à 21h30: la zone où a été étudié le transect horizontal se situe à l'intérieur de l'avant dernier compartiment dans le rectangle noir

L'intensité maximum du pic de prélèvement a lieu en milieu de journée. Le pic observé pour les deux premiers profils à 40 et 42 cm respectivement ne provient pas d'un artefact de mesure. Les photos obtenus par soustraction de deux images consécutives montrent bien des plus forts prélèvements dans cette zone.

Les profils de la deuxième journée sont présentes à la **Figure 28**. Pendant cette journée, les mesures ne mettent pas en évidence un déplacement net du front de prélèvements qui reste vers 60 cm de profondeur, mais celui-ci est tout de même plus bas que la veille (50 cm). Avec les deux premiers profils, on constate une diminution de l'intensité des prélèvements au niveau du front, mais Le profil de 17h10-21h30 se positionne de façon incohérente par rapport aux autres profils en dehors de la zone en dessous de 70 cm qui est inexploitable. Etant donné le niveau de prélèvement très bas, cette incohérence doit provenir des erreurs de mesures. On note toutefois, une diminution de moitié de l'intensité maximum des prélèvements au niveau du front par rapport à la veille.

Le troisième jour (**Figure 29**), le front de prélèvement se situe vers 70 cm. A ce niveau, les prélèvements ont diminué de moitié par rapport à la veille. On observe deux pics de prélèvements avec des intensités maximums qui se déplace de 60 à 70 cm de profondeur. A 70 cm de profondeur on observe une forte diminution des prélèvements. A cette profondeur correspond de nombreuses petites zones difficiles à exclure, ceci peut expliquer la diminution brusque observée.

Le quatrième jour (**Figure 30**), on observe des différences peu significatives dans les prélèvements sur la journée, avec des prélèvements ciblés à 75 cm et un décalage en profondeur par rapport à la veille.

Les niveaux de prélèvements maximums que nous obtenons se situent pendant la première journée, ils sont de l'ordre de 0.5 cm^3 d'eau / cm^3 de sol / jour. Dans différentes publications, le prélèvement maximum obtenue par modélisation pour un maïs adulte après irrigation est de 25 à 100 fois inférieure. Une publication donne toutefois des résultats du même ordre de grandeur (Mariño et Tracy, 1988). Il faut noter que nous avons attribué toutes les variations d'eau aux prélèvements alors qu'il y a des échanges verticaux qui peuvent être déduit connaissant la conductivité hydraulique du milieu. De plus, le rhizotron impose une grande concentration des racines dans l'espace, ce qui peut optimiser les prélèvements.

Cette notion de front de prélèvement a déjà été proposé, notamment par Gardner (1991) qui le décrit par une zone puits relativement étroite qui se déplace vers la profondeur avec le temps. Par rapport à la première journée, les prélèvements de la deuxième journée sont divisés par deux au niveau du front alors que les teneurs en eau moyennes à la profondeur des fronts respectifs reste proche de 15 % de teneur en eau pondérale sur les deux journées. On observe le même phénomène les jours suivant avec des teneurs en eau comparables. D'après la courbe de rétention, la pression associée est inférieure à 0.1 bar. Cette pression ne peut pas expliquée la diminution des prélèvements. Pour mettre en évidence la limitation de la disponibilité de l'eau, il faut mesurer les teneurs en eau à proximité de la racine.

Etude d'un transect horizontal incluant plusieurs racines

La zone sélectionnée est située dans le rectangle noir à l'intérieur du rhizotron à la photo du 17/07/99 à 21h30. Elle fait 0.6 cm de hauteur et 30 cm de large. Sur ce transect on voit 5 racines primaires, ainsi que des racines secondaires appartenant à la racine la plus âgée (radicule) placée à 15 cm sur le transect. Les résultats sont présentés de la **Figure 31 à 34**.

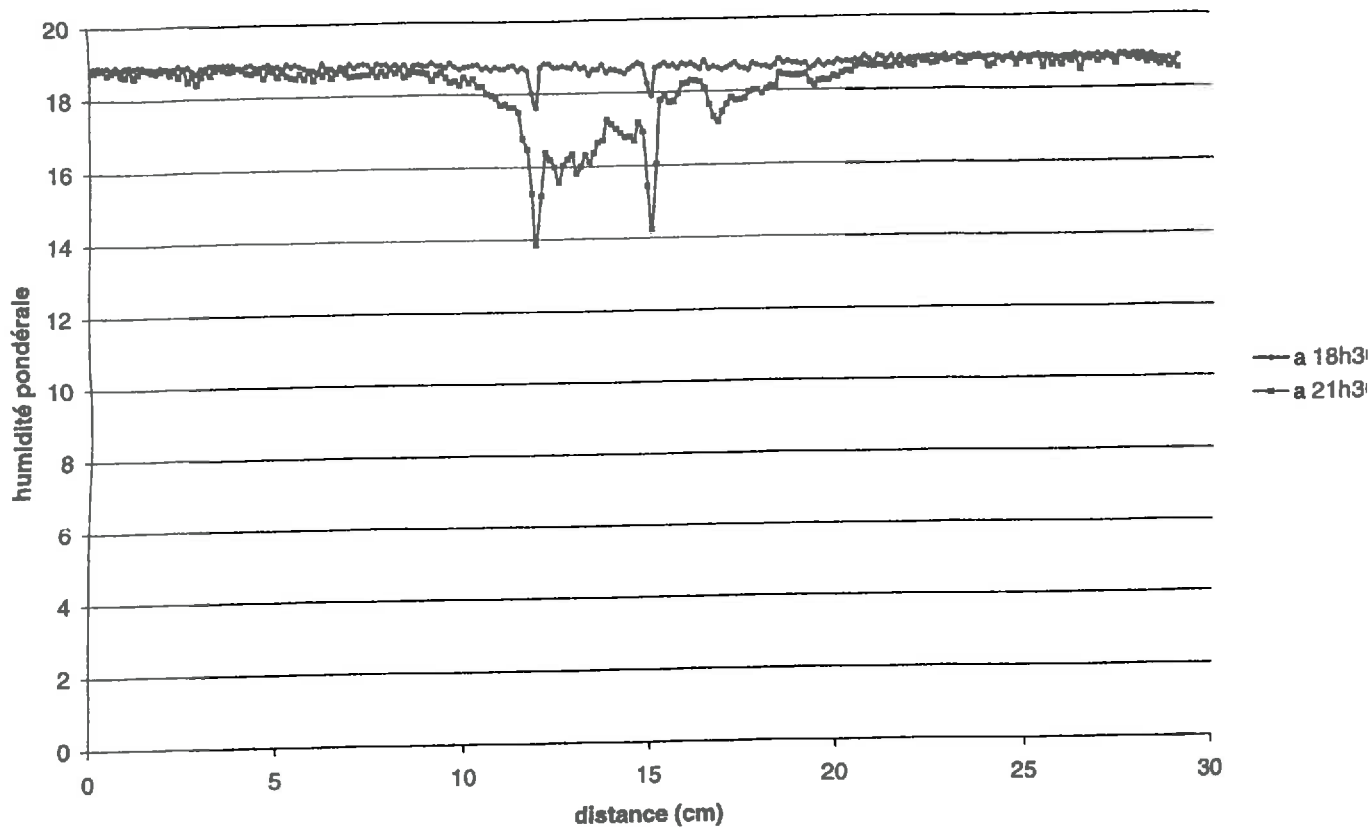


Figure 31 : Transect horizontal de la journée du 16/07/99 (série 1).

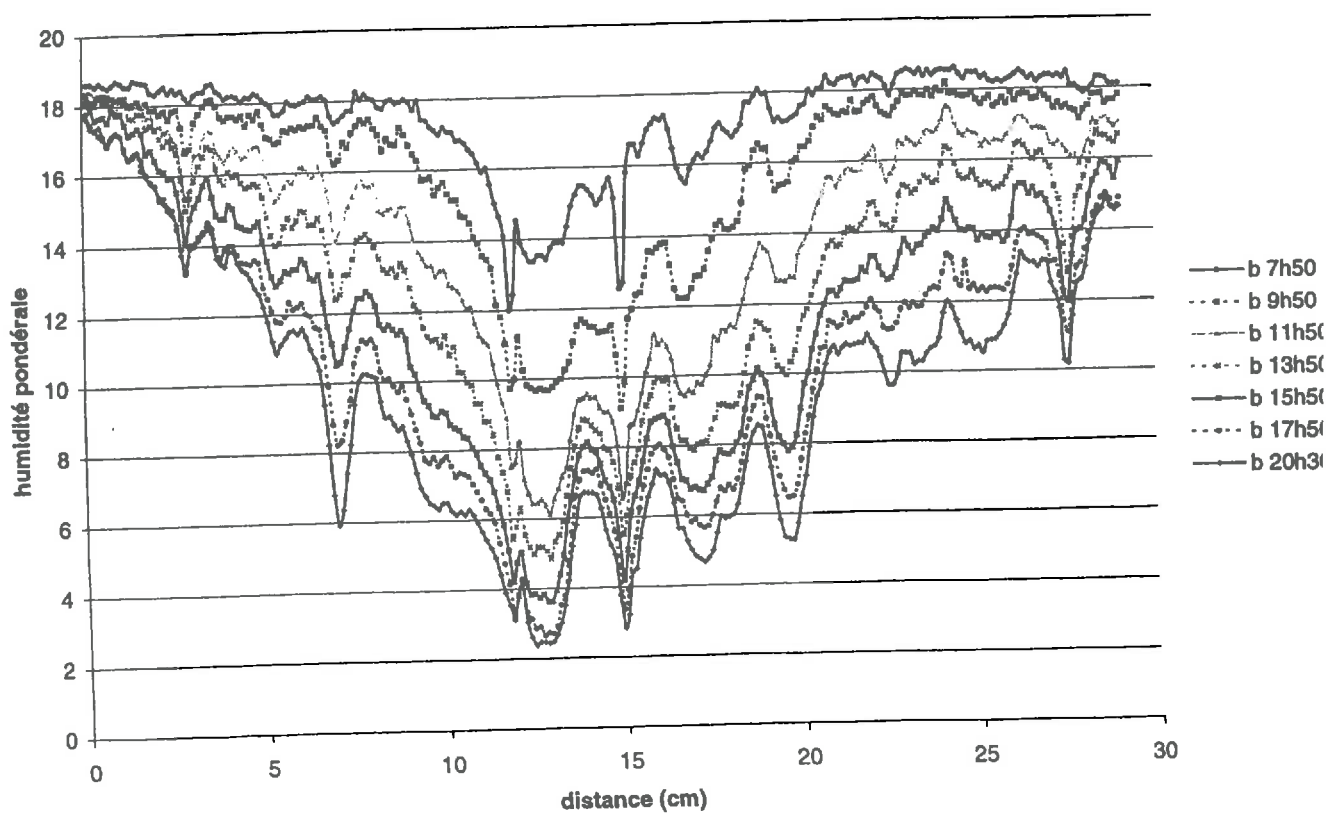


Figure 32 : Transect horizontal de la journée du 17/07/99 (série 1).

Le premier jour (a), (**Figure 31**), on observe à 18h30 deux légères différences de teneur en eau tout le long du transect. Ces diminutions locales ne sont pas dues à des erreurs de mesure car trois heures plus tard, on observe une augmentation de ces diminutions qui sont très localisées dans l'espace. Elles coïncident avec la présence de la racine la plus âgée du transect (à 15 cm) ainsi qu'à une racine secondaire de la précédente.

Le deuxième jour (b) (**Figure 32**) correspond aux plus grandes amplitudes de différences de teneur en eau dans cette zone du rhizotron. Sur la figure est représentée l'évolution du transect toutes les deux heures. Premièrement on observe qu'aucune courbe ne se recoupe : sur tout le transect la tendance est une diminution générale des teneurs en eau. Plus précisément, à 7h50 on voit que la zone de diminution de teneur en eau peut être décomposée en plusieurs zones intermédiaires avec différents minimums locaux. Au cours des heures, ces minimums locaux s'accroissent et des nouveaux apparaissent. Plus la diminution de teneur en eau est importante, plus les distances concernées par la diminution sont grandes. On peut donc envisager qu'un minimum local représente l'effet additionnel de prélèvements d'eau par plusieurs racines. Les racines les plus actives semblent être situées dans la zone centrale, on observe également des gradients très marqués au niveau de ces deux racines centrales. A l'extrémité gauche du transect, on reste à des niveaux de teneurs en eau élevés (18%) alors qu'au centre on atteint les niveaux minimums d'humidité. Sur la distance de 0 à 15 cm, on peut calculer le gradient de pourcentage d'humidité pondérale par centimètre : il passe de 0.5 à 7h50 à 1.25 à 18h50.

Le troisième jour (c) (**Figure 33**), l'amplitude des différences de prélèvements sur la journée (de 7h50 à 20h30) est beaucoup plus faible. On observe également que les diminutions de teneurs en eau restent localisées à proximité des racines, ce qui donne un gradient d'humidité sur la moitié gauche du transect de 1.8 % d'humidité pondérale par cm.

Le quatrième jour (d) (**Figure 34**), les teneurs en eau ne varient plus dans la zone centrale du transect car les niveaux d'humidité y sont très bas (proche de 2 %). De nouvelles zones de chute de teneur en eau continuent d'apparaître toujours très localement dans la zone entourant la zone centrale (par exemple, à 3 cm sur la figure 34). On observe des gradients de 4.4% d'humidité pondérale par cm sur la moitié gauche du transect. Il aura fallu attendre plusieurs jours pour que les racines encadrant celles centrales deviennent aussi actives.

Les transects de début et fin de journée de tout les jours sont réunis sur la **Figure 35**. D'un jour à l'autre, on n'observe pas d'augmentation d'humidité le long du transect. On n'a donc pas mis en évidence de redistribution nocturne dans cette zone du rhizotron. Au contraire, on observe des diminutions de teneurs en eau. Le maïs continuant probablement à prélever de l'eau la nuit, les prélèvements par le système racinaire sont suffisamment importants pour empêcher une augmentation du niveau des humidités à proximité des racines.

Grâce à cette méthode de transmission lumineuse on a pu mettre en évidence de fortes diminutions de teneur en eau à proximité des racines, la teneur en eau descendant jusqu'à 2% d'humidité pondérale, ce qui correspond à un potentiel matriciel de 10 bars. Ceci permet d'expliquer la forte diminution des prélèvements dès le deuxième jour alors la teneur en eau moyenne dans le rhizotron à cette profondeur reste très élevée (8%).

On pourrait encore diminuer l'échelle de mesure jusqu'à quelques centimètres pour se focaliser sur une unique racine car, dès la première journée (**Figure 31**), on voit se développer des gradients de teneur en eau sur quelques millimètres.

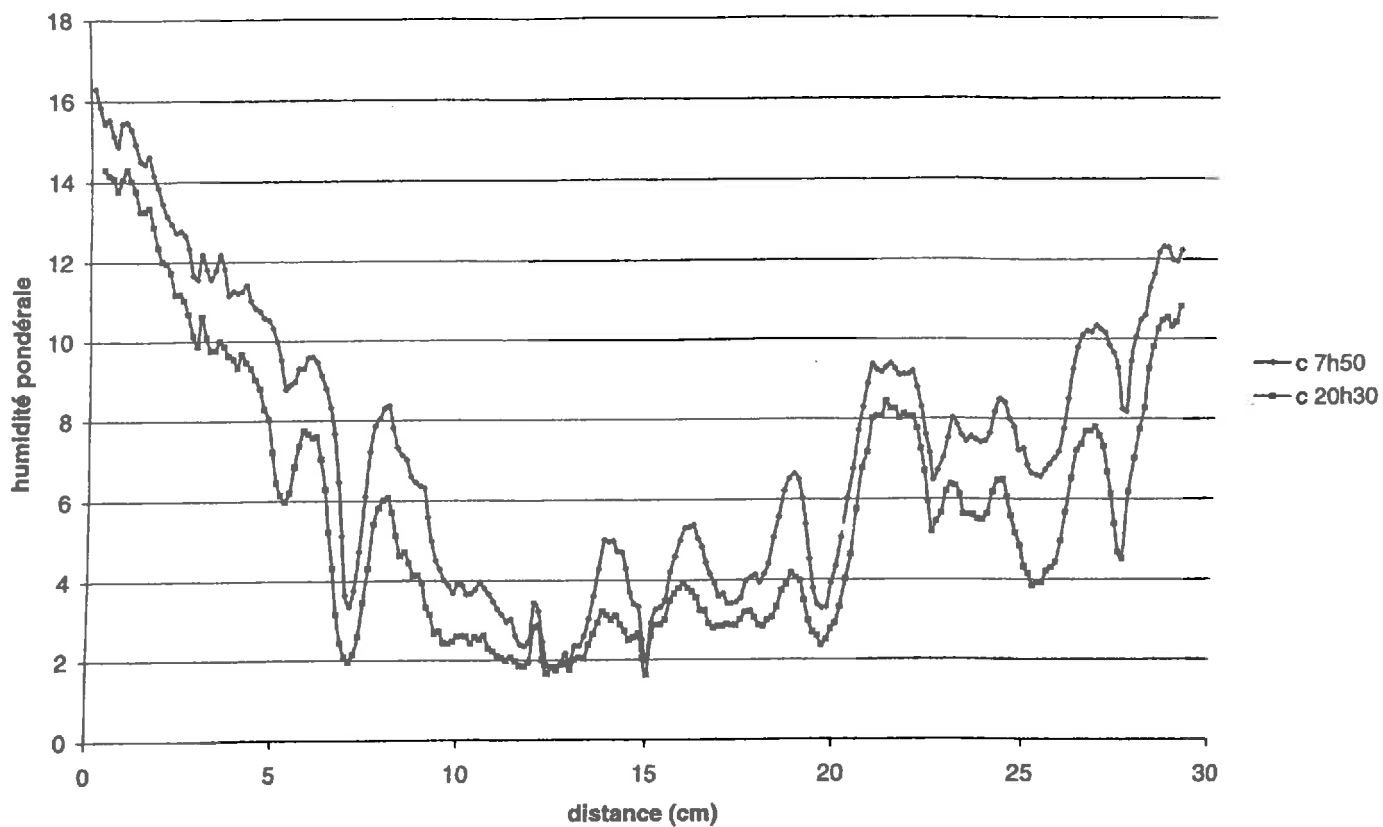


Figure 33 : Transect horizontal de la journée du 17/07/99 (série 1).

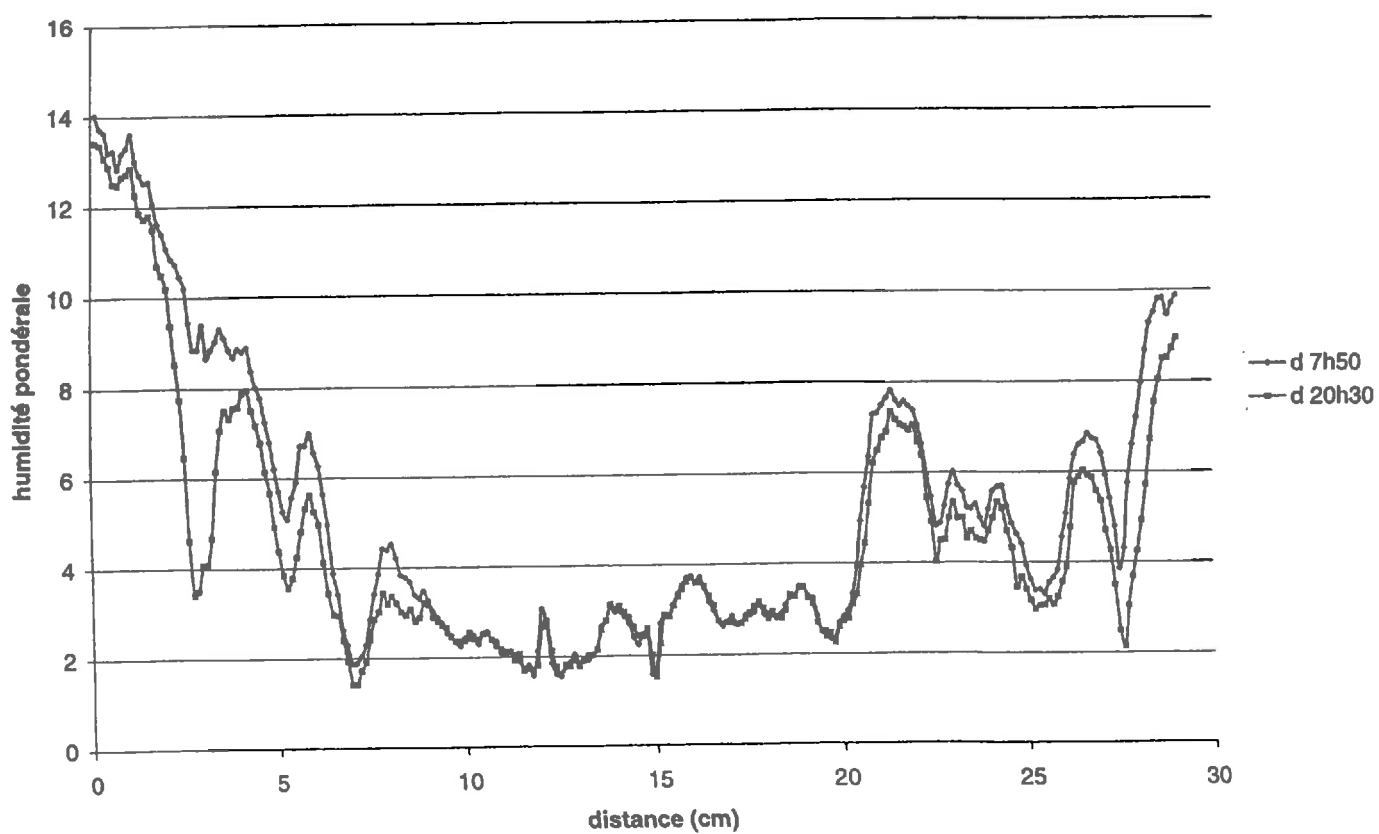


Figure 34 : Transect horizontal de la journée du 19/07/99 (série 1).

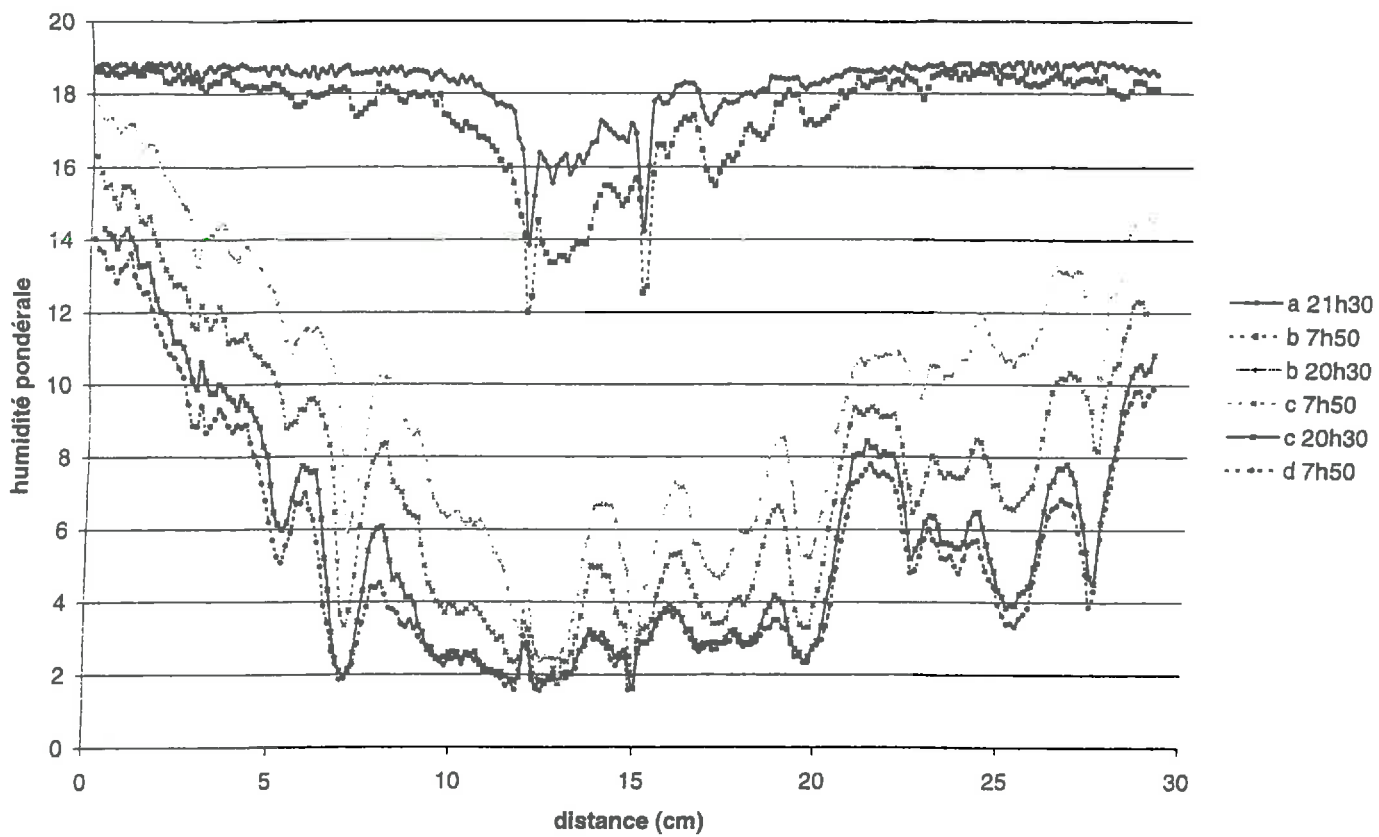


Figure 35 : Transects des débuts et fins de journée pour les 4 jours de la série 1.

6. Conclusions – Perspectives.

Lors de ce stage nous avons tenté de mettre au point et tester une technique de visualisation de l'évolution de la teneur en eau dans un sol colonisé par un système racinaire pour compléter les méthodes expérimentales existantes. Cette méthode repose sur l'enregistrement de la quantité de lumière traversant un milieu poreux sableux, la quantité de lumière transmise augmentant avec l'accroissement de la teneur en eau du milieu.

Il existe des contraintes liées à la méthode qui sont que le milieu doit être translucide et de faible épaisseur. Les images étudiées seront donc assimilées à un milieu à deux dimensions.

Au cours de l'étude, des limitations de la méthode sont apparues. On a observé une chute de la sensibilité de la méthode dans les fortes teneurs en eau, c'est à dire qu'on a des difficultés à différencier les fortes teneurs en eau. La précision de l'étalonnage dépend fortement de l'hétérogénéité dans la structure du milieu, les problèmes de mise à saturation des compartiments de l'étalonnage ayant introduit cette hétérogénéité. Pour pouvoir traiter les images, celles-ci doivent être absolument superposables. La dernière limitation rencontrée est la qualité de la mire. On peut rencontrer parfois de légères incohérences dans les résultats de la répartition des teneurs en eau à cause d'une transformation biaisée par rapport à la mire.

En l'état de la méthode, les images obtenues nous permettent de d'avoir une image fidèle de la localisation des racines par l'intermédiaire du dessèchement du milieu. Une analyse qualitative, basée sur la visualisation des images, a permis de mettre en évidence des prélèvements par les racines qui ne sont pas homogènes dans l'espace. Grâce à un étalonnage de la méthode, on a pu obtenir le prélèvement hydrique distribué dans l'espace et son évolution dans le temps. Le fait que l'on se trouve dans un milieu à 2D à tendance sableuse à augmenter la rapidité avec laquelle les phénomènes se produisent.

Cette méthode permet, à partir d'un même jeu de données, d'étudier le prélèvement hydrique à trois échelles d'espaces : échelle du système racinaire global définie par la taille du rhizotron ; suivant la profondeur grâce à la discrétisation de l'image en couche horizontale et à proximité d'une section de racine en se focalisant sur une partie restreinte de l'image.

Les analyses ont permis de mettre en évidence de la formation d'un front de prélèvement qui se déplace en profondeur avec le temps. Les résultats du transect étayent l'hypothèse que le prélèvement hydrique est déterminé dans ce cas par la disponibilité de l'eau à proximité des racines. De fort gradient de teneur en eau on pu, en effet, être mis en évidence à proximité des racines. Certaines incohérences peuvent apparaître dans les résultats. Elles sont dues à des zones où il n'y a pas de transmission de lumière qui auraient dû être exclues des calculs en toute rigueur.

Du point de vue méthodologique, la plante étudiée a été cultivée dans des conditions éloignées des conditions au champ, cela induit des modifications du comportement hydrique de la plante (minimisation de la transpiration par rapport à un maïs dans les mêmes conditions environnementales), mais l'accès au champ reste compliqué.

En vue des résultats obtenus, cette méthode apparaît prometteuse pour décrire de manière plus précise les prélèvements hydriques par les racines. En améliorant la construction (pour un meilleur remplissage et une meilleure mise à saturation), on optimisera l'homogénéité du milieu étudié. L'étalonnage peut également être amélioré par des

manipulations plus appropriées du mélange sableux (ne pas mettre à saturation après dessiccation du milieu). Le traitement des données peut également être amélioré en prenant plusieurs images du même état physique pour faire la moyenne des bruits thermiques de la caméra. Les résultats d'estimation de transpiration pourront aussi être confirmés par des mesures en parallèle de flux de sève.

Le domaine le plus intéressant d'investigation est l'examen détaillé à proximité d'une racine dans le cas d'un système racinaire simple pour étudier les interactions fines sol-racines dans différentes conditions. De plus, cette méthode peut permettre de mieux mettre en place un formalisme de terme puits racinaire et aider dans l'évaluation des modèles considérant les racines individuelles.

BIBLIOGRAPHIE

Baker J.M., VanBavel C. H. M., 1988 – Water Transfer through Cotton Plants Connecting Soil Regions of Differing Water potential. *Agron. J.*, 80 : 993-997.

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.

Chanzy A., Chadoeuf J., Gaudu J.C., Mohrath D., Richard G., Bruckler L., 1998 – Soil Moisture Monitoring at the Field Scale Using Automatic capacitance Probes. *Eu. J. of Soil Sci.*, 49 : 637-648.

Clausnitzer V., Hopmans J. W., 1994 Simultaneous Modeling of Transient Three-Dimensional Root Growth and Soil Water Flow. *Plant and Soil*, 164: 299-314.

Dalton F. N., Raats P. A. C., Gardner W. r., 1975 – Simultaneous Uptake of Water and Solutes by Plant Roots. *Agron. J.*, 67 : 334-339.

Darnault C. J. G., Throop J. A., DiCarlo D. A., Rimmer A., Steenhuis T. S., Parlange J-Y., 1998 – Visualisation by Light Transmission of Oil and Water Contents in Transient Two-Phase Flow Fields. *J. Contam. Hydrol.*, 31 : 337-348.

Doussan C., Pagès L., Vercambre G., 1998 – Modelling of the Hydraulic Architecture of Root Systems : An Integrated Approach to Water Absorption – 1. Model Description, *Annals of Botany*, 81 : 213-223.

Doussan C., Pagès L., Vercambre G., 1998 – Modelling of the Hydraulic Architecture of Root Systems : An Integrated Approach to Water Absorption – 2. Distribution of Axial and Radial Conductances in Maize, *Annals of Botany*, 81 : 225-232.

Gardner W. R., 1960 – Dynamics Aspects of Soil Water Availability to Plants. *Soil Sci.* 89 : 63-73.

Gardner W. R., 1991 – Modeling Water Uptake by Roots. *Irrig Sci*, 12: 109-114.

Glass R. J., Steenhuis T. S., July 1989 – Mechanism for Finger Persistence in Homogeneous, Unsaturated, Porous Media : Theory and Verification. *Soil Sci.* 148 : 60-70.

Glass R. J., Steenhuis T. S., Parlange J-Y., June 1989 – Wetting Front Instability 2. Experimental Determination of Relationships Between System Parameters and Two-Dimensional Unstable Flow Field Behaviour in Initially Dry Porous Media. *Water Resour. Res.*, 25, 1195-1207.

Hainsworth J. M., Aylmore L. A. G., 1983 – The Use of Computer Assisted Tomography to Determine Spatial Distribution of Soil Water Content. *Aust. J. Soil. Res.*, 21 : 435-443.

Hainsworth J. M., Aylmore L. A. G., 1985 – Water Extraction by Single Plant Roots. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50 : 841-848.

Hainsworth J. M., Aylmore L. A. G., 1989 – Non-Uniform Soil Water Extraction by Plant Roots. *Plant and soil*, 113 : 121-124.

Halilat M. T., 1998 – Etude Expérimentale de Sable Additionné d'Argile, Comportement Physique et Organisation en Conditions Salines et Sodiques. Thèse Doct. *INA P-G*, 202p.

Herkelrath W. N., Miller E. E., Gardner W. R., 1977 – Water Uptake by Plants : I. Divided Root Experiments. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41 : 1033-1038.

Herkelrath W. N., Miller E. E., Gardner W. R., 1977 – Water Uptake by Plants : II. The Root Contact Model. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41 : 1039-1043.

Jensen C. R., Svendsen H., Andersen M. N., Lösch R., 1993 – Use of the Root Contact Concept, an Empirical Leaf Conductance Model and Pressure-volumes Curves in Simulating Crop Water Relations, *Plant Soil*, 149, 1-26.

Klepper B., 1991 – Crop Root System Response to Irrigation. *Irrig. Sci.*, 12 : 105-108.

Lafolie F., Bruckler L., Tardieu F., 1991 – Modelling Root Water Potential and Soil-Root Water Transport: I Model Presentation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55 : 1203-1212.

Mariño M. A., Tracy J. C., 1988 – Flow of Water through Root-Soil Environment. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Volume 114, n° 4: 588-604.

Molz F. J., 1981 – Models of Water Transport in the Soil Plant System : A review. *Water Resour. Res.*, 17: 1245-1260.

Newman E.I., 1969 – Resistance to Water Flow in Soil and Plant. I. Soil Resistance in Relation to Amounts of Roots : Theoretical estimates. *J Appl Ecol*, 6 : 261-272.

Pagès L., Jordan M. O., Picard D., 1989 – Simulation of the Three-Dimensional Architecture of the Maize Root System, *Plant Soil*, 119, 147-154.

Passioura J.B., 1988 – Water Transport in and to Roots. *Ann. Rev. Plant Physiol. Mol. Biol.*, 39 : 245-265.

Reicosky D.C., Ritchie J. T., 1976 – Relative Importance of Soil Resistance and Plant Resistance in Root Water Absorption. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 40 : 293-297.

Schippers B., Schroth M. N., Hildebrand D. C., 1967 – Emanation of Water from Underground Plant Parts. *Plant and Soil.*, XXVII, n°1 : 81-91.

Stedle E., 1994 – Water Transport Across Roots, *Plant Soil*, 167, 79-90.

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.

Tidwell V. C., Glass R. J., 1994 – X ray and Visible Light Transmission for Laboratory Measurement of Two-Dimensional Saturation Fields in Thin-Slab Systems. *Water Resour. Res.*, 30, 2873-2882.

Tidwell V. C., Parker M., 1996 – Laboratory Imaging of Stimulation Fluid Displacement from Hydraulic Fractures. *Society of Petroleum Engineers*, 36491 : 793-804.

Varney G.T., Canny M.J., 1993 – Rates of Water Uptake into the Mature Root System of Maize Plants. *New Physiologist*. 123 : 775-786.

Xu X. and Bland W. L., 1993 – Reverse Water Flow in Sorghum Roots. *Agron. J.*, 85 : 384-388.

Young I.M., 1995 – Variation in Moisture Contents Between Bulk Soil and the Rhizosphere of Wheat (*Triticum aestivum* L. cv. Wembley). *New Phytol.*, 130 : 135-139.

ANNEXE 1 : Différents milieux testés :

| | w (%) à 3 bars : |
|---|-----------------------------------|
| Mélange 1 : 20 % de S1 10 % de S31 70 % de F15 | 0.23 % |
| Mélange 2 : 30 % de S1 10 % de S31 60 % de F15 | 0.30 % |
| Mélange 3 : 25 % de S1 60 % de F15 15 % de Fontainebleau | 0.22 % |
| Mélange 4 : 40 % de S1 30 % de S31 30 % de F15 | 0.67 % |
| Mélange 5 : 40 % de S1 30 % de S31 30 % de Fontainebleau | 0.80 % |
| Mélange 6 : 35 % de S1 25 % de S31 30 % de Fontainebleau 10 % de verre (40-70 μm) | 1.03 % |
| Mélange 7 : 35 % de S1 30 % de S31 30 % de Fontainebleau 5 % de verre (40-70 μm) | 0.99 |
| Mélange 8 : 35 % de S1 25 % de S31 30 % de Fontainebleau 10 % de verre (0-50 μm) | 0.89 % |
| Mélange 9 : 35 % de S1 30 % de S31 30 % de Fontainebleau 5 % de verre (0-50 μm) | 0.9 % |
| Mélange 10 : 20 % de S1 10 % de S31 60 % de F15 10 % de vermiculite broyée finement | 2.02 % (Pas assez translucide) |

w (%) à 3 bars :

| | |
|---|-----------------------------------|
| Mélange 11 : 37 % de S1 30 % de S31 30 % de Fontainebleau 3 % de vermiculite broyée finement | 0.83 % |
| Mélange 12 : 25 % de S1 32 % de S31 40 % de F15 3 % de vermiculite broyée finement | 0.77 % |
| Mélange 13 : 37 % de S1 30 % de S31 30 % de F15 3 % de vermiculite broyée finement | 0.84 % |
| Mélange 15 : 29 % de S1 27 % de S31 27 % de Fontainebleau 5 % de verre (40-70 μm) 12 % kaolinite | 6.2 % (Pas assez translucide) |
| Mélange 14 : 32 % de S1 30 % de S31 27 % de Fontainebleau 5 % de verre (40-70 μm) 6 % kaolinite | 3.4 % (Pas assez translucide) |
| Mélange 16 : 96 % de Fontainebleau 4 % de Kaolinite | (Pas assez translucide) |
| Mélange 17 : 97 % de Fontainebleau 3 % de Kaolinite | 4.24 % (Pas assez translucide) |
| Mélange 18 : 97 % de Fontainebleau 3 % d'Hectorite | 13 % |
| Mélange 19 : 98.5 % de Fontainebleau 1.5 % d'Hectorite | 10.52 % |
| Mélange 20 : 98.5 % de Fontainebleau 1.5 % d'Hectorite 1 % de Kaolinite | 6.9 % |
| Mélange 21 : 99.2 % de Fontainebleau 0.8 % d'Hectorite | 4.9 % |
| Mélange 22 : 100 % de Fontainebleau | 0.36 % |

Pour l'hectorite (argile gonflante), ces valeurs correspondent à un mélange n'ayant jamais subi de cycle d'humidification / dessiccation.

*Le mélange final correspond au **mélange 19**. Sa courbe de rétention a été obtenue après avoir fait subir un cycle d'humectation / dessiccation au mélange. La teneur en eau à 3 bars y est donc inférieure : elle passe de 10 % à 3 %.*

ANNEXE 2 : Solution nutritive pour Maïs

D'après thèse J.P. Goutouly – Solution de Hoagland semi-normale modifiée

| | meq/L | g/20L concentré 60* |
|-----------------------------------|-------|----------------------|
| KH ₂ PO ₄ | 0.5 | |
| KNO ₃ | 3 | |
| Ca(NO ₃) ₂ | 2 | |
| MgSO ₄ | 2 | |
| Séquestrène (EDTA) | | 11.4 |
| Oligoéléments | | 1000 mL concentré 2* |

La solution nutritive mère doit être diluée 60 fois. Elle se présente sous la forme de deux solutions pour éviter la cristallisation de certains composés concentrés.

ANNEXE 3 : TEST DE HARTLEY, comparaison des variances :

Ce test est utilisable si tous les nombres de degrés de liberté v_i sont égaux.
Le test consiste à calculer une fonction discriminante r :

$$r = s^2_{\max} / s^2_{\min} \tag{a}$$

où, s^2_{\max} et s^2_{\min} sont respectivement la plus grande et la plus petite des estimations de variance.

Les variances associées à chaque teneur en eau H de l'étalonnage sont :

$H = 0\% \quad s^2 = 9.79$ $H = 1.6\% \quad s^2 = 29.16$ $H = 3.1\% \quad s^2 = 27.04$
 $H = 6.8\% \quad s^2 = 16$ $H = 9.3\% \quad s^2 = 14.44$ $H = 14.8\% \quad s^2 = 100$

On obtient $r = 100 / 9.79 = 10.2$

On a $k = 6$ estimations de s^2_i et $(100-1)$ degrés de liberté pour chaque estimation.

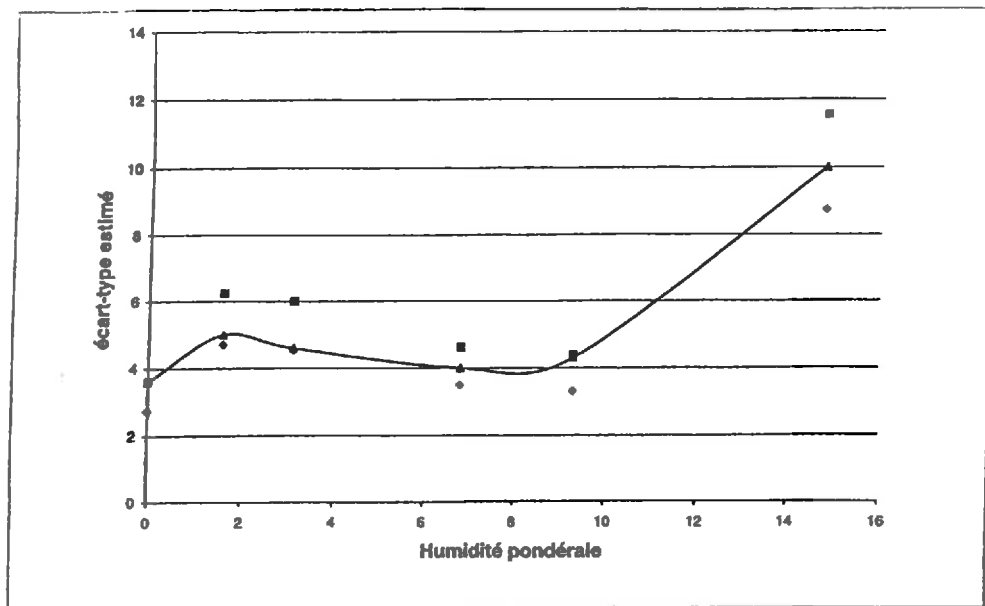
Valeurs de $r_{0,95}$

| ν \ k | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | k \ ν |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------|
| 2 | 39,0 | 87,5 | 142 | 202 | 266 | 333 | 403 | 475 | 550 | 626 | 704 | 2 |
| 3 | 15,4 | 27,8 | 39,2 | 50,7 | 62,0 | 72,9 | 83,5 | 93,9 | 104 | 114 | 124 | 3 |
| 4 | 9,60 | 15,5 | 20,6 | 25,2 | 29,5 | 33,6 | 37,5 | 41,1 | 44,6 | 48,0 | 51,4 | 4 |
| 5 | 7,15 | 10,8 | 13,7 | 16,3 | 18,7 | 20,8 | 22,9 | 24,7 | 26,5 | 28,2 | 29,8 | 5 |
| 6 | 5,82 | 8,38 | 10,4 | 12,1 | 13,7 | 15,0 | 16,3 | 17,5 | 18,6 | 19,7 | 20,7 | 6 |
| 7 | 4,98 | 6,94 | 8,44 | 9,70 | 10,8 | 11,8 | 12,7 | 13,5 | 14,3 | 15,1 | 15,8 | 7 |
| 8 | 4,43 | 6,00 | 7,18 | 8,12 | 9,03 | 9,78 | 10,5 | 11,1 | 11,7 | 12,2 | 12,7 | 8 |
| 9 | 4,03 | 5,34 | 6,31 | 7,11 | 7,80 | 8,41 | 8,95 | 9,45 | 9,91 | 10,3 | 10,7 | 9 |
| 10 | 3,72 | 4,85 | 5,67 | 6,34 | 6,92 | 7,42 | 7,87 | 8,28 | 8,66 | 9,01 | 9,34 | 10 |
| 11 | 3,28 | 4,16 | 4,79 | 5,30 | 5,72 | 6,09 | 6,42 | 6,72 | 7,00 | 7,25 | 7,48 | 11 |
| 15 | 2,86 | 3,54 | 4,01 | 4,37 | 4,68 | 4,95 | 5,19 | 5,40 | 5,59 | 5,77 | 5,93 | 15 |
| 20 | 2,46 | 2,95 | 3,29 | 3,54 | 3,76 | 3,94 | 4,10 | 4,24 | 4,37 | 4,49 | 4,59 | 20 |
| 30 | 2,07 | 2,40 | 2,61 | 2,78 | 2,91 | 3,02 | 3,12 | 3,21 | 3,29 | 3,36 | 3,39 | 30 |
| 60 | 1,67 | 1,85 | 1,96 | 2,04 | 2,11 | 2,17 | 2,22 | 2,26 | 2,30 | 2,33 | 2,36 | 60 |
| ∞ | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | ∞ |
| ν \ k | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | k \ ν |

La fonction discriminante est supérieure à la limite 1,00. Le test est donc significatif à 95 %, on peut conclure à l'inégalité des variances.

ANNEXE 4 : Détermination des poids affectés à chaque variable de l'étalonnage :

Si les opérations d'étalonnage comportent plusieurs mesurages pour chaque grandeurs de référence, on peut calculer des estimations s_i de l'écart-type et tracer une courbe représentant les intervalles de confiance de s en fonction des humidités de l'étalonnage.



Le tracé de la courbe peut être approximatif, il détermine les nouveaux écarts-types s'_i (ordonnées des points de la courbe ayant pour abscisse les humidités de l'étalonnage) et donc les nouvelles variances s'^2_i . Les poids g_i , pour chaque grandeur de référence, sont inversement proportionnel aux variances s'^2_i :

$$g_i = K / s'^2_i \quad (b)$$

Les nouvelles variances associées à chaque teneur en eau H de l'étalonnage sont :

| | | |
|-----------------------|-------------------------|-------------------------|
| H = 0% $s'^2 = 12.96$ | H = 1.6% $s'^2 = 25$ | H = 3.1% $s'^2 = 21.16$ |
| H = 6.8% $s'^2 = 16$ | H = 9.3% $s'^2 = 18.49$ | H = 14.8% $s'^2 = 100$ |

Le coefficient K est pris à 3.4 pour avoir une somme des poids égale à 1.

On obtient les poids :

| | | |
|------------------|------------------|-------------------|
| $g_0 = 0.26$ | $g_{1.6} = 0.14$ | $g_{3.1} = 0.16$ |
| $g_{6.8} = 0.21$ | $g_{9.3} = 0.18$ | $g_{14.8} = 0.03$ |

ANNEXE 5 : Détermination de l'erreur de l'étalonnage sur les humidités :

La relation d'étalonnage est de la forme : $f(x) = b x + c$ (Intensité = b Humidité +c)

L'incertitude totale sur les humidités est :

$$s_{\text{tot}}^2 = [s_{\text{etal}}^2 / f'(H_0)^2] + [s_{\text{mesure}}^2 / n_0 f'(H_0)^2] \quad (\text{c})$$

avec, le premier terme de la somme correspondant à l'incertitude sur les paramètres et le deuxième terme à l'incertitude sur les mesures ; n_0 le nombre de mesurage et $f'(H_0) = b$.

$$s_{\text{etal}}^2 = \frac{1}{b^2} * \hat{K} \left(\frac{1}{n_i * g_i} + \frac{(H_0 + \bar{H})^2}{\sum n_i g_i (H_i - \bar{H})^2} \right) \quad (\text{d})$$

où n_i est le nombre de mesure sur l'étalon d'humidité H_i , g_i le poids du $i^{\text{ème}}$ étalon, \bar{H} la moyenne des humidités étalons et \hat{K} le carré moyen des écarts pondérés $[= \sum g_i (I_i - f(H_i))]$.

$$s_{\text{mesure}}^2 \approx \hat{K} \quad (\text{e})$$

si on considère que les erreurs faites sur les mesures sont les mêmes que celles faites sur l'étalonnage.

On obtient donc :

$$s_{\text{tot}} = \frac{\sqrt{\hat{K}}}{b} * \sqrt{\frac{1}{n_0} + \frac{1}{\sum n_i g_i} + \frac{(H_0 - \bar{H})^2}{\sum n_i g_i (H_i - \bar{H})^2}} \quad (\text{f})$$

Application numérique :

$$\hat{K} = 5.86$$

$$b = 13.47$$

$$n_0 = 1$$

$$\sum n_i g_i = 96.03$$

$$\sum n_i g_i (H_i - \bar{H})^2 = 1691.2$$

$$\bar{H} = 5.93$$

D'après le test de student avec un risque à 5%, on obtient :

$$0.18 < s_{\text{tot}} < 0.2 \text{ pour } 0 < H < 20 \%$$

Les humidités mesurées appartiennent donc à $[\bar{H} \pm 0.33]$.

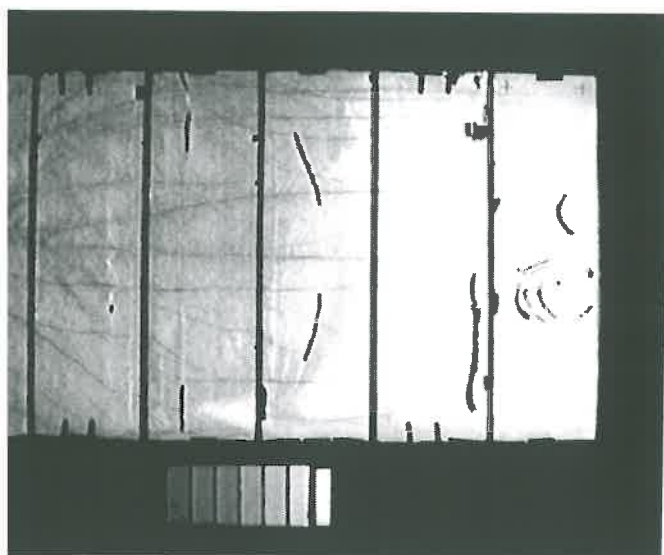
ANNEXE 6 : SERIE 2

Aux pages suivantes se trouvent les images normalisées par rapport à la mire de la série 2 : plus les pixels sont sombres, moins il y a d'eau dans le rhizotron.

Ensuite se trouvent les images de la soustraction de deux photos successives de la série 2 : Les pixels clairs sont assimilés aux prélèvements d'eau par les racines : plus les pixels sont clairs, plus les prélèvements entre les deux horaires indiquées sont forts.



10/07/99 18:50



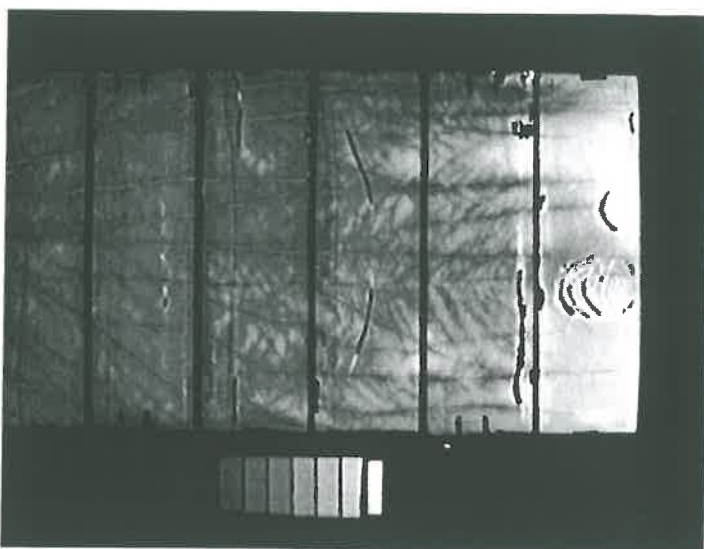
10/07/99 13:50



10/07/99 07:50 saturation



1/07/99 07:50



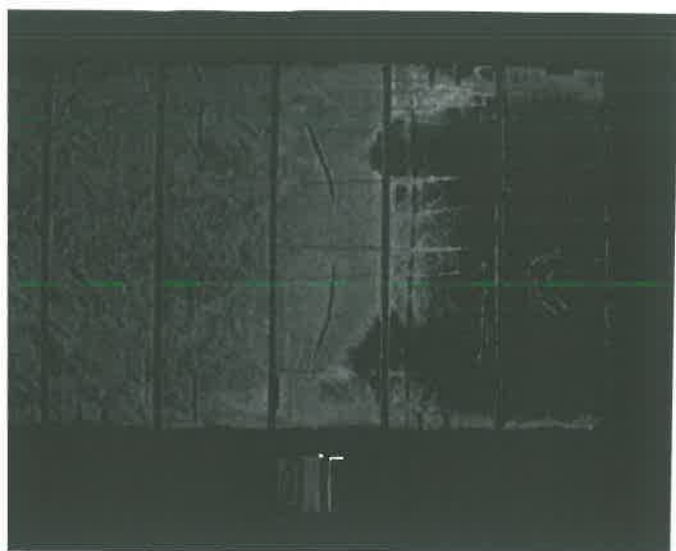
21/07/99 18:50



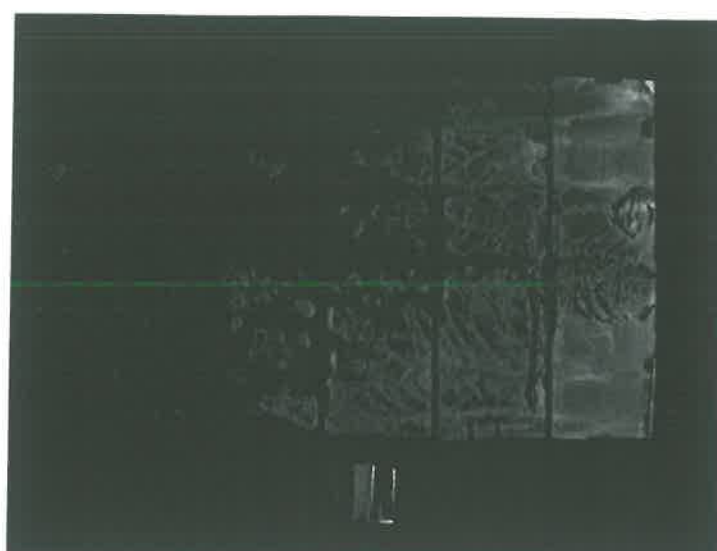
/07/99 07:50



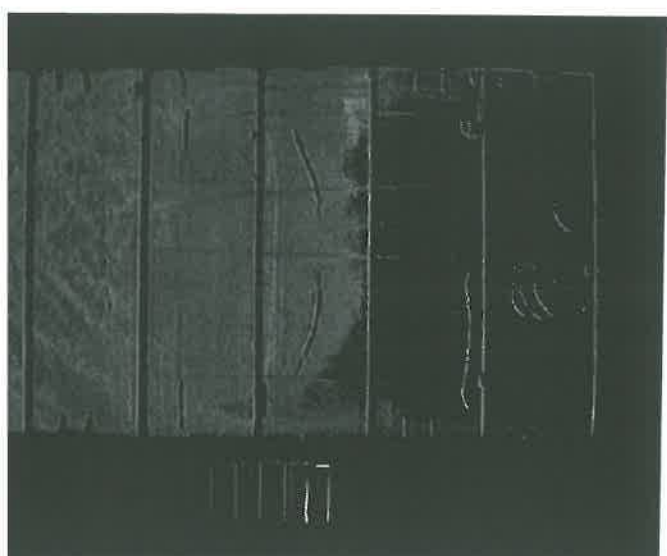
22/07/99 19:00



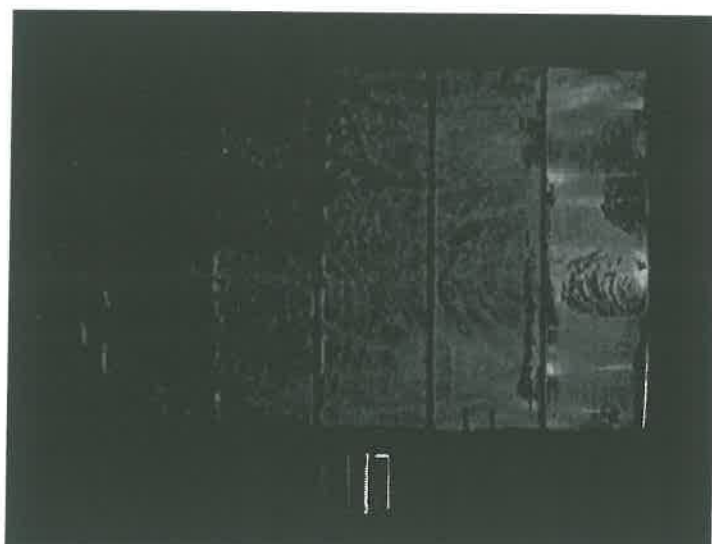
20/07/99 19h50 - 18h50



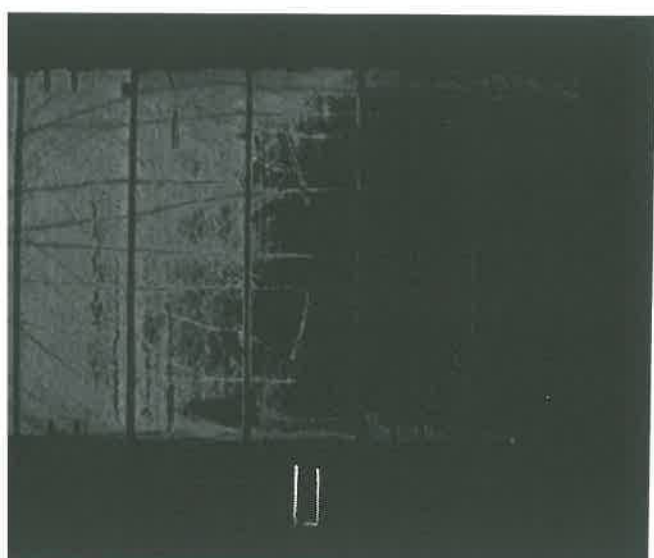
22/07/99 13h50 - 8h50



20/07/99 14h50 - 13h50



21/07/99 18h50 - 17h50



20/07/99 9h50 - 8h30



21/07/99 9h50 - 8h50