



**HAL**  
open science

**Maitrise de l'eau dans les bassins mediterraneens.  
(Etude de l'irrigation localisee).**

R. Guennelon, Rachid Ababou, A. Berger, B. Blavoux, B. Cabibel, M. Freslon,  
. Station de Science Du Sol, . Delegation Generale a La Recherche Scientifique  
Et Technique, . Institut de Mecanique de Grenoble, . Faculté Des Sciences

► **To cite this version:**

R. Guennelon, Rachid Ababou, A. Berger, B. Blavoux, B. Cabibel, et al.. Maitrise de l'eau dans les bassins mediterraneens. (Etude de l'irrigation localisee).. ACC-77-7-1584(1585-1587-1588), Institut national de la recherche agronomique (INRA). 1981. hal-02855782

**HAL Id: hal-02855782**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02855782>**

Submitted on 8 Jun 2020

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

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

INSTITUT NATIONAL DE LA

85

RECHERCHE AGRONOMIQUE

Station de Science du Sol  
Domaine Saint Paul  
B.P. 91  
84140 MONTFAVET

MAITRISE DE L'EAU  
DANS LES BASSINS MEDITERRANEENS  
(Etude de l'irrigation localisée)

Coordinateur : GUENNELON Roger  
Station de Science du Sol  
I.N.R.A. - AVIGNON

ABABOU Rachid	Institut de Mécanique, GRENOBLE
BERGER André	Centre d'Etudes Phytosociologiques et Ecologiques Louis EMBERGER, MONTPELLIER
BLAVOUX Bernard	Centre Universitaire, Laboratoire de Géologie, AVIGNON
CABIBEL Bernard	Science du Sol, I.N.R.A., AVIGNON
FRESLON Maurice	Centre Universitaire, Laboratoire de Géologie, AVIGNON

Compte-Rendu de fin d'étude d'une Recherche financée par la  
Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique

DATE : MAI 1981.

Action Complémentaire Coordonnée  
"Maîtrise de l'eau dans les Bassins  
Méditerranéens"

Décisions d'aides : n° 77-7-1584  
77-7-1585  
77-7-1587  
77-7-1588

FICHE SIGNALÉTIQUE ADMINISTRATIVE

---

Numéro des décisions d'aide : 77-7-1584 (1585-1587-1588).

Action concertée (comité scientifique) : Maîtrise de l'eau dans  
les bassins méditerranéens

Nom du coordinateur : Roger GUENNELON

Téléphone : (90) 88-91-45.

Adresse du laboratoire : I.N.R.A. - Station de Science du Sol  
Domaine Saint Paul - 84140 MONTFAVET

Objectifs visés à l'origine :

Optimisations des apports d'eau et d'éléments fertilisants dans le cadre de l'irrigation localisée, en milieu hétérogène, en arboriculture et cultures maraîchères ; conséquences de l'utilisation de ce système sur l'environnement.

Ces objectifs ont-ils été atteints ? Si non, pourquoi ?

OUI. On ajoutera aux travaux réalisés dans le cadre de cet A.C.C., le rapport et les annexes relatifs, plus particulièrement, aux transferts de solutés (Décision d'aide 79-7-0111). Ce rapport a été transmis à la D.G.R.S.T. le 13 Avril 1981.

D'autres objectifs que ceux visés à l'origine ont-ils été atteints ? Lesquels ?

OUI. Ces travaux ont permis de réaliser :

- une thèse de 3ème Cycle des Sciences de l'eau (M. FRESLON-AVIGNON)
- une thèse de Docteur-Ingénieur (R. ABABOU - Institut de Mécanique de GRENOBLE).

De plus, des résultats obtenus seront à l'origine de nouvelles recherches sur les modalités de lessivage et de pertes des nitrates en zone de drainage.

Le Compte-rendu a-t-il un caractère confidentiel ? NON

Des brevets ont-ils été pris à l'occasion de la recherche ? NON

Conclusion générale sur la recherche.

Cette recherche, et plus spécialement les travaux réalisés à AVIGNON, sur un dispositif créé à cet effet, sont les premiers à avoir été menés en France, sur l'irrigation localisée, sous de multiples aspects :

## RESUME SIGNALÉTIQUE

---

Le présent rapport regroupe les résultats des travaux effectués par plusieurs équipes dans le cadre de l'Action Complémentaire Coordonnée "Maîtrise de l'eau dans les Bassins Méditerranéens".

Trois équipes (I.N.R.A.-AVIGNON, I.M.G.-GRENOBLE, Fac. des Sciences-AVIGNON) ont eu pour cadre de travail des cuves de grandes dimensions (3m x 3m x 2m) remplies d'un matériau limoneux décrites dans les trois premiers chapitres.

Le matériau lui-même (loess de Collias) a été très soigneusement décrit par Maurice FRESLON dans une annexe de sa thèse de 3ème Cycle : "Transferts d'eau et de solutés dans un loess sous climat méditerranéen" (AVIGNON, 17 Décembre 1980).

Deux des équipes participantes ont effectué des travaux à part : au C.E.A. de Cadarache, Philippe COUCHAT et al. ont procédé à une étude expérimentale et à la simulation numérique d'un protocole d'irrigation (leurs résultats ont fait l'objet d'un Compte-rendu, transmis le 7 Juillet 1980, sous le numéro de décision d'aide P25- 77-7-1586).

Une autre équipe a travaillé à Montpellier, sur un dispositif particulier et étudié le rôle de la plante dans l'évapotranspiration. A. BERGER a réalisé ce travail au Laboratoire d'Ecophysiologie du Centre d'Etudes Phytosociologiques et Ecologiques du C.N.R.S.

Nous donnerons la matière des différents rapports que nous ont communiqués les contractants à l'exclusion de celui du C.E.N. de Cadarache, et tenterons une synthèse des résultats obtenus.

- Etude du fonctionnement hydrique à l'aide de traceurs naturels et artificiels.
- Description de bulbes d'irrigation sous végétation.
- Modélisation et simulation par un modèle original avec prise en compte des prélèvements par le végétal.

Par ces recherches, il a été facile de proposer la coopération de la Station de Science du Sol d'Avignon à une étude concertée à l'échelon européen sur l'irrigation localisée des arbres fruitiers.

Les études ont montré (et on pourra le lire par ailleurs, dans la conclusion générale de ce rapport) tout l'intérêt de ce mode d'apport pour les économies d'eau et d'éléments fertilisants.

Mais les travaux doivent se poursuivre car il n'a pas encore été possible de prendre en compte les variations spatiales des propriétés hydrodynamiques, l'évolution de la structure du sol dans le temps. Ces phénomènes perturbent l'image idéale d'un bulbe isolé et une approche statistique des déformations par rapport à un bulbe théorique est nécessaire.

Par ailleurs, il reste à étudier et à développer de nouveaux moyens de pilotage de l'irrigation, c'est-à-dire de rechercher des capteurs efficaces et bon marché, pouvant surveiller plusieurs situations choisies dans une même parcelle irriguée.

FICHE BIBLIOGRAPHIQUE

---

Action concertée .....	MAITRISE DE L'EAU DANS LES BASSINS MEDITERRANEENS.
Numéros des décisions d'aide	77-7-1584 (1585-1587-1588)
Auteurs : .....	Coordinateur : R. GUENNELON R. ABABOU, A. BERGER, B. BLAVOUX, M. FRESLON, B. CABIBEL, J. NOUGIER
Titre : .....	Optimisation des apports d'eau et de solutés en irrigation localisée.
Organismes bénéficiaires : ..	I.N.R.A., Science du Sol, AVIGNON Fac. des Sciences, Laboratoire de Géologie, AVIGNON I.M.G., Fac. des Sciences, GRENOBLE C.N.R.S.-C.E.P.E., MONTPELLIER
Date de rédaction du Compte- rendu de fin d'étude : .....	JUILLET 1981

## TABLE DES MATIERES

---

INTRODUCTION.

CHAPITRE I (D.A. 77-7-1584)

Etude expérimentale de l'irrigation localisée sous  
culture de Maïs (B. CABIBEL)

CHAPITRE II (D.A. 77-7-1585)

Simulation numérique d'un cycle d'irrigation  
localisée (R. ABABOU)

CHAPITRE III (D.A. 77-7-1588)

Etude de transferts hydriques et de solutés sur sol nu  
et sous culture de Maïs (B. BLAVOUX et al.)

CHAPITRE IV (D.A. 77-7-1587)

Rôle de la plante dans l'Evapotranspiration (A. BERGER)

CONCLUSIONS

INTRODUCTION ET PRESENTATION

DES DIFFERENTS RAPPORTS

---

R. GUENNELON

I.N.R.A. - Station de Science du Sol

B.P. 91

84140 MONTFAVET



## INTRODUCTION.

La maîtrise des techniques nouvelles d'irrigation, et plus particulièrement l'irrigation localisée, progresse lentement, en dépit de l'accroissement du nombre des utilisateurs et des surfaces cultivées intéressées.

Les raisons en sont multiples :

- sur le plan théorique, la modélisation des phénomènes est plus complexe que pour l'étude monodimensionnelle de l'eau infiltrée par submersion ou aspersion. La conception et la mise en oeuvre de modèle passent par la détermination de paramètre de conductivité hydraulique et de fonction de pression capillaire, en fonction de la teneur en eau. Ces paramètres ne sont accessibles que par une expérimentation de réalisation lourde.

- sur le plan pratique, les hétérogénéités spatiales (et la variabilité dans le temps) de ces propriétés introduisent des différences marquées (et variables) des bulbes d'irrigation observés, par rapport aux bulbes théoriques.

- l'interaction du système d'irrigation avec la plante cultivée est assez mal connue par suite des difficultés d'observation et de description des systèmes racinaires en place, particulièrement dans le cas de végétaux pérennes de grandes dimensions.

- l'utilisation de la fertilisation dans l'eau d'irrigation pose également des problèmes de dose d'engrais, de fractionnement et de répartition des apports ; la modélisation des transferts de soluté en système bi-ou tridimensionnel est encore plus complexe que celle des transferts hydriques (un compte-rendu rédigé dans le cadre de cette Action Concertée (décision d'aide n° 79-7-0111) a déjà mis l'accent sur les problèmes spécifiques posés par la fertiirrigation).

Les rapports présentés ici essayent d'aborder le problème de l'irrigation localisée fertilisante de manière à proposer des solutions pour son contrôle, son automatisation et ses relations avec les économies d'eau, d'énergie et de substances fertilisantes.

Le premier Chapitre décrit tout d'abord l'un des dispositifs réalisés à la Station de Science du Sol d'Avignon et la mise en oeuvre d'une méthode de mesure des paramètres  $K(\theta)$  et  $h(\theta)$ , conductivité et charge hydrauliques du matériau de remplissage des cuves. La courbe  $h(\theta)$  obtenue par des mesures tensiométriques pour la charge et à la sonde à neutrons pour l'humidité volumique  $\theta$  est une assez bonne représentation de toutes les profondeurs du profil (figure 4 Ch. I) ; une exception doit être faite pour la couche 0-5 cm pour laquelle la méthode de mesure de  $\theta$  est sujette à caution du fait de la proximité de l'interface sol-air, perturbant la mesure neutronique. La dispersion des résultats expérimentaux pour la conductivité hydraulique  $K(\theta)$  est bien plus grande (figure 5 Ch. I) et l'influence de la profondeur assez marquée pour les humidités moyennes (aux environs de 25-30 %). Cette détermination menée avec beaucoup de précautions et dont la durée est extrêmement longue (125 heures pour la phase d'infiltration et plusieurs semaines pour la phase de redistribution) n'est pas facilement utilisable et R. HAVERKAMP a montré, par ailleurs, les limites de la précision que l'on doit en attendre. G. VACHAUD et al. ont également étudié la variabilité spatiale de ces propriétés hydrodynamiques (1981).

Le premier rapport présenté étudie ensuite la morphologie des bulbes d'irrigation sous culture (maïs), pour des apports d'eau linéaires conférant au système un caractère bidimensionnel. Plusieurs débits et doses ont été expérimentés et les résultats des mesures servent de support à la conception et à la validation du modèle I.R.L.O.C. présenté au second Chapitre de ce rapport.

La dose apportée pour une culture donnée et sous des conditions climatiques déterminées découle de l'Evapotranspiration du système considéré ; le débit peut être fixé par des considérations pratiques de réalisation du dispositif d'irrigation et par les propriétés du sol. Ces paramètres étant fixés, il s'ensuit une géométrie particulière d'extension du bulbe, en profondeur, latéralement et en surface que l'on doit connaître et maîtriser pour assurer le transfert de l'eau et des engrais dans la zone exploitée par les racines. Le premier rapport présente une formalisation de ces paramètres

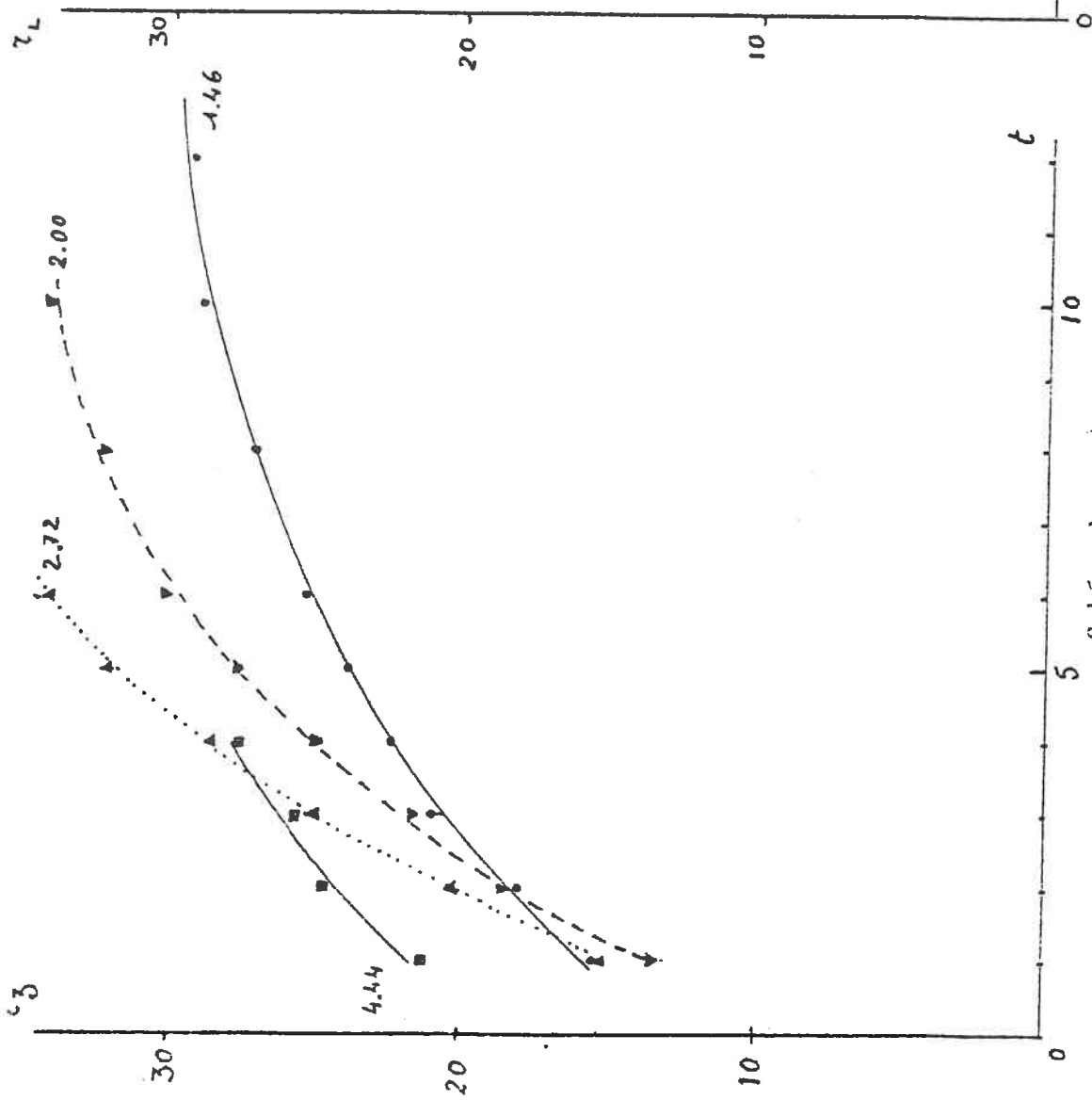


Schéma 1  
 Profondeur de pénétration ( $r_z$ ) en cm) à la verticale  
 du goutteur en fonction du temps (heures)

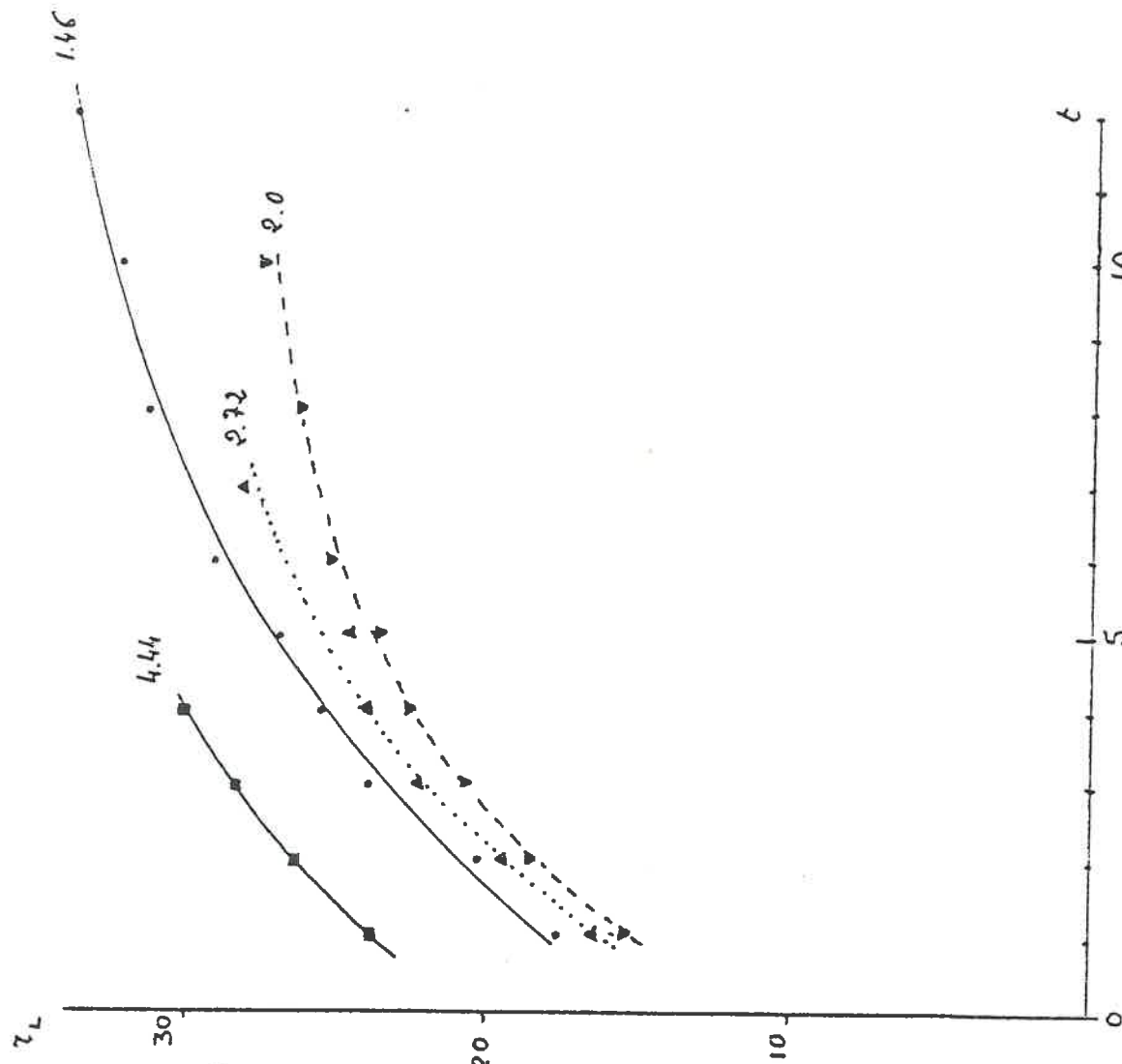


Schéma 2  
 Extension latérale ( $r_L$  en cm) en fonction du temps  
 (heures)

Paramètres : Débits en litres par heure et par mètre.

d'extension par ajustement statistique sur les données expérimentales. Les fonctions proposées ne sont que des relations empiriques valables pour le type d'expérimentation réalisée. On peut cependant les confronter aux mécanismes connus qui régissent la pénétration de l'eau dans le sol en fonction de son état d'humidité initial, et de sa conductivité hydraulique.

La représentation de deux de ces paramètres, profondeur de pénétration  $r_z$  et extension latérale  $r_L$  figurent sur les schémas 1 et 2.

Pour la pénétration en profondeur, les distances atteintes au bout d'une heure pour les débits 1.46-2 et 2.72 litres par heure et mètre linéaire sont peu différentes, les quantités d'eau apportées étant de 1.46, 2 et 2.7 litres par mètre. Ces profondeurs de pénétration augmentent ensuite et d'autant plus vite que le débit est élevé.

Par contre, pour un débit de  $4.44 \text{ lh}^{-1} \text{ m}^{-1}$ , la profondeur atteinte au bout d'une heure est significativement plus grande, mais l'approfondissement du bulbe se ralentit pour venir se confondre avec celui du débit 2.72. On peut interpréter ces résultats en admettant qu'au début de l'irrigation, on remplit d'abord la porosité structurale et cela d'autant plus profondément que le débit est élevé. La migration en profondeur se poursuit ensuite avec une certaine composante gravitaire proportionnelle au débit ; il semble cependant qu'un débit de  $3 \text{ lh}^{-1} \text{ m}^{-1}$  soit un débit limite au delà duquel la vitesse de pénétration en profondeur n'augmentera pas sensiblement. L'extension latérale peut s'interpréter de la même manière, bien qu'après la phase de remplissage (pour  $t < 1$  heure) de la porosité structurale, les débits semblent moins jouer sur les vitesses d'extension, ce qui met en évidence le rôle de la diffusion pure, sans composante gravitaire notable, pour la circulation dans la porosité structurale.

D'autres modes de présentation des résultats figurent dans le Chapitre I de ce rapport, relatifs à cette expérimentation.

L'inconvénient des relations proposées est que, si elles permettent de décrire le phénomène, elles n'ont pas de valeur explicative, et ne peuvent être considérées comme des modèles. En particulier, elles n'utilisent pas les propriétés hydrodynamiques du sol, et ne mettent en jeu ni l'évaporation, ni l'influence du prélèvement par le végétal.

C'est pourquoi le laboratoire d'hydraulique de l'Institut de Mécanique de Grenoble a procédé à l'élaboration d'un modèle mathématique permettant de simuler l'établissement et le développement d'un bulbe d'irrigation localisé en système bidimensionnel (axe de plantation confondu avec axe des goutteurs, points d'arrivée d'eau très rapprochés sur la ligne : voir figure 1 Ch. I).

Le second Chapitre est donc consacré à exposer les principes de la conception du modèle et quelques essais de simulation (Annexe).

Les modèles de simulation les plus récents concernant l'irrigation localisée utilisent soit des solutions analytiques, soit des résolutions numériques, mais peu de modes bi-ou tridimensionnels, ajoutent à l'équation de diffusion une fonction puits racinaire dont on ne peut d'ailleurs que proposer des représentations approchées.

Pour obtenir des solutions analytiques, WARRICK et LOMEN impose une variation linéaire de  $K$  en fonction de  $\theta$ , et proposent des solutions pour des sources ponctuelles, en lignes, en bandes, mais sans fonction de prélèvement par évapotranspiration.

Le modèle proposé par R. ABABOU prétend à combler cette lacune. S'appuyant sur le travail expérimental réalisé à Avignon, il résout l'équation générale de transfert par une méthode implicite aux différences finies. Le formalisme de l'équation de diffusion est classique, mais la difficulté, là encore, provient de l'estimation de l'influence du prélèvement et du couvert végétal : la fonction puits est un produit de la densité racinaire, de la conductivité hydraulique du sol et de la différence de potentiel sol-plante. Il reste que, dans l'expérience utilisée, la densité racinaire n'est pas

connue avec précision, bien que lors d'un réaménagement de l'horizon superficiel d'une des cuves cultivées en maïs, on ait procédé à l'examen du système racinaire. Le volume de sol intéressé par les racines et la répartition de la biomasse à l'intérieur de ce volume correspondent bien aux valeurs proposées par A. ABABOU (cf. figure 4 Ch. II).

Certes le système utilisé n'est pas absolument parfait mais le développement de la végétation et la régularité de la zone mouillée en surface montre que l'on peut le considérer comme approximativement bi-dimensionnel. Ce que le modèle ne prend pas en compte, c'est la première phase de l'infiltration qui nous semble (cf. paragraphe précédent) plus liée à une circulation en régime saturé dans des microfissures qu'à une circulation diffusive en milieu homogène. L'étude met également, en évidence, l'insuffisance de la sonde à neutrons comme moyen d'étude de ces phénomènes, intéressant un volume de sol du même ordre de grandeur que la sphère d'influence de cet instrument. La mesure de l'humidité au voisinage de la surface est également trop imprécise.

En dépit de ces imperfections, le modèle restitue bien certains profils hydriques correspondant à des localisations de tubes de sonde à neutrons (aux réserves précédentes près) et permet de simuler une répartition spatiale en accord avec les points expérimentaux.

Les conclusions confirment l'intérêt de l'irrigation localisée pour le contrôle des pertes par lessivage ; elles confortent aussi l'idée que ce mode d'irrigation doit être aussi continu que possible, l'intervalle entre deux cycles d'apport d'eau ne devant pas excéder trois ou quatre jours. On pourra lire d'ailleurs dans le premier Chapitre que la conduite de l'irrigation dans les mêmes conditions, mais en régime permanent (apports d'eau journaliers au moment de la plus forte demande climatique) n'aboutit pas à la formation de bulbe, les apports d'eau étant alors du même ordre de grandeur que les consommations instantanées réelles.

Enfin l'annexe du second Chapitre est consacrée à des applications en simulation du modèle qui permettent de prévoir en fonction du débit et de la dose (ou du temps), le volume total du bulbe, son extension latérale, son approfondissement et l'importance de la zone saturée de surface.

Les figures ainsi obtenues, si elles fournissent des dimensions voisines des données expérimentales au delà de deux ou trois heures d'irrigation, ne restituent pas correctement l'extension du bulbe au début des apports : on a vu que cela peut découler, en partie, de remplissage de la porosité structurale (fissures et pores) qui prédomine au départ.



Le troisième Chapitre concerne un certain nombre de dispositifs (cuve nue, cuve cultivée en maïs, lysimètres nu et engazonné), tous remplis du même loess éolien.

Cette étude a utilisé plus spécialement des traceurs chimiques, radioactifs ou des isotopes naturels (en particulier l'oxygène-18) pour caractériser les transferts hydriques, en présence ou en l'absence de végétation. Ces traceurs ont été mesurés sur des prélèvements réalisés dans les sols à l'aide de bougies poreuses, ou par prélèvements de solutions s'écoulant à la base de lysimètres.

Un des aspects intéressants de ce travail a été de tenter d'estimer sur le terrain, la zone d'influence des bougies utilisées pour les prélèvements en fonction de la dépression appliquée et de l'humidité initiale du massif de sol.

En effet, l'expérimentation réalisée permet de mettre en évidence grâce à la perturbation occasionnée sur des tensiomètres placés à diverses distances de la bougie, la zone de sol intéressée par la succion de cette dernière.

Le tableau page suivante résume les résultats de ces essais.

Teneur en eau initiale %	21.5 ± 1.5		24.5 ± 1		28 ± 0.5	
Succion à la bougie (mbars)	-500 (1)	-350 (2)	-500 (3)	-350 (4)	-350 (5)	-200 (6)
Distance au tensiomètre (cm)						
5	++	+	++	++	++	+
8	+	+	++	++	++	+
10	●	●	+	+	++	+
15	○	○	●	○	+	+
25	○	○	○	○	○	○

Perturbation du tensiomètre : > 14 mbars      ++  
entre 6 et 14 mbars      +  
inférieur à 6 mbars      ●  
nulle      ○

En utilisant un modèle élaboré par WARRICK et AMOOZEGAR-FARD (1977), et à partir des courbes caractéristiques du matériau, on arrive pour le rayon maximum de la sphère d'influence, pour les essais (1), (3) et (5) à 14.5 - 18 et 17.5 cm, résultats en accord avec les mesures réalisées.

Plus généralement, l'étude de l'infiltration en régime naturel dans un loess a permis de préciser les modalités de transferts hydriques, qui dépendent essentiellement de l'état d'humidité des sols et du régime des pluies.

La reprise des pluies en automne, souvent brutale, s'accompagne d'une infiltration rapide à travers la porosité structurale, mais sans mélange ; elle est limitée en profondeur (environ 40 cm) et il se produit ensuite une réactivation de l'eau piégée dans la porosité texturale, celle-ci se mélangeant très progressivement avec l'eau de pluie.



Près de 300 mm de précipitation sont nécessaires pour que s'achève cette réactivation de l'eau "piégée".

En période estivale, une forte averse (> à 10 mm) réactive partiellement l'eau de la microporosité qui est alors poussée en profondeur. Les mouvements évaporatifs ascendants reprennent très vite, un à deux jours après l'averse ; cependant, en moyenne, le 1/10 des précipitations peut transiter rapidement en profondeur par des microfissures, comme l'on montré les études lysimétriques.

En système irrigué au goutte à goutte, sur sol cultivé, les forts gradients de potentiel inversés, les microfissures, les trajets de racines, et les pores dûs à la microfaune sont à l'origine de cheminements préférentiels. Les vitesses de l'eau (de l'ordre de  $10 \text{ cm.j}^{-1}$ ) sont supérieures d'au moins quatre fois à celles obtenues en sol nu soumis aux précipitations. Dans le système d'irrigation bidimensionnel utilisé, où les apports sont contrôlés en fonction du besoin des plantes, les circulations hydriques sont limitées à un bulbe d'environ 30 cm, à l'intérieur duquel s'effectue un mélange progressif de l'eau et des sels entre chaque nouvel apport, sans création marquée de zones sursaturées en sels.

En ce qui concerne les migrations profondes, en sol nu avec précipitations, le stock initial de nitrates est presque entièrement transmis en profondeur. Sur sol engazonné soumis aux précipitations et à l'irrigation, cette propagation mesurée sur des lysimètres est très limitée. En cuve cultivée en maïs arrosée en goutte à goutte, l'azote apporté est absorbé par les plantes, ou remonté vers la surface par le flux hydrique moyen, due à l'activité racinaire entre chaque phase active d'irrigation. Sur un système non protégé, les nitrates stockés dans la porosité texturale, seront entraînés en profondeur par les pluies d'automne, par réactivation de l'eau "piégée" (eau immobile), si l'on atteint et dépasse durant cette période des hauteurs de pluie de 300 mm.

°

° °

Le quatrième Chapitre s'intéresse plus spécialement au rôle de la plante dans la consommation de l'eau du sol, en proposant une approche de la caractérisation de la fonction puits, à introduire dans les modèles de fonctionnement hydrique du sol.

Le schéma proposé aboutit à des possibilités de simulation du fonctionnement de la plante dans le cas particulier d'un couvert engazonné ; il reste cependant à surmonter quelques difficultés qui s'aggravent d'ailleurs lorsqu'on s'intéresse à un autre type de couvert végétal : il s'agit en particulier de la détermination du profil racinaire pour laquelle la mesure de la biomasse incluse dans un certain volume de sol n'est probablement pas toujours le meilleur paramètre à retenir.

De plus, la résistance épidermique à la diffusion de la vapeur d'eau peut sans doute, dans le cas du dactyle, être exprimée par une valeur moyenne alors que pour d'autres cultures, les arbres fruitiers par exemple, ce paramètre outre sa variation dans le temps, peut dépendre de la localisation et de l'âge des feuilles considérées.

- R. HAVERKAMP, M. VAUCLIN, J. TOUMA, P.J. WIERENGA et G. VACHAUD. -  
A comparison of numerical simulation models for one-dimensional infiltration. S.S.S. Am. J. 41(1977) n° 2, p. 285-294.
- G. VACHAUD, M. VAUCLIN et J. COLOMBANI. Bilan hydrique dans le Sud tunisien. I : Caractérisation expérimentale des transferts dans la zone non saturée. J. Hydrology 49(1981), p. 31-52.
- D.O. LOMEN et A.W. WARRICK. Time-dependent linearized infiltration. II : Line sources. S.S.Soc. Am. Proc. 38(1974), p. 568-572.
- A.W. WARRICK et A. AMOOZEGAR-FARD. Soil water Regimes near porous cup water samplers. Wat. Res. Res. 13(1977), p. 203-207.

CHAPITRE I

ETUDE EXPERIMENTALE DE L'IRRIGATION LOCALISEE SOUS  
CULTURE DE MAIS

B. CABIBEL

I.N.R.A. - Station de Science du Sol

84140 MONTFAVET

## OPTIMISATION DES APPORTS D'EAU EN IRRIGATION LOCALISEE

---

Au cours de ces dernières années s'est largement développée une technique d'apport d'eau aux cultures, l'irrigation localisée, dont la dénomination recouvre des réalités très diverses quant à la localisation dans l'espace et à la continuité dans le temps de l'apport. L'irrigation localisée devrait permettre d'assurer à la culture une meilleure disponibilité de l'eau tout en conduisant à des économies en celle-ci, parfois substantielles, par suite de la réduction du volume de sol humidifié, des surfaces évaporantes et des pertes possibles par percolation profonde. De fait sa mise en oeuvre n'a pas toujours été couronnée du succès escompté, les études préalables à son application au champ se limitant souvent à la simple reconduction de procédés ayant "fait leur preuve" dans des conditions autres de climat et de sol.

Aussi a-t-il paru nécessaire de procéder à l'analyse quantitative des transferts d'eau dans le sol sous irrigation localisée, dans le cadre du thème de recherche "Maîtrise de l'eau en zone méditerranéenne" (action concertée D.G.R.S.T. I.N.R.A.-I.M.G.). Une telle étude a été entreprise grâce à l'utilisation conjointe de mesures expérimentales et d'un modèle mathématique et devrait déboucher sur la détermination des conditions optimales d'application de l'eau à la culture pour une utilisation optimale de celle-ci par la plante irriguée.

L'approche expérimentale a été menée à la Station de Science du Sol de l'I.N.R.A. - MONTFAVET. Elle avait initialement pour but d'étudier l'évolution de l'état hydrique d'un sol pouvant présenter des hétérogénéités texturales ou structurales, non saturé et cultivé, soumis à une irrigation localisée en ligne, les variables prises en compte dans l'analyse des phénomènes étant les paramètres de l'irrigation (fréquence, débit, dose d'irrigation, état d'humidité initial du sol). Cependant l'approche expérimentale ne pouvant pas à elle seule rendre compte d'une description quantitative exhaustive de la circulation de l'eau dans le sol et de son utilisation par la plante, vu la complexité des phénomènes mis en jeu (écoulements bidimensionnels, extraction d'eau par les racines) et l'imprécision des mesures d'humidité,

dité dues aux trop grandes dimensions de la sphère d'influence de la sonde à neutron (rayon de la sphère supérieure au pas de mesure), la modélisation mathématique est apparue comme un complément indispensable à l'étude expérimentale.

Le modèle de simulation utilisé a été mis au point au laboratoire d'hydrologie de l'I.M.G. et fait actuellement l'objet d'une thèse (cf. ABABOU, 1978-1981). Il comporte un modèle général d'écoulement d'eau bidimensionnel (infiltration localisée et redistribution) et un sous-modèle d'extraction racinaire. On a pu ainsi dégager une quantification plus exhaustive des transferts d'eau dans le sol et décrire l'activité d'extraction d'eau par les racines (non accessible par la mesure).

Le présent rapport fait état des résultats obtenus par l'approche expérimentale puis ceux obtenus par la simulation complète d'un cycle d'irrigation particulier. On notera que ces résultats ne sauraient être en toute rigueur, et dans l'état actuel de la recherche, généralisés à d'autres conditions naturelles ou à d'autres types d'irrigation localisée. Cependant, un premier pas vers une analyse plus générale des transferts d'eau en irrigation localisée est présenté en annexe.

On y étudie à l'aide du seul modèle de simulation l'influence du débit et de la dose sur la cinétique du bulbe d'humectation sous apport d'eau localisée linéaire (sol I.N.R.A.-MONTFAVET supposé non cultivé : ETR = 0), une étude similaire étant actuellement reprise pour d'autres types de sol.

## A - CONDUITE DE L'EXPERIMENTATION.

### 1 - DISPOSITIF EXPERIMENTAL.

L'ensemble du dispositif est schématisé en Figures 1 et 2.

#### 1.1. Cuve de mesure.

Les expérimentations sont conduites dans des lysimètres sans fond de 18 m<sup>3</sup> pour une surface de 9 m<sup>2</sup>, contenant un loess dont les caractéristiques sont données au tableau 1. Le sol a été mis en place dans les cuves par sédimentation et repose à sa base sur des alluvions argilocalcaires de la Durance. La mise en place définitive du sol a été obtenue au travers de plusieurs cycles humectation à saturation-dessiccation. Les lysimètres sont implantés sous tunnels plastiques ouverts aux deux extrémités.

Argiles	10.5 %
Limons fins	14.5 %
Limons grossiers	36.1 %
Sables fins	15.7 %
Sables grossiers	23.1 %

TABLEAU 1 : Caractéristiques granulométriques  
du loess de Collias.

### 1.2. Dispositif de mesure.

Chaque lysimètre comporte :

o un réseau de tubes d'accès pour sonde à neutrons, constitué de 3 tubes en première année de mesure, de 5 tubes l'année suivante. Ces réseaux de tubes permettent la mesure de l'humidité du sol sur des verticales distantes de 25 cm puis de 12.5 cm dans deux plans perpendiculaires à la ligne de plantation-irrigation, le pas vertical de mesure étant de 10 cm.

o un réseau de tensiomètres horizontaux et verticaux dont la disposition relative permet une scrutation tridimensionnelle des potentiels dans l'espace sol entre 0 et 165 cm de profondeur.

Lors des expérimentations de caractérisation hydrodynamique, les lysimètres sont de plus équipés d'un dispositif permettant le maintien d'une charge d'eau constante constituée de deux anneaux de Muntz ( $\emptyset$  de 1 m et de 2 m) et de deux vases de Mariotte (détermination de K saturée) puis d'un mulch plastique isotherme (détermination de K non saturée en drainage interne).

### 1.3. La culture.

La plante test est le maïs. Il est mis en place par semis direct, un plant étant conservé après levée tous les 25 cm. Chaque cuve porte trois raies de maïs, distantes de un mètre, la raie centrale étant la raie de mesure. Il ne nous a pas paru nécessaire d'incorporer un tel dispositif dans une plantation de maïs ; celle-ci n'aurait été, en effet, jamais suffisamment grande, dans les conditions réalisées, pour permettre d'assurer que la parcelle d'essai soit intégrée dans le climat régional.

### 1.4. Dispositif d'irrigation.

L'irrigation est réalisée par 3 rampes de capillaires, une par raie de plantation. Les points de gouttages, distants sur la raie d'irrigation de 17 cm, sont tels que l'irrigation peut être considérée comme linéaire, les zones de sol mouillées se recoupant dès le début de l'apport d'eau, quelque soit le débit testé. De plus, les localisa-



tions relatives de la raie de plantation et de la ligne d'irrigation sont telles que les plans de symétrie de l'apport d'eau et du système racinaire peuvent être considérés comme confondus, les débits utilisés vont de 0.5 à 10 l par heure et par mètre linéaire de rampe d'irrigation.

### 1.5. Modalités de l'irrigation.

L'irrigation est conduite tous les jours (régime permanent - Cuve 6) ou tous les 4-5 jours (régime transitoire - Cuve 4). Pour chacune des deux fréquences, cinq débits ont été réalisés, compris entre 0.70 et 4.44 l h<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup>. La dose journalière d'irrigation est égale à l'ETP de la veille, mesurée sur fétuque dans un lysimètre pesable jouxtant l'expérimentation. En régime transitoire, la dose d'irrigation est égale à la somme des ETP comprises entre deux irrigations successives.

## 2 - CARACTERISATION HYDRODYNAMIQUE DES SOLS.

On a déterminé, dans chacune des cuves expérimentales (cuves 4 et 6), les relations  $h(\theta)$  et  $K(\theta)$  des sols avant leur mise en culture. La conductivité saturée a été obtenue par analyse de l'infiltration sous charge constante (Fig. 3), les relations  $h(\theta)$  et  $K(\theta)$  en milieu non saturé étant déterminées par la méthode du drainage interne suivie de la méthode du bilan (VACHAUD et al., 1978). Les résultats obtenus sont schématisés pour la cuve 4 en figure 4 et 5.

De plus, ces déterminations ayant été effectuées simultanément dans les différentes cuves, elles l'ont donc été dans des situations analogues d'un même matériaux, le sol ayant été mis en place dans tous les cas considérés selon des conditions identiques. La comparaison des résultats devrait donc permettre d'apprécier le niveau nécessaire de caractérisation à prendre en considération pour appréhender le comportement hydrodynamique des sols.

L'analyse des résultats obtenus montre que les conductivités hydrauliques saturées sont très proches puisque respectivement égales à 0.32 et 0.40 mm h<sup>-1</sup> dans les cuves 4 et 6. Il y a également accord satisfaisant quant à la relation liant la conductivité hydraulique à la teneur en eau du milieu pour l'ensemble du profil étudié (0-105 cm), notamment dans l'intervalle des teneurs en eau trouvées par la suite sous irrigation localisée à savoir de 0.30 à 0.18 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> (Fig. 6).

De même, les relations qui expriment le potentiel en fonction de l'humidité du milieu pour l'ensemble des profils étudiés (0-105 cm) sont encore concordants, les écarts de teneur en eau apparaissant pour une même valeur du potentiel, étant du même ordre que l'écart de mesure fait à la sonde à neutrons sur l'humidité du sol (Fig. 7).

On relève, néanmoins, des différences marquées quant aux relations  $h(\theta)$  et  $K(\theta)$  lorsqu'on procède à une analyse des résultats horizon par horizon, notamment aux faibles humidités. En conséquence, comme la morphologie des bulbes hydriques créés sous irrigation localisée est fortement influencée par les hétérogénéités locales existantes dans le profil de sol irrigué, il apparaît comme une nécessité de ne pas se limiter à une détermination des propriétés hydrodynamiques basée sur une appréciation sommaire de l'homogénéité du sol si l'on veut étudier, dans ces conditions d'irrigation, la circulation de l'eau. Une caractérisation fine des couches de surface apparaît en ce sens fondamentale (Fig. 5).

## B - RESULTATS ET DISCUSSION.

### 1 - CARACTERISATION DE LA ZONE MOUILLEE CREEE SOUS IRRIGATION.

Pour l'ensemble des expérimentations, les données obtenues ont été, après lissage des valeurs brutes, interprétées en considérant :

- d'une part la répartition des humidités dans le sol et leur évolution dans le temps et dans l'espace, lors d'un cycle d'irrigation.

- d'autre part, la répartition des accroissements de teneurs en eau en chacun des points considérés et leur évolution.

Cette démarche a permis d'évaluer l'enveloppe des bulbes hydriques créés sous irrigation aux différentes doses d'eau appliquées ( $Q$ ) et sous les divers débits utilisés ( $q$ ) sous des conditions d'évapotranspiration très proches pour l'ensemble des couples de variables ( $Q, q$ ) testés. La limite du bulbe est fixée par l'enveloppe de sol présentant un accroissement minimal de teneur en eau égal à  $0,01 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  de sol, la limite de détection de la sonde à neutrons étant de  $\pm 0,005 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ . Des relations sont alors recherchées entre les paramètres caractérisant les zones mouillées et leur évolution dans le temps d'une part et les paramètres de l'irrigation d'autre part.

On notera qu'il n'a pu être mis en évidence, dans les conditions expérimentales choisies, la formation de zones mouillées sous irrigation localisée, en régime permanent, pour les débits utilisés simultanément en régime transitoire. Les irrigations étant effectuées lors de la demande climatique la plus intense de la journée, les apports d'eau à la culture, sous les faibles débits testés, devaient être inférieurs ou proches des évapotranspirations réelles instantanées et n'ont pas permis de mesurer des accroissements résiduels de teneur en eau dans le sol. Des débits plus forts, réalisés par la suite, dans des conditions climatiques proches, sont en cours d'analyse, ces débits, compris entre 4 et 10  $l h^{-1} m^{-1}$  ayant pu être appliqués par concentration sur un seul rang de plantation, au centre du lysimètre, des trois rangs de maïs initialement prévus.

En conséquence, l'ensemble des résultats expérimentaux étudiés concerne des cycles d'irrigation menés en régime transitoire, les débits étudiés étant respectivement de 1.46, 2.00, 2.72 et 4.44  $l h^{-1} m^{-1}$ , la dose d'eau variant dans l'intervalle 0-20 mm.

On donne au tableau 2 les teneurs en eau trouvées pour un cycle d'irrigation mené sous un débit de 1.46  $l h^{-1} m^{-1}$ , expérimentation dont les résultats ont servi à fixer les paramètres du modèle mathématique établi par l'I.M.G. (cf. ABABOU). En figure 8 sont schématisés, pour la même expérience, les accroissements correspondants de teneur en eau déterminés à 3 temps différents, à savoir 4, 6 et 12 heures d'irrigation. Au tableau 3 sont données, pour l'ensemble des expériences analysées, les valeurs trouvées des deux paramètres choisis pour caractériser l'expansion des zones de sol mouillées sous apport d'eau, le rayon latéral  $r_L$  et le rayon vertical  $r_z$ , aux différents temps d'irrigation considérés. En figure 9 sont schématisés, pour les quatre débits considérés, les bulbes hydriques obtenus pour une dose d'irrigation de 14  $l m^{-1}$ .

## 2 - INFLUENCE DE LA DOSE D'IRRIGATION.

L'analyse des résultats obtenus pour l'ensemble des débits testés permet d'établir que les rayons de la zone mouillée sont des fonctions croissantes de la dose apportée,  $r_L$  et  $r_z$  étant liés respectivement à la dose par des relations de type

$$r = (a Q^n)_{cte}$$

de mesure (cm)	5			15			25			35			45			55		
	0	25	50	0	25	50	0	25	50	0	25	50	0	25	50	0	25	50
Distance au goutteur de la vertica- le de mesu- re (cm)	10.7	9.2	9.1	17.3	14.5	16.4	20.5	18.4	19.9	22.3	20.6	21.8	22.7	21.4	23.3	23.7	22.5	23.0
Temps d'ir- rigation (H)																		
T <sub>0</sub>	10.7	9.2	9.1	17.3	14.5	16.4	20.5	18.4	19.9	22.3	20.6	21.8	22.7	21.4	23.3	23.7	22.5	23.0
T <sub>2</sub>	17.3	10.2	9.0	19.3	14.8	16.1	20.8	18.5	19.9	22.6	20.4	21.7	23.0	21.2	23.3	23.7	22.5	23.0
T <sub>4</sub>	20.3	12.0	9.1	22.4	15.4	16.3	21.1	18.6	19.8	22.6	20.6	21.6	23.0	21.2	22.6	23.8	22.5	23.0
T <sub>6</sub>	22.7	13.9	9.2	22.8	16.4	16.6	21.4	18.6	19.8	22.7	20.8	21.6	23.1	21.3	22.6	23.9	22.5	22.2
T <sub>12</sub>	25.8	18.1	8.8	25.4	20.9	16.9	22.6	19.9	20.0	22.7	21.0	21.8	23.2	22.0	23.0	24.1	22.5	22.3
Temps de redistribu- tion (H)																		
T <sub>12</sub>	19.7	16.7	9.0	25.1	21.9	17.0	23.7	22.1	20.6	23.3	21.4	21.9	23.4	22.0	22.9	23.8	22.5	23.4
T <sub>34</sub>	17.0	15.1	10.3	22.9	20.3	17.0	23.0	21.7	20.6	23.4	22.0	22.3	23.9	22.9	23.2	24.1	23.2	22.7
T <sub>96</sub>	12.1	10.4	10.9	18.7	16.5	17.9	21.9	20.2	20.8	23.2	21.0	22.2	23.9	22.3	23.6	24.4	23.7	23.0

TABLEAU 2 : Evolution des teneurs en eau ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ) en fonction du temps d'irrigation et de redistribution sous un débit de  $1.46 \text{ l h}^{-1} \text{ m}^{-1}$ .

Débit en $l h^{-1} m^{-1}$	1.46		2.00		2.72		4.44	
	$r_L$	$r_z$	$r_L$	$r_z$	$r_L$	$r_z$	$r_L$	$r_z$
Paramètres en cm								
Temps d'irrigation en Heure								
1	17.60	15.60	15.20	13.40	16.25	15.50	23.75	21.25
2	20.25	18.00	18.40	18.25	19.25	20.20	26.25	23.75
3	24.00	21.00	20.60	21.60	22.25	25.00	28.25	25.25
4	25.50	22.40	22.50	24.90	23.75	28.50	30.00	27.50
5	27.00	23.80	23.50	27.60	24.25	32.20	-	-
6	29.25	25.25	25.20	30.10	28.20	34.00	-	-
8	31.40	27.20	26.20	32.30	-	-	-	-
10	32.80	29.00	27.60	34.10	-	-	-	-
12	33.75	29.25	-	-	-	-	-	-

TABLEAU 3 : Extension des rayons des bulbes hydriques créés en fonction du débit et de la dose d'irrigation.

relations données au tableau 4 et schématisées en figures 10 et 11. Les coefficients  $a$  [ $a_L$  pour  $r_L = f(Q)$  et  $a_z$  pour  $r_z = f(Q)$ ] peuvent être assimilés aux paramètres d'extension de la zone de sol mouillée créée lors de l'apport des premières fractions de l'irrigation, les coefficients  $n$  correspondants caractérisant l'accroissement, dans les deux directions de l'espace, de cette zone initiale mouillée, sous dose croissante d'irrigation.

L'analyse des coefficients  $a_L$  et  $a_z$  montre que l'extension de la zone mouillée initiale est plus grande sous les deux débits extrêmes testés, et est maximale sous le débit de  $4.44 \text{ lh}^{-1} \text{ m}^{-1}$ . L'accroissement du bulbe initial est donc sous l'interdépendance du débit et de l'humidité initiale  $\theta_i$  du sol au déclenchement de l'irrigation qui détermine non seulement la conductivité hydraulique du milieu mais également l'état structural du sol qui conditionne les transferts profonds.

La faible humidité  $\theta_i$  du sol, lors des expériences menées sous les débits de  $1.46$  et  $4.44 \text{ lh}^{-1} \text{ m}^{-1}$ , à savoir respectivement  $.10$  et  $.06 \text{ cm}$  d'eau par  $\text{cm}^3$  de sol, implique des transferts d'eau latéraux d'autant plus importants que le débit est fort, la conductivité hydraulique du milieu fonction de  $\theta_i$  étant d'autant plus faible, et des transferts verticaux également importants, des systèmes de fissures apparaissant à ces  $\theta_i$  à l'aplomb des goutteurs. Ces conditions de transfert conduisent à des zones de sol humectées de plus grandes dimensions et à plus faibles teneurs en eau que celles existantes pour les débits intermédiaires,  $2.00$  et  $2.72 \text{ lh}^{-1} \text{ m}^{-1}$ , appliqués sur le même sol plus humide ( $\theta_i = .14$  et  $.15 \text{ cm}^3$  d'eau/ $\text{cm}^3$  de sol) et présentant une structure non fissurée des horizons de surface.

L'analyse des coefficients  $n$ , des vitesses d'accroissement de la zone mouillée  $V_L$  et  $V_z$  définies comme

$$V = na Q^{n-1}$$

et des vitesses moyennes correspondantes  $\bar{V}_L$  et  $\bar{V}_z$  définies comme

$$\bar{V} = \frac{r}{Q}$$

Débit $1h^{-1}m^{-1}$	$r_{cm} = f(Q_{1m^{-1}}) q^{cte}$	$a_L/a_z$	$n_L/n_z$
$q = 1.46$	$r_L = 15.44842 Q^{0.28487}$ $r_z = 13.84296 Q^{0.27074}$	1.116	1.052
$q = 2.00$	$r_L = 12.43600 Q^{0.28636}$ $r_z = 9.48437 Q^{0.46462}$	1.311	0.616
$q = 2.72$	$r_L = 12.52523 Q^{0.26201}$ $r_z = 9.54096 Q^{0.46050}$	1.313	0.569
$q = 4.44$	$r_L = 18.41511 Q^{0.16682}$ $r_z = 16.17345 Q^{0.17870}$	1.139	0.934

TABLEAU 4 : Evolution des rayons de la zone mouillée en fonction de la dose d'irrigation dans les deux directions de l'espace.

et de leurs rapports,  $\frac{V_L}{V_Z}$  et  $\frac{\bar{V}_L}{\bar{V}_Z}$ , dont les valeurs sont données au tableau 5 pour deux doses d'irrigation, montre que :

- pour les débits extrêmes testés, les accroissements de la zone de sol mouillée, sous dose croissante d'irrigation, sont proches, pour un débit donné, selon les deux directions de l'espace, les coefficients en L et en z étant comparables, la circulation latérale étant légèrement plus grande que la circulation verticale (fig. 12). Ces accroissements qui conservent la forme pseudo-hémisphérique de la zone initiale mouillée, sont cependant fonction quant à leur amplitude de l'humidité initiale  $\theta_1$  du sol. Ils croissent avec elle. Il en est de même pour les vitesses moyennes considérées,  $\bar{V}$ , au delà d'une dose limite de  $4 \text{ lh}^{-1} \text{ m}^{-1}$ .

- inversement, pour les deux débits intermédiaires tout accroissement de la dose d'irrigation conduit à un accroissement préférentiel de la zone mouillée selon l'axe vertical (fig. 12), l'humidité du sol étant rapidement proche puis égale à la teneur en eau à saturation à la verticale des goutteurs. Les rapports des vitesses d'accroissement  $V_L/V_Z$  sont de fait toujours très inférieurs à 1, d'autant plus faible que la dose apportée croît, les rapports  $\bar{V}_L/\bar{V}_Z$  proches de 1 durant les premiers temps de l'irrigation devenant inférieurs à 1 au delà d'une dose d'eau limite proche de  $Q = 7 \text{ mm}$ , dose pour laquelle il y a saturation en eau du milieu sous les goutteurs.

### 3 - INFLUENCE DU DEBIT.

Pour une dose d'irrigation donnée, quelle que soit la dose considérée dans l'intervalle étudiée, il existe une relation entre l'extension de la zone mouillée et le débit, relation de la forme

$$r = \frac{A}{q^2} + B \frac{1}{q} + C$$

dont les expressions numériques pour des doses de 2, 4, 6, 8, 12 et  $16 \text{ lm}^{-1}$  sont données au tableau 6.



Dose $1m^{-1}$	Q = 4							Q = 16										
	$V_L$	$V_z$	$V_L/V_z$	$\bar{V}_L$	$\bar{V}_z$	$\bar{V}_L/\bar{V}_z$	$V_L$	$V_z$	$V_L/V_z$	$\bar{V}_L$	$\bar{V}_z$	$\bar{V}_L/\bar{V}_z$	$V_L$	$V_z$	$V_L/V_z$	$\bar{V}_L$	$\bar{V}_z$	$\bar{V}_L/\bar{V}_z$
1.46	1.633	1.364	1.197	5.732	5.037	1.138	0.606	0.496	1.222	2.127	1.833	1.160	0.606	0.496	1.222	2.127	1.833	1.160
2.00	1.324	2.098	0.631	4.624	4.515	1.024	0.492	0.998	0.493	1.719	2.149	0.800	0.492	0.998	0.493	1.719	2.149	0.800
2.72	1.180	2.080	0.567	4.503	4.516	0.997	0.424	0.984	0.431	1.618	2.138	0.757	0.424	0.984	0.431	1.618	2.138	0.757
4.44	0.967	0.926	1.044	5.802	5.180	1.120	0.305	0.296	1.030	1.828	1.659	1.102	0.305	0.296	1.030	1.828	1.659	1.102

TABLEAU 5 : Vitesses d'accroissement des rayons de la zone mouillée ( $V$  en  $cm\ l^{-1}$ ) et leurs rapports pour deux doses d'irrigation en fonction des débits.

Dose en $l\ m^{-1}$	$r_{cm} = \frac{A}{q^2} + B_q + C$	axe q en $l\ h^{-1}\ m^{-1}$
Q = 2	$r_L = 29.18/q^2 + 4.72\ q - 1.76$ $r_z = 27.07/q^2 + 4.34\ q - 2.33$	
Q = 4	$r_L = 32.06/q^2 + 4.59\ q + 1.18$ $r_z = 14.64/q^2 + 2.24\ q + 9.99$	
Q = 6	$r_L = 33.89/q^2 + 4.46\ q + 3.33$ $r_z = 3.97/q^2 + 0.49\ q + 19.91$	
Q = 8	$r_L = 35.28/q^2 + 4.32\ q + 5.08$ $r_z = -5.81/q^2 - 1.10\ q + 28.64$	
Q = 12	$r_L = 37.34/q^2 + 4.08\ q + 7.89$ $r_z = -23.19/q^2 - 3.90\ q + 43.70$	
Q = 16	$r_L = 38.90/q^2 + 3.86\ q + 10.16$ $r_z = -38.56/q^2 - 6.35\ q + 56.68$	

**TABLEAU 6** : Evolution des rayons de la zone mouillée en fonction du débit d'irrigation pour une dose donnée.

L'analyse de ces relations schématisées en fig. 13 et 14 montre que :

- le rayon latéral présente toujours, pour une dose donnée, un minimum pour un débit compris entre 2.4 et 2.8  $lh^{-1}m^{-1}$ , débit limite dont l'amplitude est fonction de la dose et croit avec elle.

- pour le rayon vertical  $r_z$ , il existe une dose limite,  $Q \approx 7 lm^{-1}$ , dose à laquelle apparaît une saturation en eau du milieu à la verticale des goutteurs, au delà de laquelle le rayon, quelle que soit la dose considérée, passe par un maximum pour un débit compris entre 2.2 et 2.4  $lh^{-1}m^{-1}$  et en deçà de laquelle le rayon vertical évolue en fonction de  $q$  comme le rayon latéral.

Les vitesses d'accroissement  $\bar{V}_L$  et  $\bar{V}_z$  obéissent respectivement aux mêmes variations que  $r_L$  et  $r_z$ , alors que  $V_L$  est constamment décroissant lorsque le débit  $q$  augmente et que  $V_z$  passe toujours par un maximum pour un débit  $q$  compris entre 2.2 et 2.4  $lh^{-1}m^{-1}$  (fig. 15).

Si l'on exprime les coefficients A, B et C des relations précédentes en fonction de la dose une relation générale lie les différents rayons considérés au débit et à la dose. Les expressions numériques trouvées

$$r_L = \frac{26,418 Q^{0,139}}{q^2} + 5,646 Q^{-0,138} q + 6,419 \ln Q - 7,921$$

et

$$r_z = \frac{(-4,407 Q + 30,759)}{q^2} - (0,711 Q - 4,821) q + 3,8557 Q - 3,691$$

schématisées en figures 13 et 14 montrent un bon accord entre les valeurs calculées et les valeurs expérimentales.

⊙ tensiomètre vertical

• capillaire

● maïs

▽ tube mesure  $\theta$

1 → raie  $z = 5$  cm

2 → "  $z = 15$  "

7 → 37 cm de la raie  $z = 15$  cm

8 → " "  $z = 30$  "

6 → 25 cm de la raie  $z = 10$  cm

3 → 12.5 cm de la raie  $z = 15$  cm

4 → " "  $z = 30$  "

5 → " "  $z = 45$  "

9 → " "  $z = 60$  "

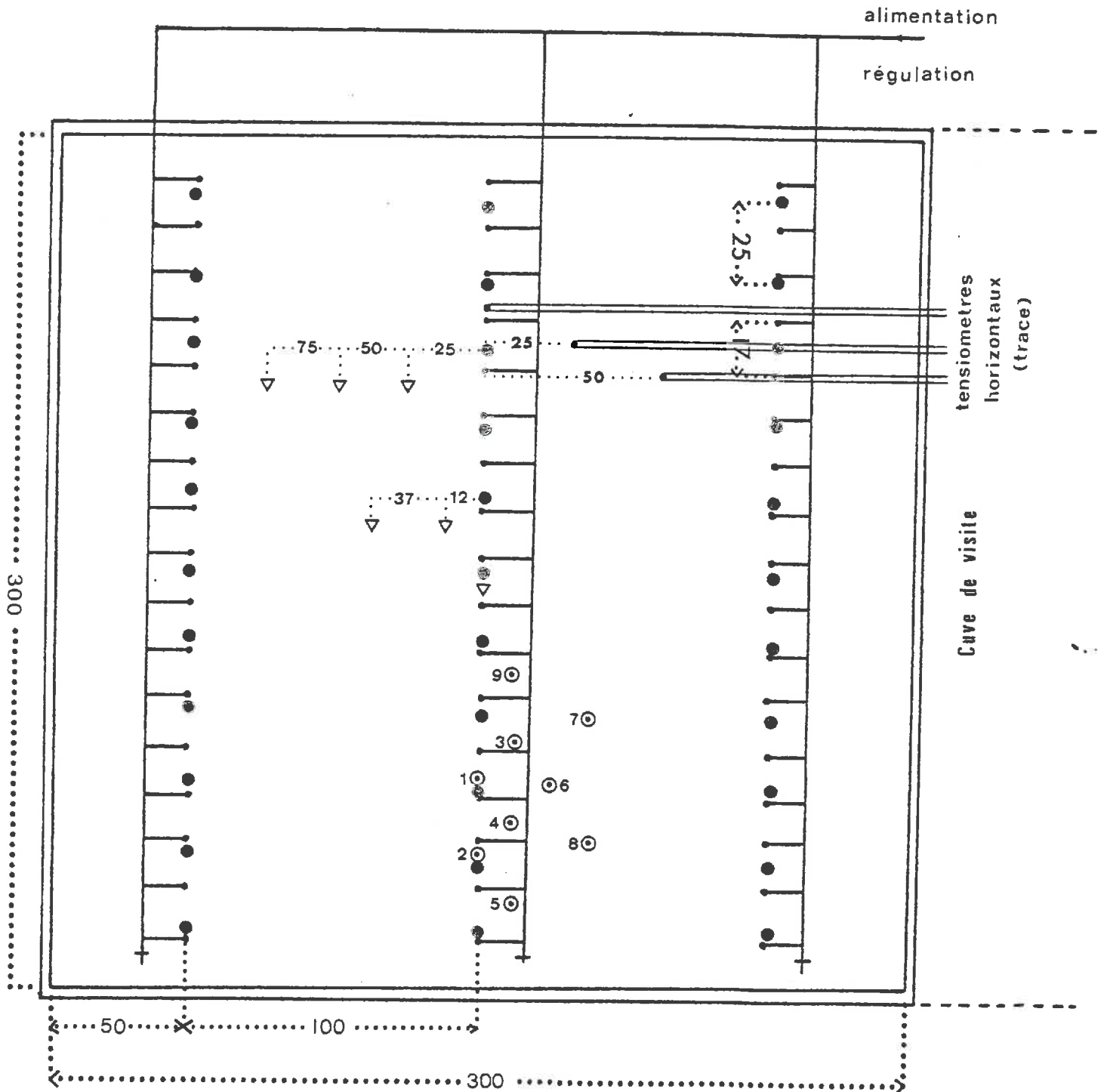


Fig 1 : Lysimètre expérimental : surface

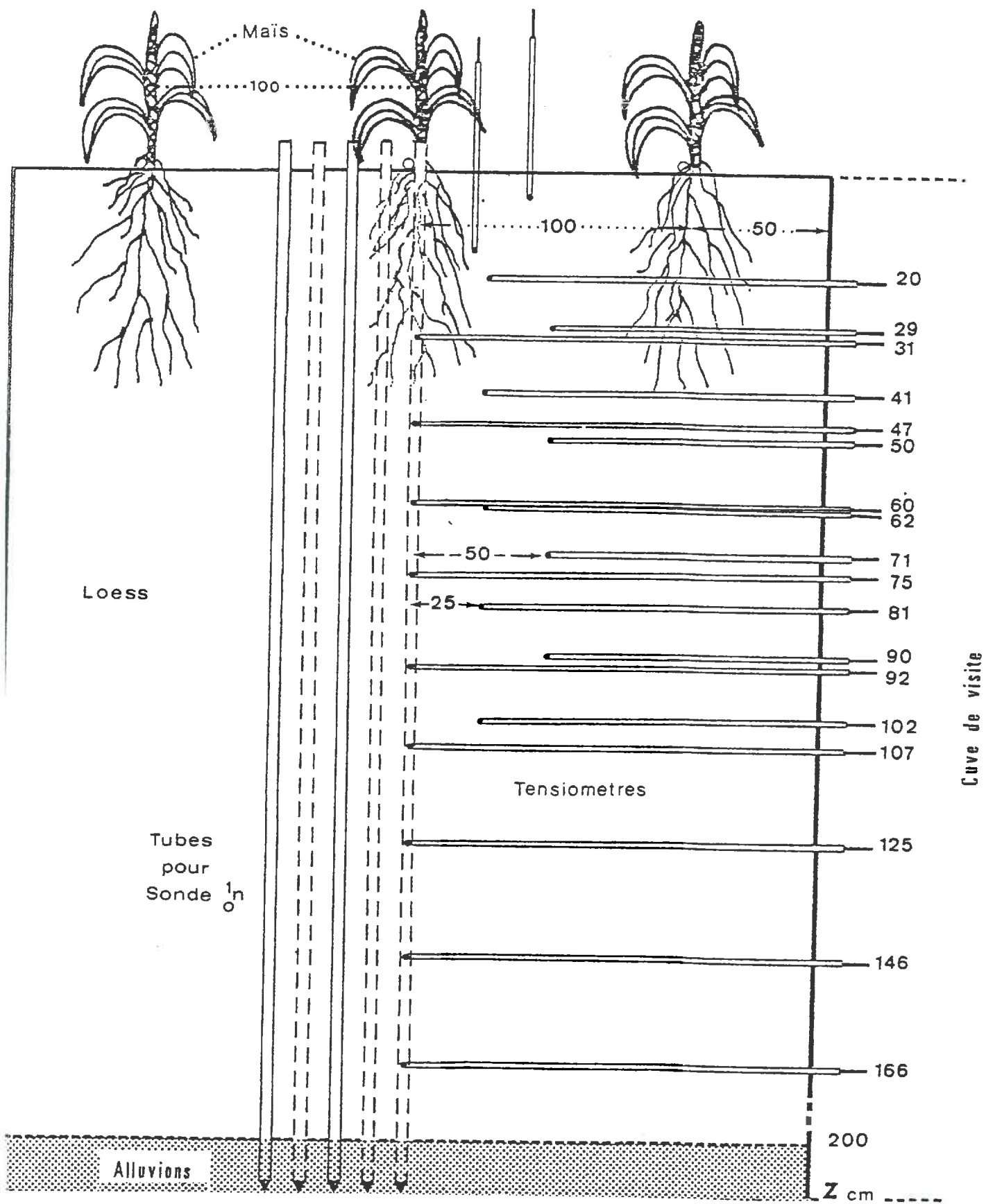


Fig 2 : Lysimètre expérimental : coupe verticale et perpendiculaire aux raies de plantation.

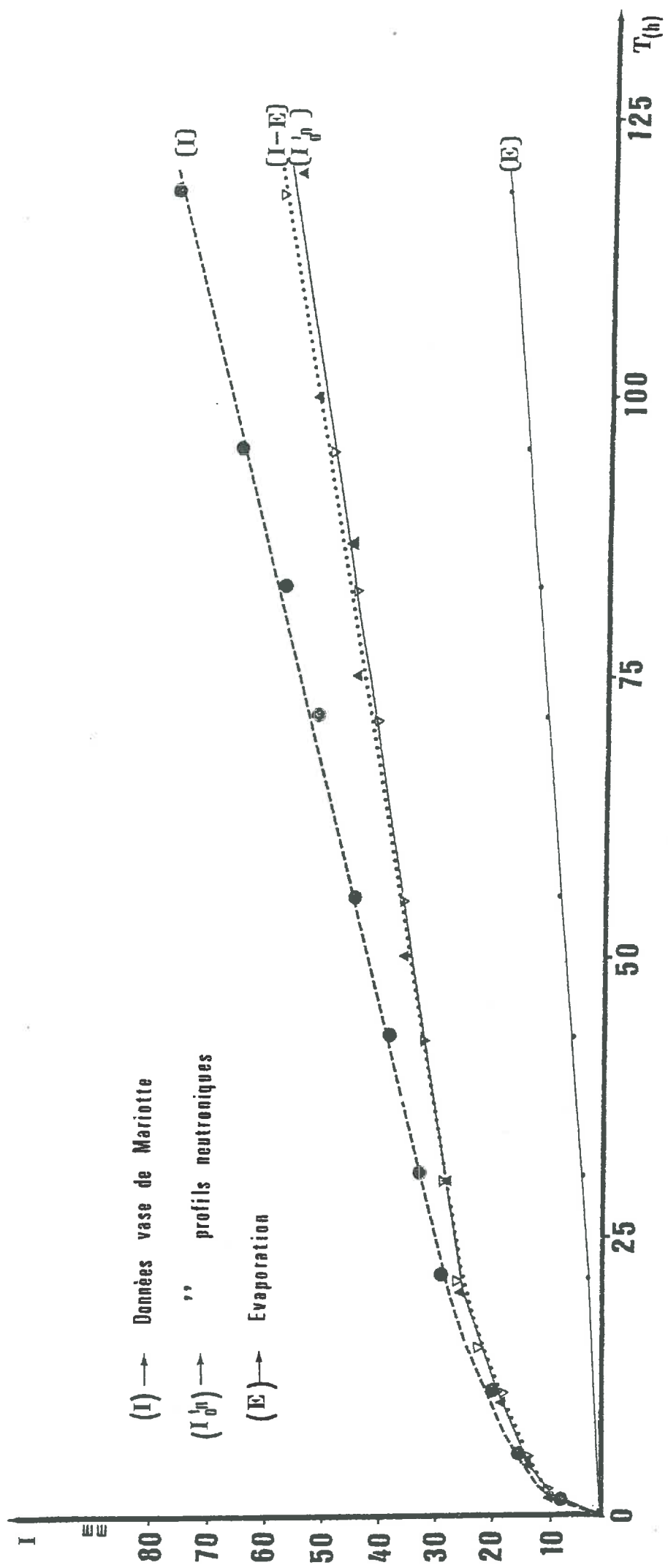


Fig. 3 : Infiltration sous charge constante en fonction du temps. (Cave 4)

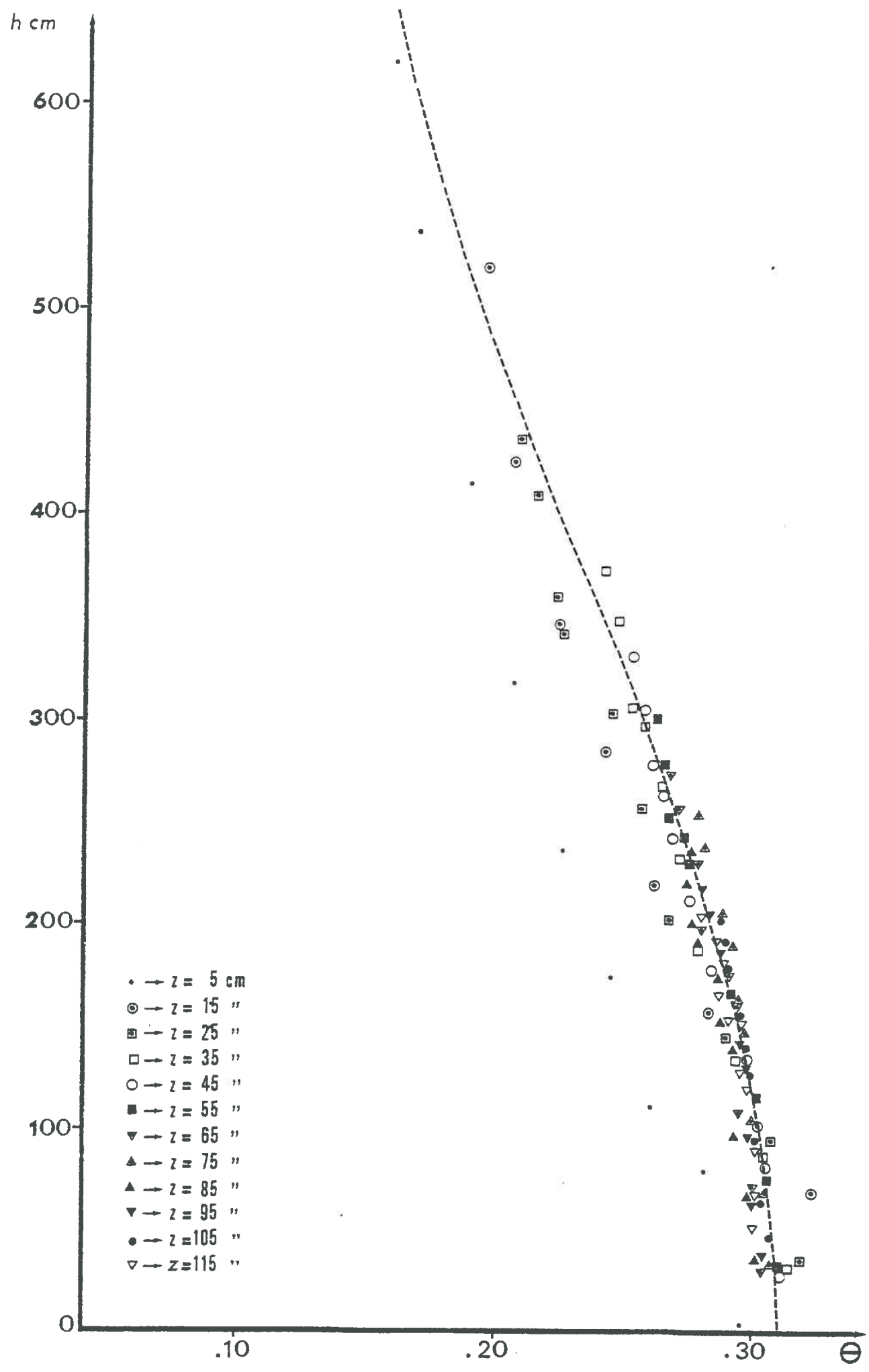


Fig 4 : Courbe Potentiel - Teneur en eau

$K \text{ mm h}^{-1}$

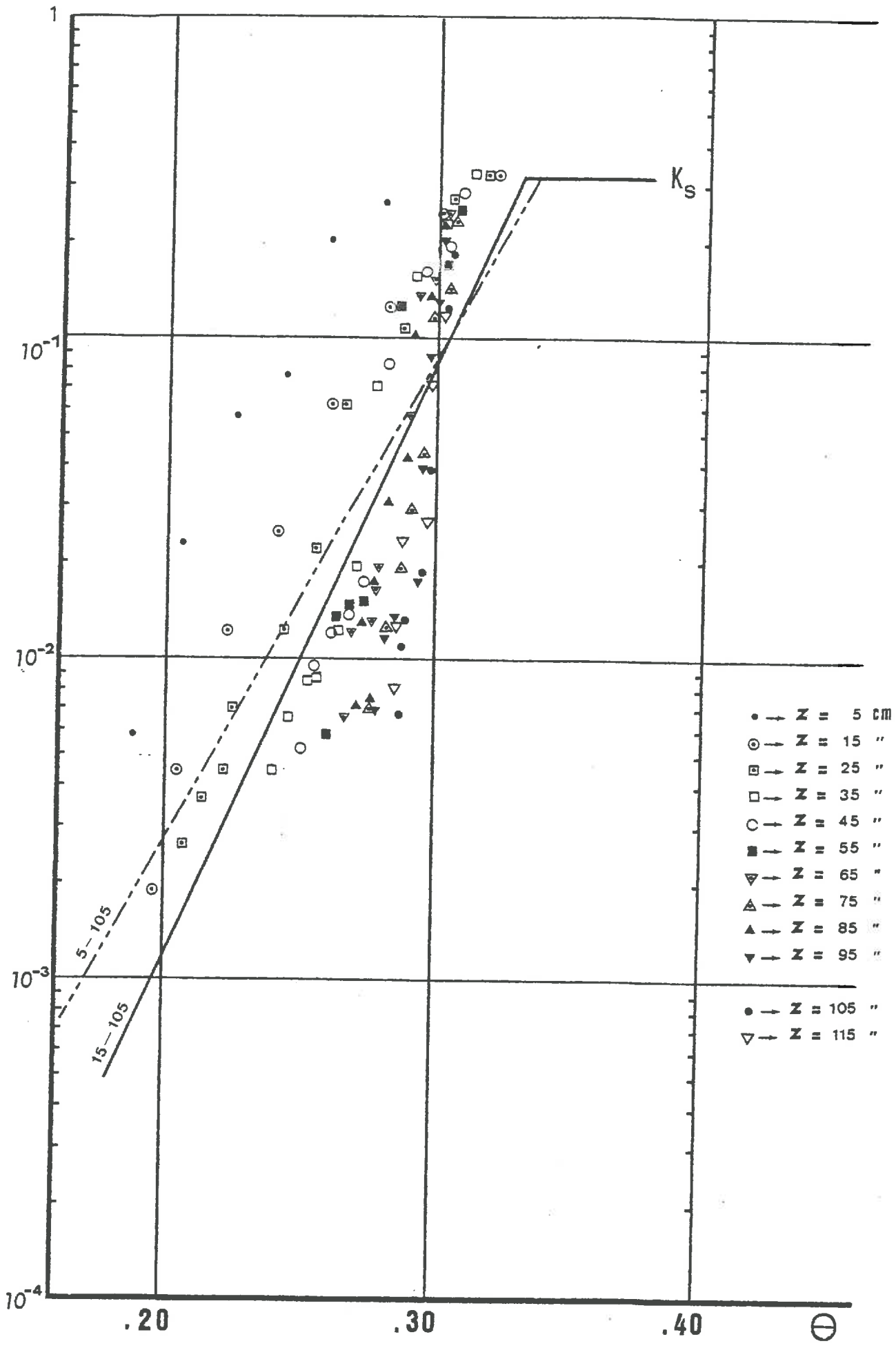


Fig 5 : Relations Conductivité hydraulique - teneur en eau . (Cuve 4)



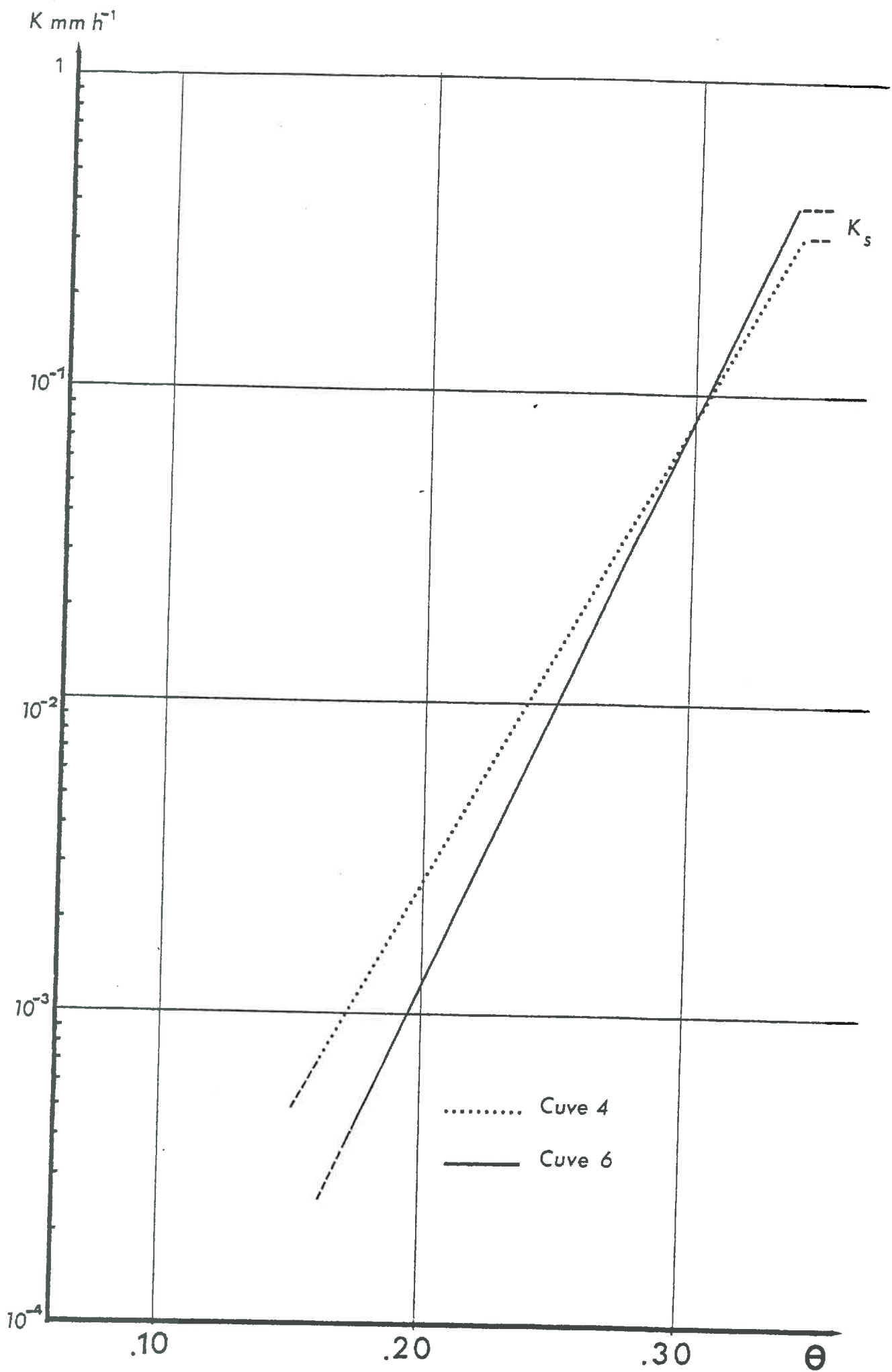


Fig 6 : Relations Conductivité hydraulique - Teneur en eau

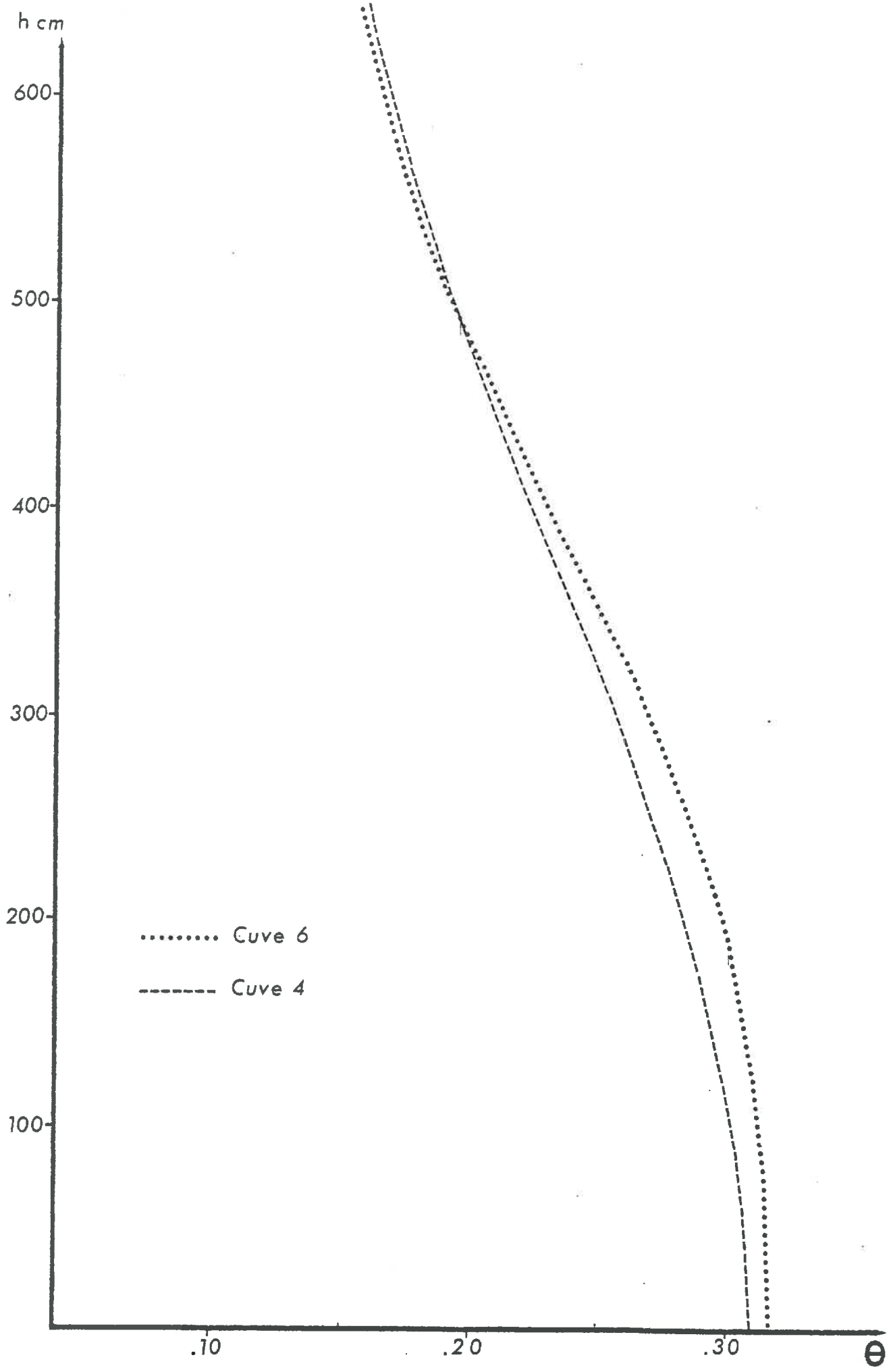


Fig 1 : Courbes Potentiel - Teneur en eau

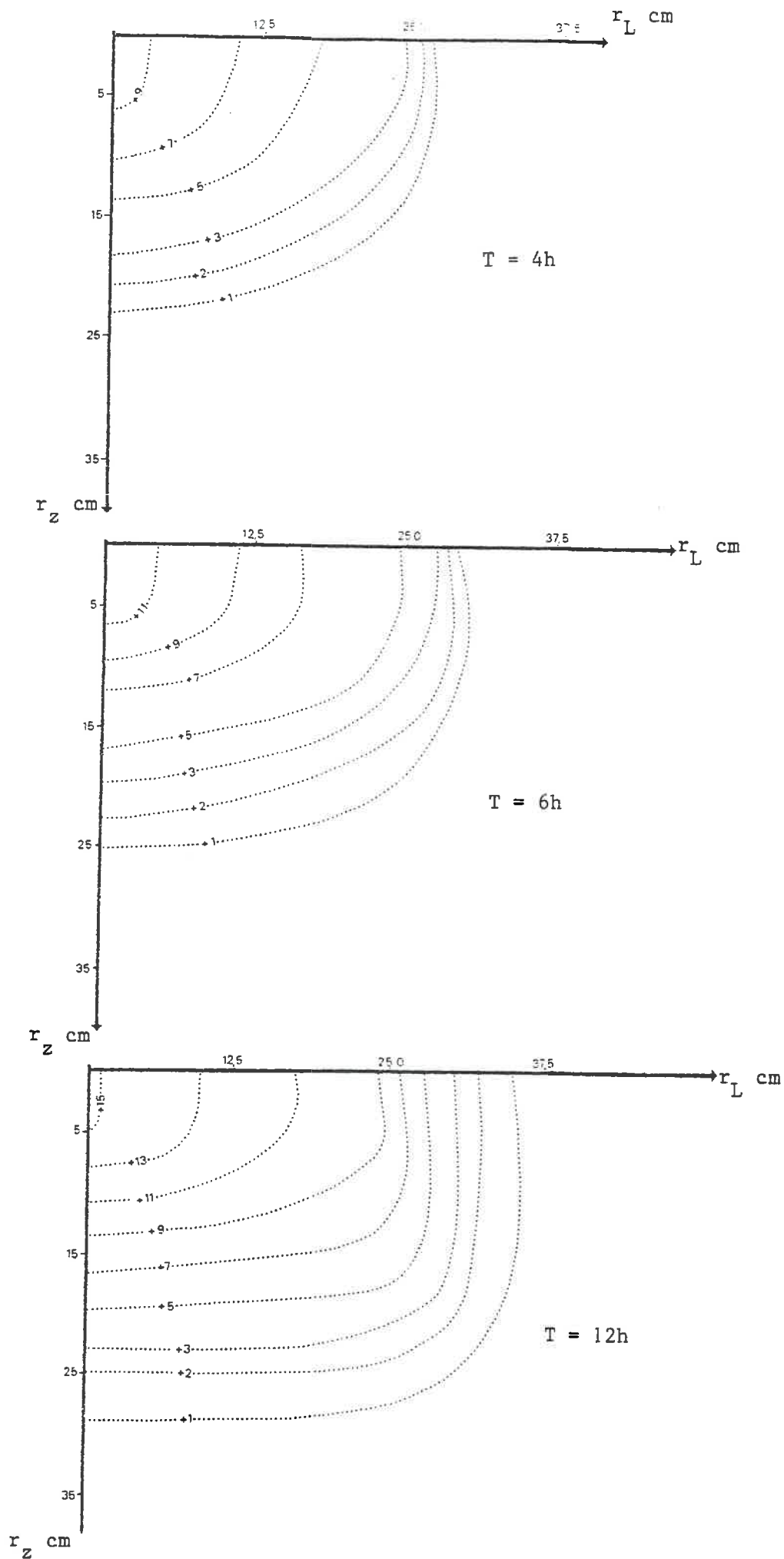


Fig. 8 : Développement du bulbe hydrique pour un débit de  $1.46 \text{ lh}^{-1} \text{ m}^{-1}$ .

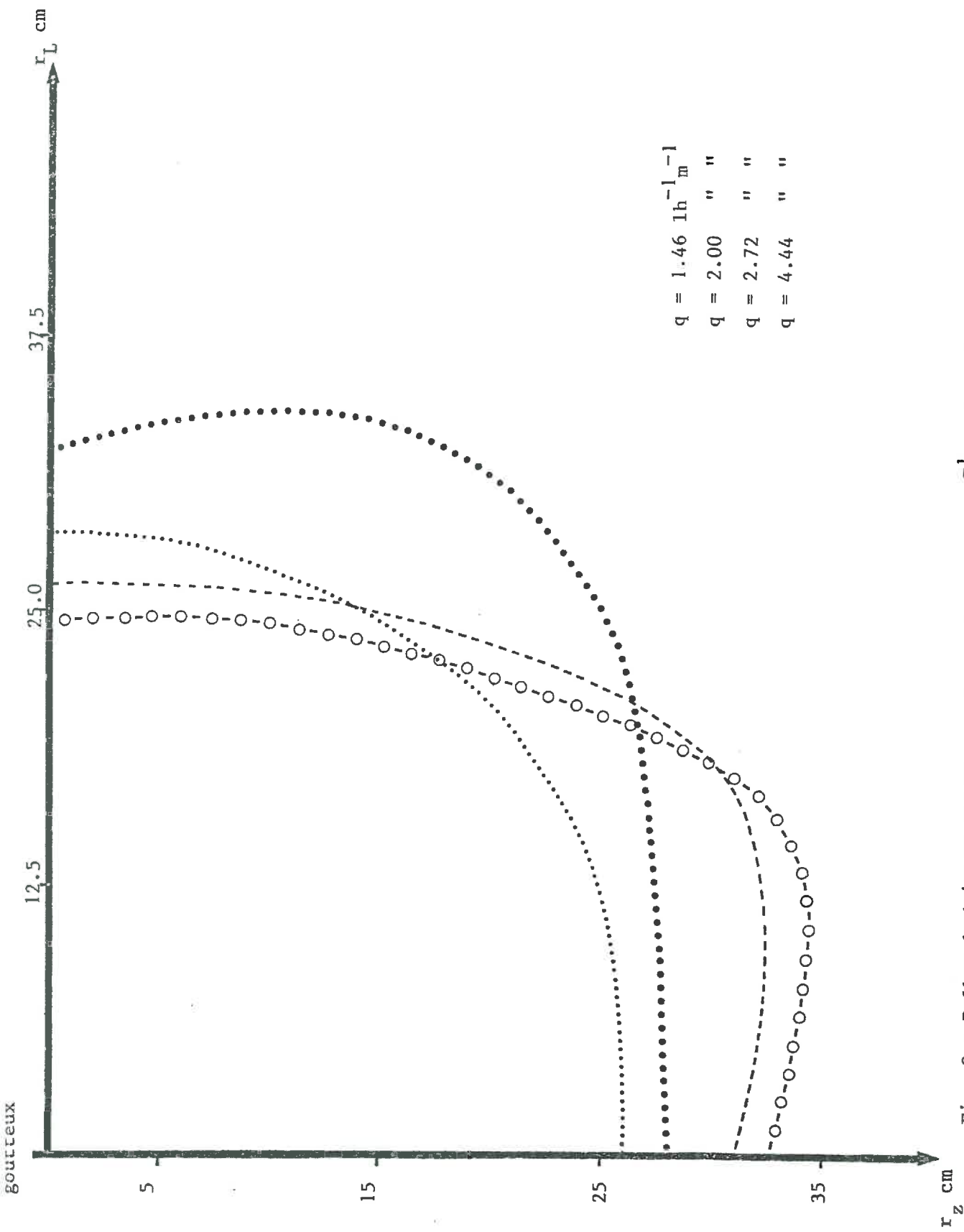


Fig. 9 : Bulbes hydriques obtenus pour une dose de  $14 \text{ l m}^{-1}$  en fonction du débit.

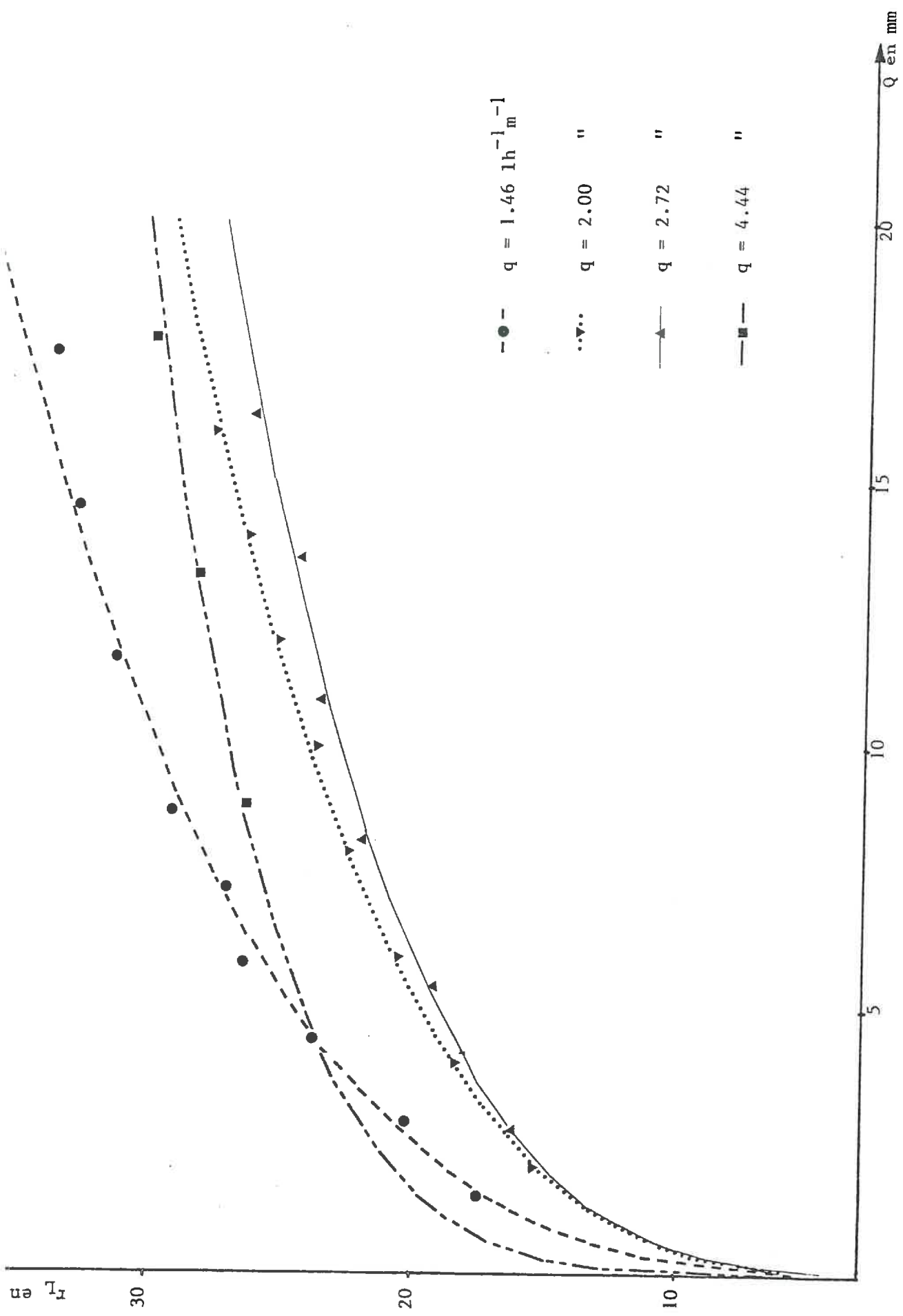


Fig. 10 : Evolution du rayon latéral ( $r_L$  en cm) de la zone mouillée en fonction de la dose d'irrigation  $Q$  en mm

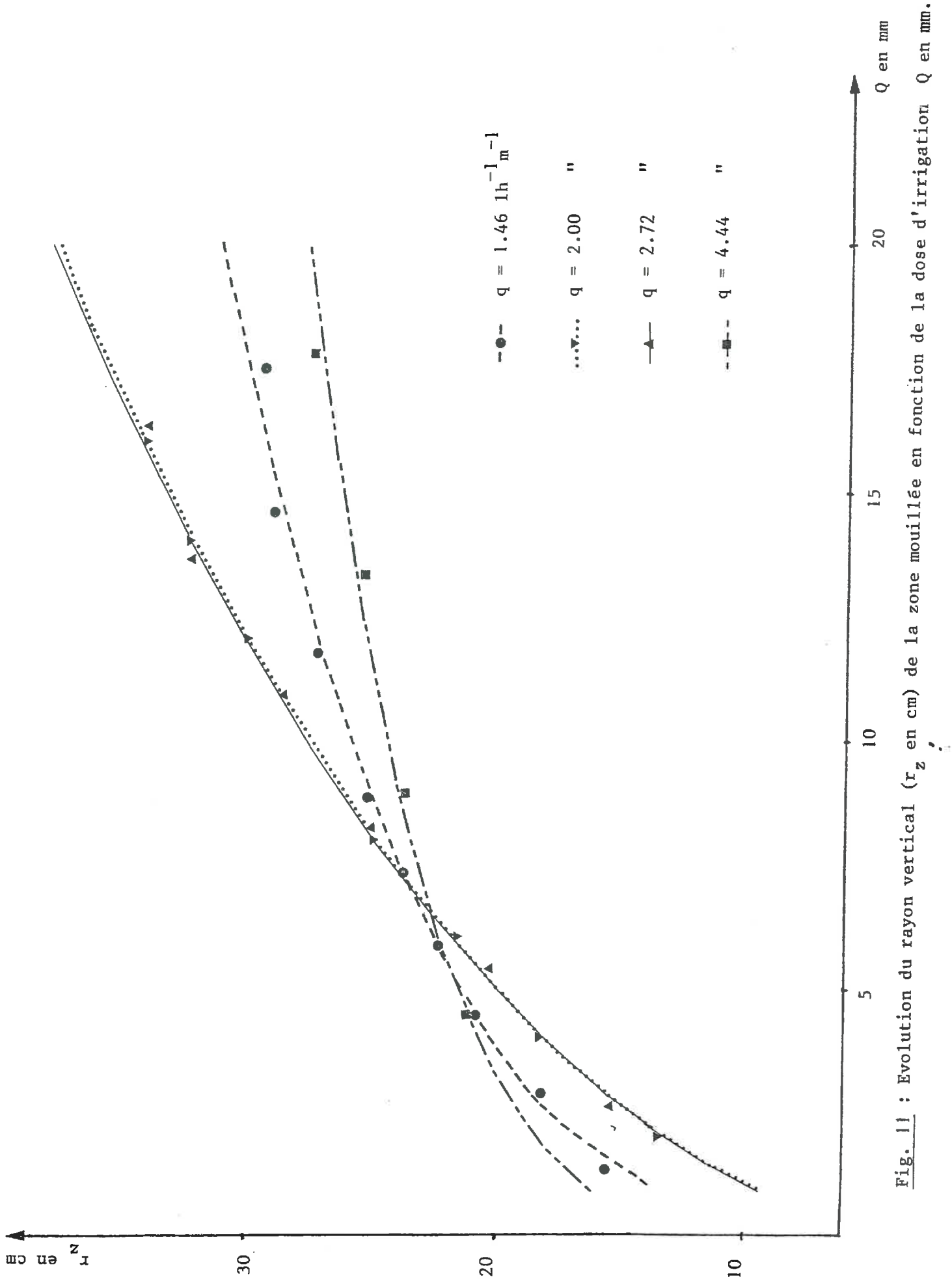


Fig. 11 : Evolution du rayon vertical ( $r_z$  en cm) de la zone mouillée en fonction de la dose d'irrigation  $Q$  en mm.

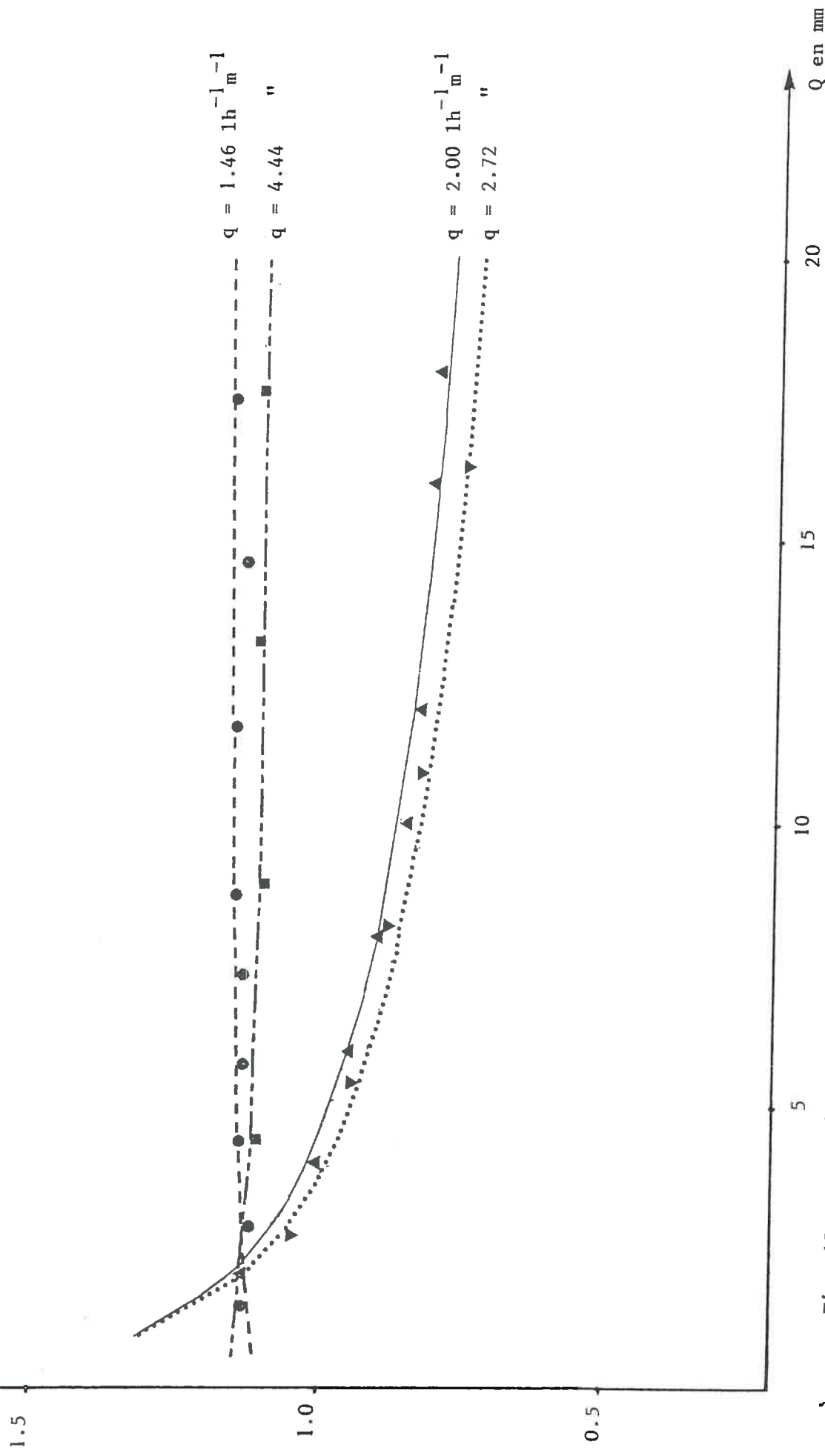


Fig. 12 : Evolution du rapport rayon vertical sur rayon latéral sur rayon vertical en fonction de la dose d'irrigation.

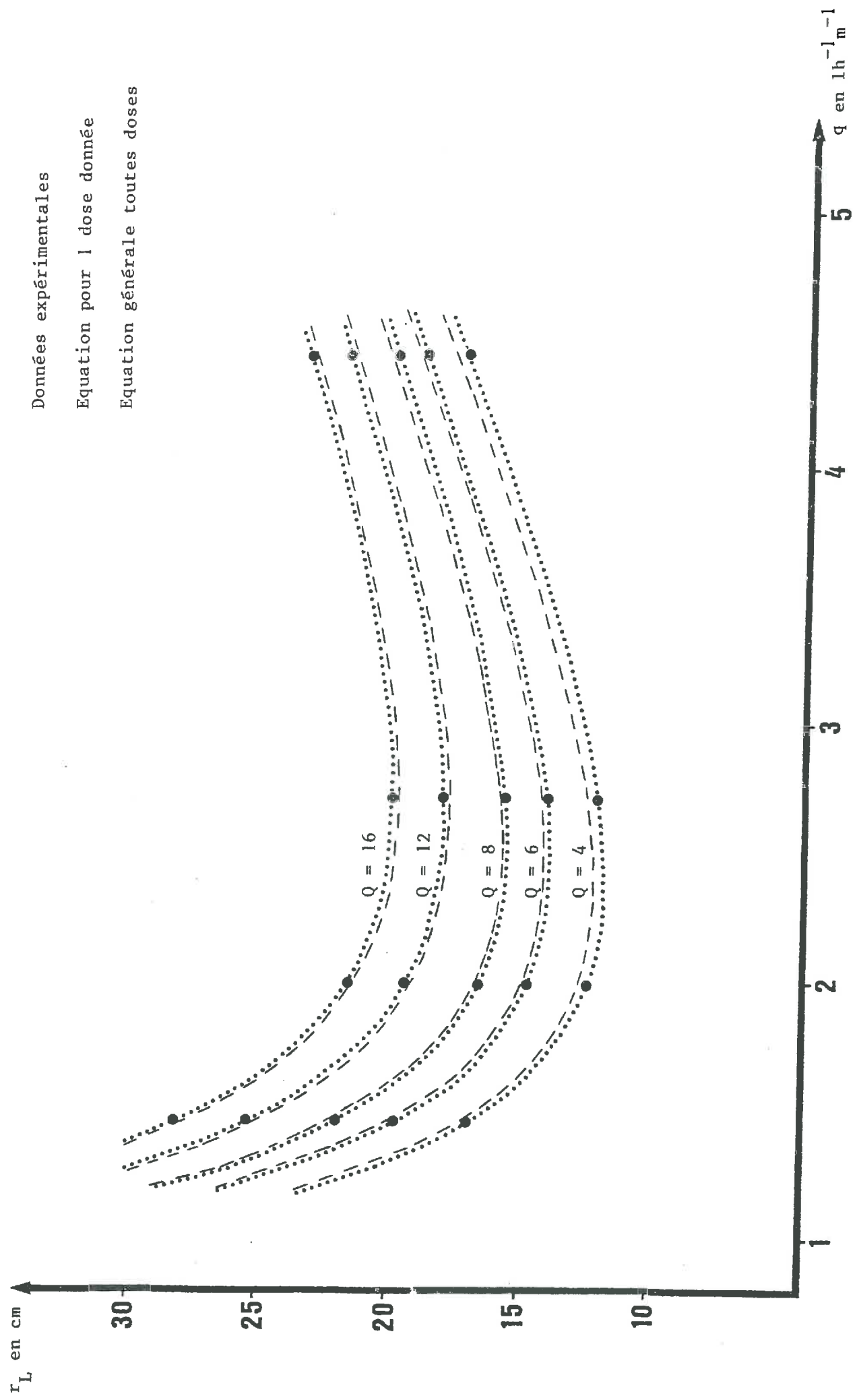


Fig. 13 : Evolution du rayon latéral en fonction du débit et de la dose d'irrigation (en  $l m^{-1}$ ).



Données expérimentales

Equation pour 1 dose donnée

Equation générale toutes doses

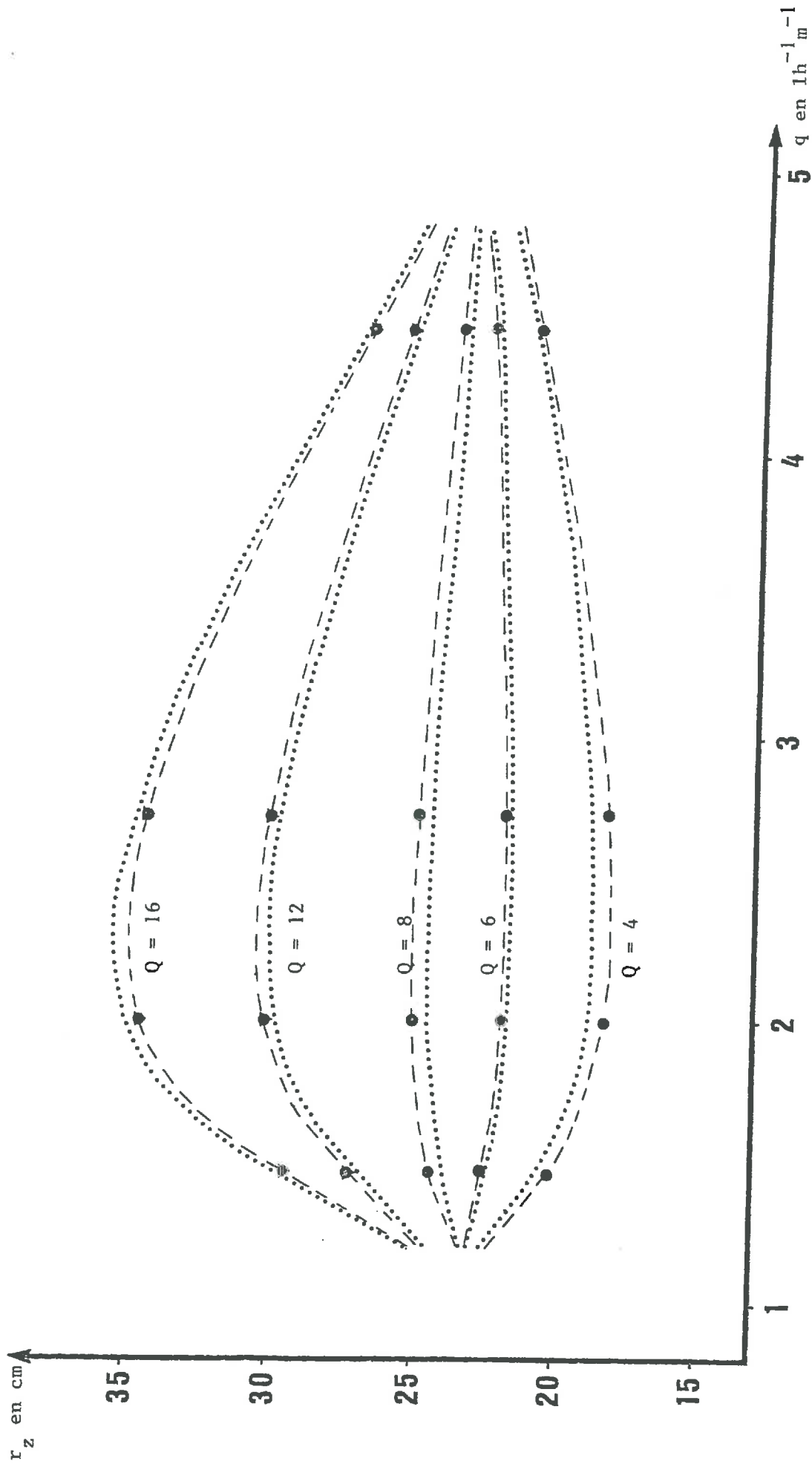


Fig. 14 : Evolution du rayon vertical de la zone mouillée en fonction du débit et de la dose (en  $l m^{-1}$ ).

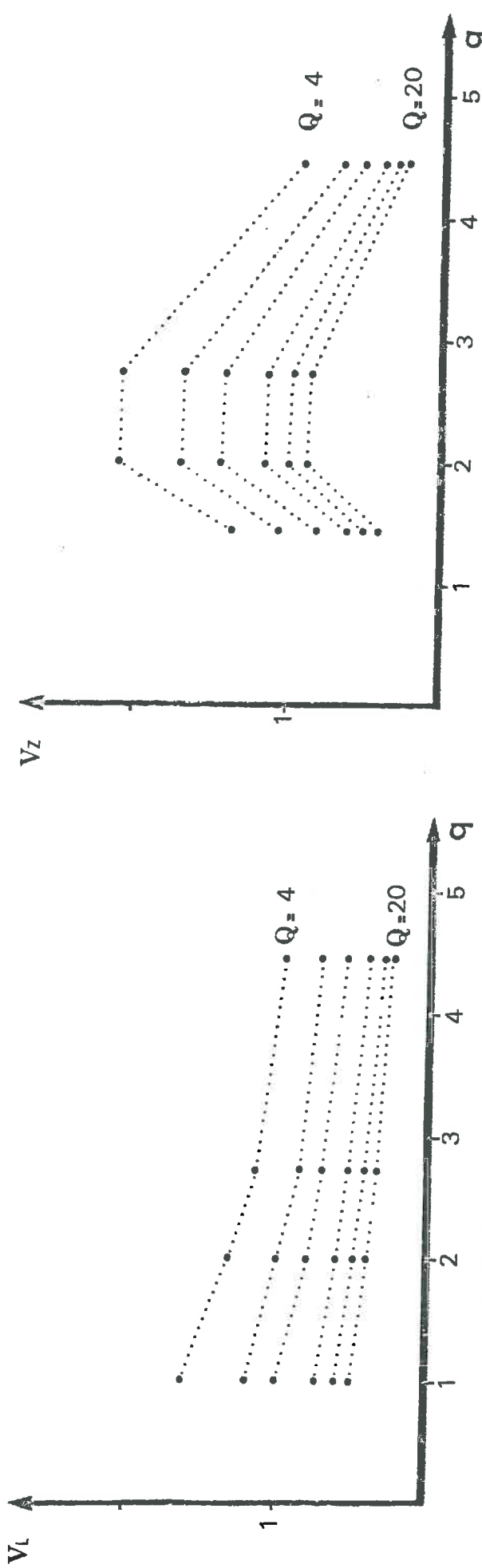
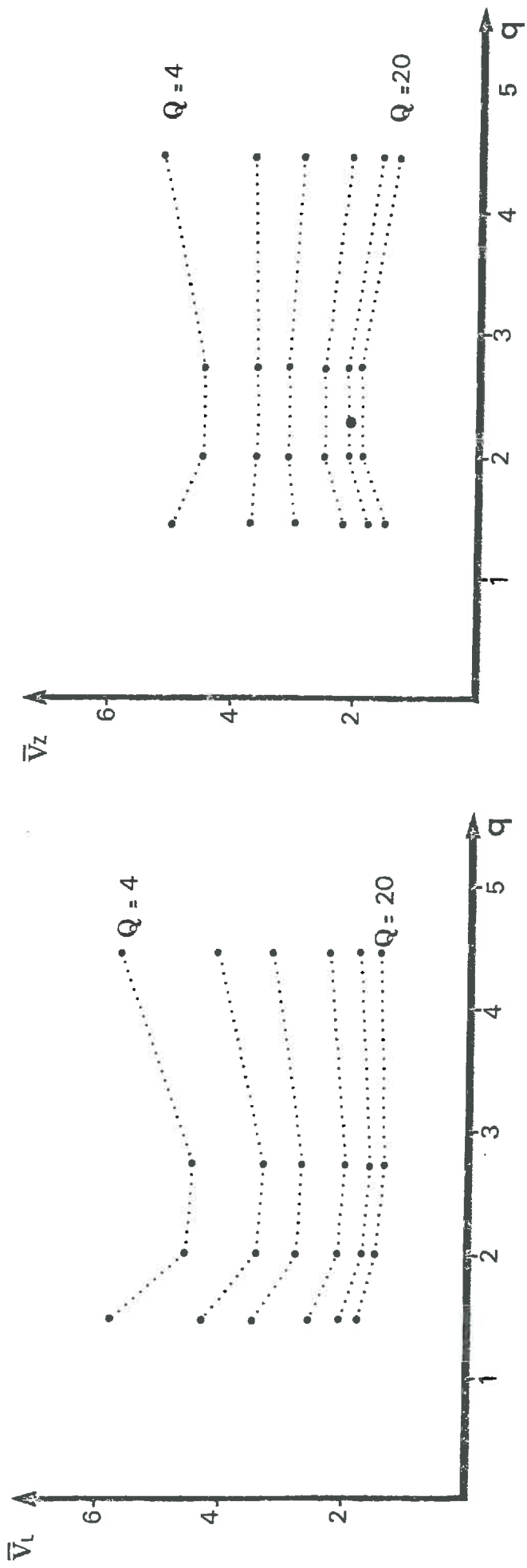


Fig. 15 : Evolution des vitesses d'accroissement des rayons de la zone mouillée en fonction du débit ( $1h^{-1}m^{-1}$ ) et de la dose d'irrigation ( $1m^{-1}$ ).

CHAPITRE II

SIMULATION NUMERIQUE D'UN CYCLE D'IRRIGATION LOCALISEE

R. ABABOU

I.M.G. - Laboratoire de Mécanique  
des Fluides

Université des Sciences de GRENOBLE

## PRESENTATION

On utilise dans cette étude une partie des résultats de l'expérimentation effectuée à l'INRA-Montfavet : ceux-ci sont traités à l'aide d'un modèle mathématique mis au point à l'Institut de Mécanique de Grenoble, pour la simulation de l'irrigation localisée (modèle IRLOC, présenté dans le premier chapitre). Dans le deuxième chapitre, on indique dans quelle mesure les conditions expérimentales et les données utilisées sont compatibles avec le bon fonctionnement du modèle. On compare ensuite dans le troisième chapitre les résultats expérimentaux avec les résultats obtenus par simulation, moyennant le choix d'une méthodologie appropriée (ajustement du modèle, critères de comparaison). Le but est de montrer qu'il est possible de simuler de façon adéquate les transferts d'eau localisés bidimensionnels, en présence d'une extraction racinaire elle-même localisée.

On verra alors que la modélisation permet de décrire avec précision les transferts hydriques (bilans hydriques, visualisation des champs bidimensionnels d'humidité) et de rendre compte également de l'activité des racines (profils d'extraction racinaire). L'évolution de l'ensemble de ces variables au cours d'un cycle d'irrigation localisée est analysée dans le quatrième chapitre de cette étude. On s'appliquera à tirer des conclusions pratiques concernant la conduite de l'irrigation localisée d'une part, et les possibilités de la modélisation mathématique d'autre part. Ce dernier point débouche entre autres sur l'étude de l'influence du débit et de la dose sur la cinétique d'expansion du bulbe d'humectation qui fait l'objet d'un texte annexe.

## I - LE MODELE DE SIMULATION "IRLOC"

### I.a - Equations générales du modèle

Le mouvement de l'eau dans le sol est régi par la loi de DARCY généralisée, applicable au cas d'un milieu non-saturé ou partiellement non saturé :

$$(1) \quad \vec{q} = -K(h). \text{Grad } h$$

Cette équation est utilisée conjointement à l'équation de conservation :

$$(2) \quad \frac{\partial \theta}{\partial t} = -\text{Div } \vec{q} - S$$

avec

- K : conductivité hydraulique non saturée du sol :  $L.T^{-1}$
- h : pression de l'eau dans le sol, exprimée en hauteur d'eau : L
- $\theta$  : humidité volumique du sol :  $L^3.L^{-3}$
- q : flux de l'eau dans le sol :  $L.T^{-1}$
- S : terme puits caractérisant un modèle macroscopique d'extraction racinaire :  $T^{-1}$

Le couplage des équations (1) et (2) mène à l'équation de RICHARDS, dans laquelle la variable inconnue est la pression de l'eau h. L'équation de RICHARDS peut être traitée par la transformation de KIRCHOFF :

$$(3) \quad U(h) = \int_{-\infty}^h K(\xi). d\xi$$

On aboutit alors à l'équation de KIRCHOFF qui s'écrit comme suit dans le cas d'écoulements bidimensionnels, en coordonnées cartésiennes ou cylindriques (notées r, z dans les deux cas) :

$$(4) \quad f(u) \frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + \frac{\epsilon}{r} \frac{\partial U}{\partial r} - g(u) \cdot \frac{\partial U}{\partial z} - S(u)$$

terme  
transitoire

terme  
"diffusif"

terme  
convectif

terme  
puits

avec :

$\varepsilon = 1$  dans le cas d'une source ponctuelle (symétrie axiale)

$\varepsilon = 0$  dans le cas d'une source linéaire (symétrie plane)

$$\begin{aligned}
 U &= \text{transformée de KIRCHHOF} \dots\dots\dots L^2.T^{-1} \\
 f(U) &= \frac{C(h)}{K(h)} \dots\dots\dots L^{-2}.T \\
 g(U) &= \frac{1}{K(h)} \cdot \frac{dK}{dh} \dots\dots\dots L^{-1} \\
 S(U) &= \text{terme puits (cf modèle d'extraction racinaire)} \dots\dots\dots T^{-1}
 \end{aligned}$$

On notera que la fonction non linéaire  $f(U)$  représente l'inverse de la "diffusivité" du sol, laquelle est égale au rapport entre la conductivité hydraulique  $K(h)$  et la capacité capillaire  $C(h) = \frac{d\theta}{dh}$ .

Enfin, la présence d'une source infinitésimale à la surface du sol est prise en compte par une relation intégrale exprimant qu'à tout moment, la somme des flux dans le sol à travers la zone d'infiltration est égale au débit  $Q$  de la source :

$$(5) \quad Q = 2 \int_0^{R_s(t)} q_z \cdot dz \quad (\text{source linéaire})$$

$$(5') \quad Q = 2\pi \int_0^{R_s(t)} q_z \cdot z \cdot dz \quad (\text{source ponctuelle})$$

avec

$Q$  = débit de la source, exprimé généralement en litres par heure pour une source ponctuelle, et en  $l/h$  par mètre linéaire dans le cas d'une source linéaire

$R_s(t)$  = rayon ou demi-largeur de la zone d'infiltration à la surface du sol  
 $q_z$  = flux vertical à la surface du sol

Dans la suite de cette étude, on étudiera uniquement le cas d'une SOURCE LINEAIRE.

### I.b - Méthode de résolution

La simulation des transferts d'eau localisés suppose la résolution de l'équation aux dérivées partielles (4), qui est une équation non-linéaire de type parabolique.

La présence d'une source infinitésimale est prise en compte, durant les phases d'infiltration, par la relation intégrale (5). Dans tous les cas, il est

nécessaire de spécifier les conditions initiales et aux limites appropriées.

Dans l'état actuel des recherches, seul un traitement numérique de l'équation (4) est possible. On a utilisé la méthode des Différences Finies et l'équation (4) est discrétisée selon un schéma implicite A.D.I. (méthode des directions alternées) : cf ABABOU, 1978, et ABABOU, VAUCLIN, VACHAUD, 1979.

Les conditions limites correspondant au cas d'une irrigation localisée par sources linéaires régulièrement espacées sont données en Figure 1. Le domaine de calcul est rectangulaire sur les deux axes de symétrie  $A_0$  et  $A_1$ , on spécifie une condition de flux nul perpendiculairement à ces frontières ; la condition à la frontière "plancher" est à choisir : flux nul (plancher imperméable), ou flux gravitaire (gradient de pression nul), ou pression constante (surface libre d'une nappe, autre cas ...).

Enfin, on distingue à la surface du sol deux zones distinctes :

- la zone d'infiltration, saturée : condition de pression nulle,
- la zone non saturée : condition à choisir selon les données climatiques (on prendra un flux nul si l'évaporation du sol nu est négligeable).

Un algorithme particulier permet de calculer, en phase d'infiltration, la taille de la zone saturée  $R_s(t)$  d'après la relation intégrale (5) valable pour une source linéaire.

#### I.c - Le sous-modèle d'extraction racinaire

On simule l'extraction d'eau par les racines à l'aide d'un modèle macroscopique d'extraction racinaire, caractérisé par le terme puits  $S$  entrant dans l'équation (4). Le modèle proposé ici est une modification du modèle de NIMAH et HANKS (1973) qu'on a adapté au cas d'un système racinaire bidimensionnel tel qu'il est représenté en Figure 1. Dans ce modèle, le terme puits est proportionnel à la densité racinaire, à la conductivité du sol, et à la différence de potentiel entre le système racinaire et le sol :

$$(6) \quad S(h) = C \cdot \frac{P(z)}{V} \cdot K(h) \cdot (h - H_2) \cdot \delta(h_a - h) \cdot \delta(h - H_2)$$

avec :

$S(h)$  : taux d'extraction d'eau par les racines, en  $\text{cm}^3$  d'eau par seconde et par  $\text{cm}^3$  de sol, :  $\text{T}^{-1}$ , nul à l'extérieur du domaine racinaire.

- $C$  : paramètre de calage adimensionnel et sans signification physique
- $P(z)$  : fonction "densité racinaire réduite", variant ici uniquement avec la profondeur, adimensionnelle
- $V$  : volume du domaine exploré par les racines, exprimé en volume de sol par unité de longueur, le domaine racinaire étant linéairement réparti:  $L^2$
- $K(h)$  : conductivité hydraulique non saturée du sol :  $LT^{-1}$
- $H_r$  : "pression racinaire" à l'interface sol-racines, dépendant uniquement du temps :  $L$
- $h_a$  : pression "anaérobie", correspondant à la pression du sol au-dessus de laquelle le terme puits s'annule ;  $L$
- $\mathcal{J}(x)$  : fonction saut, égale à l'unité si  $x$  est positif et nulle si  $x$  est négatif.

Dans ce modèle, le terme puits peut également s'exprimer en fonction de la transformée de KIRCHHOFF  $U(h)$ . Le terme puits  $S(U)$  est donc un terme non linéaire supplémentaire, qui vient s'ajouter aux autres termes non linéaires de l'équation (4).

La "pression racinaire"  $H_r(t)$  doit être considérée comme un paramètre interne au modèle, qui traduit plus ou moins bien l'état énergétique du système racinaire et de la plante\*. Ce paramètre est déterminé à chaque pas de temps à partir de la relation suivante :

$$(7) \quad \frac{1}{S_0} \int_{\mathcal{D}_r} S(R, H_r(t)) dv = T_0 \quad \text{si } H_r(t) \gg H_w$$

avec :

- $S_0$  : superficie dominée par la plante, correspondant ici à la distance entre lignes de culture :  $L$
- $\mathcal{D}_r$  : domaine racinaire
- $dv$  : élément de volume
- $T_0$  : taux de transpiration potentielle, calculé à partir d'une formule du type PENMAN :  $L.T^{-1}$
- $H_w$  : point de flétrissement de la plante, généralement compris entre -10000 cm et -20000 cm :  $L$

---

\* Le modèle de NIMAH et HANKS , 1973, repris par FEDDES et al, 1976, ne permet pas de faire la distinction entre la pression des racines à l'interface sol-racines et la pression foliaire.



La relation intégrale (7) exprime que l'eau extraite par les racines est entièrement transpirée par la plante ; dans le calcul de  $T_0$ , on tiendra compte du fait que la transpiration de la plante s'annule durant la nuit, et on la supposera constante durant la journée. La relation (7) n'est plus valable lorsque la plante atteint le point de flétrissement ; la transpiration effective de la plante devient alors inférieure à la transpiration potentielle et peut être calculée par :

$$(8) \quad T = \frac{1}{S_0} \int_{\mathcal{D}_z} S(h, H_w) dv$$

Ainsi, la résolution numérique de l'équation (4) nécessite l'estimation à chaque pas de temps du paramètre  $H_r(t)$  par une méthode itérative.

Les autres paramètres du modèle d'extraction racinaire doivent être estimés ou mesurés.

- La densité racinaire réduite  $\rho(z)$  peut être connue à partir de mesures de densité racinaires à différentes profondeurs (biomasse, ou longueur spécifique des racines). Si  $f(z)$  représente la densité racinaire mesurée expérimentalement, on en déduit  $\rho(z)$  par :

$$(9) \quad \rho(z) = \frac{1}{V} \int_{\mathcal{D}_z} f(z) dv$$

- La pression "anaérobie"  $h_a$  peut être assimilée dans beaucoup de cas à la pression d'entrée d'air du sol. Néanmoins, il peut être important d'avoir plus de précisions sur ce paramètre lorsque les plantes s'alimentent à partir d'une eau peu chargée en oxygène ou qu'il s'agit d'une espèce sensible quant à l'alimentation des racines oxygène.
- Enfin, l'introduction du paramètre de calage  $C$  traduit l'empirisme du modèle d'extraction racinaire (proposé par FEDDES et al., 1976)

\*

\*

\*

II - APPLICATION A LA SIMULATION D'UN CYCLE  
D'IRRIGATION LOCALISEE LINAIRE

Le dispositif d'irrigation et de mesures hydriques installé sur la Cuve 4 de l'INRA-Montfavet est décrit dans la Partie Expérimentale de ce rapport. Les caractéristiques du dispositif d'irrigation, du sol, et de la culture constituent une partie des données nécessaires au fonctionnement du modèle. Celles-ci sont entièrement explicitées ci-dessous, avant d'être analysées en relation avec les hypothèses de la modélisation mathématique.

Le problème du calage du sous-modèle d'extraction racinaire est ensuite abordé.

II.a - Les données

II.a.1. Caractéristiques hydrodynamiques du sol

Le sol de la Cuve 4 est un loess du lieu-dit COLLIAS (alluvions du GARDON d'origine éolienne). Dans la classification texturale américaine (USDA) il s'agit d'un limon fin, intermédiaire entre loam et silt-loam, qui ne contient que 10% d'argiles. Le sol apparaît essentiellement battant, peu perméable, et à faible porosité. Ses caractéristiques hydrodynamiques ont été mesurées en cuve par la méthode du drainage interne (cf Partie Expérimentale) et sont représentées en Figure 2.

La conductivité hydraulique non saturée  $K(h)$  a pu être représentée par une seule courbe pour la couche de sol 0-50 cm. On s'est contenté de cette approximation pour la simulation, sachant que les couches plus profondes ont été peu affectées par des variations d'humidité durant la période d'irrigation. L'expression analytique suivante a été retenue :

$$(10) \quad \begin{aligned} K(h) &= K_s \cdot \exp[\alpha_o(h-h_c)] && \text{pour } h \leq h_c \\ K(h) &= K_s && \text{pour } h \geq h_c \end{aligned}$$

avec

$$\begin{aligned} \alpha_o &= 0.01283 \text{ cm}^{-1} \\ h_c &= -64.56 \text{ cm} \end{aligned}$$

$$K_s = 0.32 \text{ mm/h} = 7.68 \text{ mm/jour}$$

La valeur de  $\alpha_0$  a été obtenue par régression exponentielle sur les points expérimentaux  $K(h)$ , avec un coefficient de corrélation  $R = 0.975$ . Par contre, la valeur de  $h_c$  est estimée de façon indépendante et représente la hauteur capillaire, ou pression d'entrée d'air, du sol en place.

La relation pression-teneur en eau  $h(\theta)$  est représentée par une courbe unique pour la couche de sol 0-120 cm à l'exception des mesures faites à la cote  $z = 5$  cm dont on n'a pas tenu compte ici\*. Une fonction à trois paramètres a été ajustée au points expérimentaux :

$$(11) \quad \theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + (-\alpha h)^n)^{1-1/n}}$$

avec

$$\begin{aligned} \theta_s &= 0.3060 \text{ cm}^3/\text{cm}^3 \\ \theta_r &= 0.0007 \text{ cm}^3/\text{cm}^3 \\ \alpha &= 0.002274 \text{ cm}^{-1} \\ n &= 2.3092 \end{aligned}$$

La valeur de  $\theta_s$  (humidité saturée) est estimée de façon indépendante d'après l'allure des points expérimentaux, tandis que  $\theta_r$ ,  $\alpha$ ,  $n$  sont des paramètres d'ajustement sans signification physique a priori (pour plus de précision, cf VAN GENUCHTEN, 1980).

### II.a.2. Caractéristiques de l'irrigation et données climatiques

. Les caractéristiques de l'irrigation localisée sont :

- le type de source : linéaire (rampe)
- le débit de la source :  $Q = 1.46$  l/h par mètre linéaire
- l'espacement entre sources :  $D_0 = 1$  m (espacement latéral)
- la durée de l'infiltration :  $T_{inf} = 12$  heures
- la durée du cycle d'irrigation :  $T_{cycle} = 150$  h = 6.25 jours.

On en déduit d'autres données utiles :

- la superficie dominée par une unité de longueur de rampe :  $S_0 = 1 \text{ m}^2/\text{m}$
- la dose d'irrigation :  $d = \frac{Q \cdot T_{inf}}{S_0} = 17.5$  mm

---

\* L'interprétation des comptages neutroniques à cette cote nécessite en effet un étalonnage particulier de la sonde à neutrons qui n'a pas été fait. On verra plus loin comment interpréter les mesures faites à cette cote.

. Les données climatiques disponibles se réduisent à l'évolution journalière d'une évapotranspiration potentielle selon la formule de BROCHER-GERBIER, dont les paramètres sont mesurés à une cinquantaine de mètres du site expérimental.\* La formule utilisée est la suivante :

$$(12) \quad ETP = \alpha \cdot R_G + 0.40 \cdot E_{\text{piche}}$$

avec  $R_G$  = rayonnement global

$E_{\text{piche}}$  = évaporation journalière donnée par l'évaporimètre PICHE

Le tableau I donne l'ETP jour par jour ainsi que le planning des mesures neutroniques durant le cycle d'irrigation.

### II.a.3. Données relatives à la culture

Concernant le maïs adulte cultivé sur la Cuve 4 (cf Partie expérimentale) on ne dispose que d'indications qualitatives.

Le système racinaire des lignes de cultures observé sur d'autres cuves expérimentales d'irrigation localisée ne semble pas s'étendre notablement au-delà de 35 cm en profondeur et de 35 cm latéralement à une ligne de culture. Aucune trace de racines n'a été observée au-delà de 65 cm de profondeur. Il s'agit donc de systèmes racinaires localisés, dont on connaît la taille approximative, mais pour lesquels on ne dispose pas de mesures de densité racinaire.

Enfin, le taux de couverture du sol par les parties aériennes de la culture est important, probablement de l'ordre de 0.90 à 1.00. En l'absence de mesures précises d'indice foliaire, on adoptera le coefficient 0.90 pour la partition de l'ETP entre l'Evaporation directe du sol nu ( $E_o$ ) et la Transpiration proprement dite ( $T_o$ ) :

$$E_o = 0.10 \text{ ETP}$$

$$T_o = 0.90 \text{ ETP}$$

### II.a.4. Conditions initiale et aux limites

La condition initiale est connue grâce aux mesures neutroniques effectuées avant le début de l'irrigation ( $t = 0 \text{ H}$ ) sur les trois verticales de mesures (Figure 3.a) . Ces verticales de mesures étant espacées de 25 cm, il est

---

\* Le site expérimental est recouvert d'un tunnel ouvert aux deux extrémités (distances de 3 m).

TABLEAU I

## PLANNING DES MESURES ET DONNEES CLIMATIQUES POUR LA CUVE 4

DATE	25.9.79	26.9.79	27.9.79	28.9.79	29.9.79	30.9.79	1.10.79
ETP mm/j	5.6	3.2	2.9	2.8	2.5	2.7	2.8
Horaire des mesures	08 H    20 H	--	08 H	14 H	--	--	14 H
Temps t depuis le début de l'irrigation	t=0H    t=12H	--	t = 48H	t = 78H	--	--	t = 150H
Commentaires	Début    Fin infil-    Infil- tration    tration	--	--	--	--	--	Fin du cycle d'irri- gation

nécessaire d'utiliser l'interpolation pour calculer l'état hydrique initial en tout point du domaine de calcul (Figure 3.b).

On a été amené à réduire la taille du domaine de calcul par rapport aux dimensions de la cuve. En effet, celle-ci a une profondeur de 180 cm alors que les transferts n'ont intéressé qu'une couche superficielle de sol : c'est pourquoi on a limité la profondeur du domaine de calcul à  $z = 70$  cm.

La condition limite à cette cote est recherchée empiriquement d'après les variations d'humidité observées durant le cycle d'irrigation, et d'après un test préliminaire du modèle. On a ainsi adopté une condition de teneur en eau constante  $\theta = 0.248 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  à la cote  $z = 70$  cm.

Pour les autres frontières du domaine de calcul, aucune donnée supplémentaire n'est requise (voir la présentation générale du modèle IRLOC).

## II.b - Critique du dispositif expérimental et des données

L'utilisation du modèle mathématique implique le respect de certaines hypothèses d'homogénéité et de symétrie ; elle suppose aussi la fiabilité des données introduites dans le modèle et des mesures utilisées comme critère de comparaison entre simulation et réalité. Les caractéristiques du dispositif expérimental et la méthode de mesure font que ces contraintes ne sont pas entièrement respectées.

### II.b.1. Hypothèses d'homogénéité et de symétrie

- Un décalage de 5 cm entre la rampe d'irrigation et la ligne de culture n'a pu être évité (entraînant peut être une croissance excentrée du système racinaire).

- L'homogénéité de l'apport d'eau le long de la rampe est probablement imparfaite durant les premiers stades de l'infiltration (il y a huit orifices par mètre de rampe). L'homogénéité du système racinaire de la culture suivant l'axe de la rampe semble assurée (quatre plants de maïs par mètre).

- Les hétérogénéités du sol de la cuve ne sont pas prises en compte par le modèle. L'existence de ces hétérogénéités est confirmée par la relative dispersion des points expérimentaux  $K(h)$  de la Figure 2.a pourtant relative à une tranche de 50 cm de sol seulement. Voir aussi l'état initial du sol (Figures 3.a et 3.b).

### II.b.2. Mesures neutroniques

Les mesures neutroniques d'humidité sont entachées d'une incertitude inhérente à la méthode même de mesure. En particulier, le problème de l'étalonnage de la sonde pour les mesures de surface ( $z = 0$  à  $10$  cm) se pose ici avec toute son acuité, vu la localisation très superficielle des transferts d'eau, tant pour l'infiltration que pour le dessèchement.

En l'occurrence, aucun étalonnage particulier n'a été effectué pour les mesures faites à la cote  $z = 5$  cm : on a dû utiliser la courbe d'étalonnage obtenue à la cote  $z = 15$  cm, puis corriger systématiquement les valeurs d'humidité ainsi obtenues en utilisant les résultats tensiométriques, dans l'hypothèse d'un sol non stratifié.

Le problème de l'étalonnage en surface est dû au rayon d'influence de la sonde à neutrons, qui est supérieur à dix centimètres.

Pour cette raison, il est difficile d'interpréter les mesures d'humidité non seulement près de la surface, mais aussi dans la masse du sol partout où les gradients d'humidité sont importants (front d'humectation, dessiccation ...). L'interprétation est encore plus difficile dans le cas de transferts localisés.

Enfin, l'analyse des résultats de mesures montre que les teneurs en eau sont affectées de fluctuations de l'ordre de  $\pm 0.005 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , probablement dues aux fluctuations des réponses des appareils électroniques (effets de température, etc...).

### II.b.3. Données non accessibles à la mesure

Les données relatives au système racinaire n'ont pu être mesurées sur le site expérimental, puisque le dispositif de mesure est essentiellement non destructif (cf Partie Expérimentale). Cependant, on a pu évaluer approximativement les dimensions du domaine racinaire pour d'autres sites soumis à une irrigation localisée.

En définitive, seule la densité racinaire reste totalement inconnue : on n'a pu tourner cette difficulté qu'en procédant à un ajustement du modèle d'extraction racinaire d'après les résultats expérimentaux.

Enfin, les caractéristiques hydrodynamiques du sol, et notamment la conductivité, n'ont été mesurées que pour des pressions inférieures en valeur

absolue à 500-600 cm : au-delà de ce seuil, elles sont simplement extrapolées par les formules analytiques ajustées.

\*

\* \*



### III - COMPARAISON DES RESULTATS DE SIMULATION AVEC LES MESURES EXPERIMENTALES

#### III.a - Méthodologie

L'interprétation des mesures neutroniques s'avère difficile du fait de l'espacement trop grand des verticales de mesure (25 cm) : il est difficile, sinon impossible, d'obtenir une représentation bidimensionnelle de l'état d'humidité du sol. De plus, nous avons constaté qu'il était impossible d'établir un bilan hydrique entre le début et la fin de l'infiltration.

Nous avons alors retenu deux critères de comparaison :

- le profil hydrique  $\theta(z)$  à un temps donné pour une verticale de mesure donnée (en particulier l'axe de symétrie  $r = 0$ )
- l'évolution de l'humidité  $\theta(t)$  en certains points du sol correspondant aux cotes de mesure.

Les résultats expérimentaux peuvent ainsi être comparés aux résultats de la simulation grâce aux faibles pas de temps et d'espace utilisés dans le modèle :

Pas d'espace :  $\Delta r = \Delta z = 2.5 \text{ cm}$

Pas de temps (variable) :  $\Delta t_{\min} = 10 \text{ sec}$

$\Delta t_{\max} = 30 \text{ min}$

Enfin, les résultats de simulation peuvent être visualisés dans l'espace bidimensionnel sous forme d'isohyètes : on reportera sur les mêmes graphiques les résultats des mesures, à titre indicatif.

Il reste que la mise en oeuvre du modèle mathématique nécessite la détermination préalable des données manquantes ou incertaines. C'est ainsi que des test préliminaires ont permis de fixer la condition limite "plancher" ( $z = 70 \text{ cm}$ ), de vérifier les hypothèses faites concernant l'évaporation directe du sol nu, et surtout de déterminer les paramètres inconnus du sous-modèle d'extraction racinaire comme indiqué ci-dessous.

### III.b - Calage du sous-modèle d'extraction racinaire

On a procédé à plusieurs simulations afin de déterminer les paramètres inconnus entrant dans l'expression du terme puits du modèle d'extraction racinaire, qui sont :

- Le paramètre de calage  $C$ , adimensionnel, sans signification physique a priori
- La fonction "densité racinaire réduite"  $P(z)$ , adimensionnelle, supposée varier uniquement avec la profondeur (donnée non disponible).

Ne disposant pas de mesures de densité racinaire sur le site, mesures qui auraient permis de calculer  $P(z)$  par la relation (9) - on a été amené à rechercher la fonction  $P(z)$  qui minimise les écarts entre les résultats de simulation et les résultats expérimentaux, et on a procédé de même pour le paramètre de calage  $C$ .

Le domaine racinaire - vu en coupe - est assimilé à un rectangle de profondeur 25 cm et d'extension latérale 30 cm perpendiculairement à la ligne de culture. La fonction  $P(z)$  est assimilée à une exponentielle : par ajustement au modèle : cf. Figure 4.

$$(13) \quad P(z) = P_0 \cdot \exp(-a_0 z)$$

avec :

$$P_0 = \frac{z_2 - z_1}{\int_{z_1}^{z_2} \exp(-a_0 z) dz}$$

$z_1$  : profondeur minimum des racines (proche de zéro, en général)

$z_2$  : profondeur maximum des racines

$a_0$  : taux de décroissance de la densité racinaire, obtenu ici par calage du modèle ( $\text{cm}^{-1}$ )

Le calage du modèle d'extraction racinaire aboutit aux valeurs numériques suivantes :

- taux de décroissance de la densité racinaire en fonction de la profondeur :  $a_0 = 0.40 \text{ cm}^{-1}$
- paramètre adimensionnel de calage :  $C = 7.5$

Il apparaît que le taux  $a_0$  est environ cinq fois supérieur aux plus fortes valeurs mesurées pour des plantes (céréales ou graminées à enracinement de

l'ordre d'un mètre de profondeur) irriguées selon une technique classique ou non irriguées.\*

Ceci n'est pas surprenant, s'agissant ici d'une culture traitée par l'irrigation localisée et ayant un système racinaire peu profond. Ainsi, GOLDBERG et al. (1976) ont observé que 70% de la biomasse racinaire se trouve concentrée entre la cote  $z = 3$  cm et la cote  $z = 10$  cm, pour des giroflées irriguées en goutte-à-goutte sous serre (sable limoneux, profondeur des racines : 30 à 40 cm).

Ce résultat est proche de celui que nous trouvons par ajustement du modèle : cf Figure 4.

### III.c - Comparaisons - Validité du modèle de simulation

#### III.c.1. Comparaison des profils hydriques (z)

On a retenu comme critère de comparaison uniquement les profils hydriques obtenus au droit de la rampe, sur l'axe de symétrie  $r = 0$  cm. On a ainsi voulu éviter les difficultés inhérentes à l'interprétation de mesures non ponctuelles d'humidité en dehors des axes de symétries.

Les profils expérimentaux et simulés  $\theta(z)$  sont comparés, Figure 5, respectivement aux temps :  $t = 12$  H,  $t = 48$  H et  $t = 150$  H, au profil hydrique initial.

- Le profil obtenu par simulation en fin d'infiltration ( $t = 12$  H) est proche du profil expérimental, si l'on tient compte de la tendance de la sonde à neutrons à "lisser" les fronts d'humectation - phénomène maintes fois observé en infiltration unidimensionnelle.
- Le profil obtenu au temps intermédiaire  $t = 48$  H est encore plus satisfaisant. Notons que ce profil montre une dessiccation superficielle déjà assez marquée. On verra plus loin qu'il correspond à un début de limitation de la consommation d'eau par les plantes.
- Le profil obtenu en fin de cycle ( $t = 150$  H) est également très proche du profil expérimental.

Dans ces deux derniers cas, il est certain que l'incertitude due au rayon d'influence de la sonde est moindre qu'en phase d'infiltration, compte tenu de la disparition du front d'humectation.

---

\* Références : Rapter et Barber, 1979, Mahberibi 1980.

### III.c.2. Comparaison des évolutions $\theta(t)$

On compare l'évolution de l'humidité  $\theta(t)$  en plusieurs points du sol définis par leurs coordonnées  $(R, Z)$  :

- Trois points situés sur l'axe vertical  $R = 0$ , qui est un axe de symétrie :

Figure 6

Point  $Z = 5$  cm  
 Point  $Z = 15$  cm  
 Point  $Z = 25$  cm

- Trois points situés sur l'axe vertical  $R = 25$  cm :

Figure 7

Point  $Z = 5$  cm  
 Point  $Z = 15$  cm  
 Point  $Z = 25$  cm

Dans l'ensemble, on note un bon accord entre les mesures hydriques et la simulation sur l'axe de symétrie durant les phases de dessiccation.

Durant les phases d'humectation, le rayon d'influence de la sonde a pour conséquence d'estomper la pente de la courbe  $\theta(t)$ .

En dehors de l'axe de symétrie, l'interprétation des résultats de mesure neutronique est plus délicate. En effet, pour la verticale  $R = 25$  cm, la sphère d'influence de la sonde peut intégrer des humidités différentes dans toutes les directions, ce qui pourrait expliquer le mauvais accord entre simulation et mesures. Cependant, les différences s'estompent au fur et à mesure de la dessiccation.

En définitive, on peut conclure à un accord acceptable entre simulation et mesures neutroniques, compte tenu de la localisation médiocre de ces dernières. On notera tout particulièrement la fidélité de la simulation pour  $(R = 0, Z = 5)$ , où une réhumectation temporaire est observée au cours de la seconde nuit du cycle.

### III.c.3. Représentation bidimensionnelle de l'état hydrique simulé du sol et comparaison avec les mesures

On a mentionné plus haut qu'il était difficile de représenter les mesures hydriques sous la forme de champs bidimensionnels d'humidité (isohyètes) ; cette difficulté est due au trop grand espacement entre les verticales de mesures qui est du même ordre de grandeur que le rayon du bulbe d'humectation, soit environ vingt-cinq centimètres.

L'intérêt du modèle de simulation est de permettre justement une telle représentation. C'est pourquoi on a reporté, dans un plan (r,z), d'une part les isohyètes simulées et d'autre part les valeurs ponctuelles d'humidité obtenues expérimentalement à t = 12 H et t = 150 H (Figure 8).

L'écart entre simulation et mesures ne semble pas dépasser  $\pm 0.005 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , mis à part les points situés à proximité du front d'humectation. Il semble néanmoins que le bulbe d'humectation soit plus étendu latéralement que ne le montre la simulation. Ceci pourrait être dû autant à une asymétrie du dispositif expérimental (décalage source - tube de sonde), qu'à l'existence d'une stratification superficielle non prise en compte par le modèle \*.

\*

\*

\*

---

\* On rappelle qu'il s'agit d'un sol battant, très sec en surface avant l'irrigation : or l'extension latérale du bulbe dépend largement de la conductivité superficielle du sol.

#### IV - ANALYSE DES TRANSFERTS HYDRIQUES A L'AIDE DE LA SIMULATION

Une fois vérifiée la bonne concordance entre la simulation numérique et les résultats expérimentaux, il paraît intéressant d'utiliser le modèle de simulation pour une étude exhaustive des transferts hydriques en irrigation localisée. On s'attachera d'une part à étudier l'évolution de l'état hydrique du sol au cours du cycle d'irrigation (champs d'isohyètes), et d'autre part à caractériser les transferts à l'aide de quelques variables (éléments du bilan hydrique). L'activité du système racinaire, ainsi que son potentiel hydrique est particulièrement mis en évidence (taux d'extraction racinaire, pression racinaire).

##### IV.a - Visualisation des champs d'isohyètes - Interprétation

On représente en Figure 9 les champs isohyètes pour les temps  $t = 0$  H, 12 H, 24 H, 36 H, 48 H, 75 H et 150 H ... après le début de l'infiltration. Ces graphiques mettent en évidence le fait que l'irrigation n'a concerné qu'un volume réduit de sol, malgré un apport d'eau assez important (la dose est de 17,5 mm, soit encore 17.5 litres par mètre linéaire de rampe) : en effet, on ne note aucune variation d'humidité à plus de 50 cm de profondeur et à plus de 30 cm de l'axe de symétrie, pour l'ensemble du cycle d'irrigation\*:

Ainsi, à la fin de l'irrigation proprement dite ( $t = 12$  H), seule la moitié de la superficie du champ a été humectée et le bulbe humide n'a pas pénétré au-delà de 25 cm de profondeur.

A notre sens, ce phénomène peut être interprété de la façon suivante :

Le sol étant très sec jusqu'à au moins 15 cm de profondeur, sa conductivité est très faible (de l'ordre de  $10^{-4}$  cm/h pour  $\theta = 0.20$  cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>) ; en conséquence l'évolution du bulbe est inhibée : celui-ci ne s'étend que si tous les pores du sol sont remplis d'eau, même les plus fins.

Cette analyse semble confirmée par le fait que le bulbe est quasi-saturé dans sa totalité, et que le front d'humectation est très raide dans toutes les directions (cf Figure 9 pour  $t = 12$  H).

---

\* Les comptages neutroniques effectués à 50 cm de l'axe de symétrie, à mi-distance entre rampes, ne varient pas durant le cycle d'irrigation.

Enfin, on remarquera que la forme circulaire du bulbe d'humectation indique la prédominance des forces d'adsorption sur les forces gravitaires, caractéristique d'un sol à texture fine\*.

Après la fin de l'irrigation proprement dite, la redistribution de l'humidité s'effectue très lentement : voir par exemple la redistribution nocturne, sans extraction racinaire, entre  $t = 12$  H et  $t = 24$  H. Par la suite, l'action combinée de l'extraction racinaire et de la faible conductivité du sol fait qu'il n'apparaît pas d'écoulements gravitaires. Le rôle de l'extraction racinaire est nettement mis en évidence durant la seconde journée du cycle ( $t = 24$  H à  $t = 36$  H) : l'humidité du bulbe diminue en même temps que les isohyètes se referment sur elles-mêmes. L'humidité maximum obtenue au temps  $t = 36$  H correspond à 75% de la saturation, sur l'axe de symétrie à  $z = 20$  cm.

L'état final du sol ( $t = 150$  H) semble similaire à l'état initial ( $t = 0$  H) bien qu'en fait le stock d'eau dans le sol soit plus élevé, comme le confirme l'analyse du bilan hydrique.

#### IV.b - Bilan des transferts hydriques au sein du système sol-plante-atmosphère et interprétation

Le bilan hydrique du sol cultivé peut être calculé à partir des variables suivantes, toutes définies à un temps  $t$  donné après le début de l'irrigation :

- l'évaporation effective cumulée :  $\sum ETR(t)$  en mm
- la quantité d'eau apportée en surface par irrigation :  $I_0(t)$  en mm
- la quantité d'eau entrée ou sortie à la cote  $z = 70$  cm, par remontée capillaire (positive) ou par percolation (négative) :  $I_{70}(t)$  en mm

On définit alors  $\Delta S(t)$  comme la variation du stock d'eau entre l'instant initial et l'instant  $t$ , pour le volume de sol s'étendant latéralement jusqu'à la mi-distance entre rampes, et en profondeur jusqu'à la cote  $z = 70$  cm. Le bilan hydrique est alors déterminé par la relation :

---

\* La forme du bulbe peut également dépendre du débit. On montre dans l'étude annexe qu'un flaquage en surface peut survenir pour des débits plus importants.



$$(14) \quad \Delta S(t) = I_o(t) + I_{70}(t) - \sum ETR(t)$$

Variation de  
stock hydrique  
relativement  
au stock initial

Apports de  
surface par  
irrigation  
(positif)

Apports  
(positifs)  
ou pertes  
(négatifs)  
à la cote  
 $z = 70 \text{ cm}$

Evapotranspiration  
effective cumulée

L'évolution des différents termes du bilan hydrique est reportée en Figure 10, ainsi que l'évaporation potentielle cumulée  $\sum ETR_o$  (à comparer avec l'évapotranspiration effective cumulée  $\sum ETR$ ).

On voit sur la Figure 10, qu'il apparaît une limitation appréciable de l'évapotranspiration au cours de la troisième journée du cycle d'irrigation. Pour l'ensemble du cycle, la consommation des plantes ne dépasse pas 60% de la valeur potentielle théoriquement permise par les conditions climatiques.\* En fin de cycle, le taux d'évapotranspiration n'est plus qu'à 15% de sa valeur potentielle, soit environ 0.5 mm/j, et compense alors tout juste les remontées capillaires : ceci explique que le stock d'eau dans le sol ne décroît presque plus.

Il est difficile d'expliquer les remontées capillaires obtenues à la limite inférieure du domaine de calcul, la condition limite à cette frontière n'étant qu'une approximation de la réalité (teneur en eau constante  $0.248 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ). Cependant, les résultats expérimentaux confirment que le stock d'eau en fin de cycle est plus élevé que le stock initial et donnent la même valeur que la simulation :  $\Delta S = + 8 \text{ mm}$ .

En définitive, on peut seulement affirmer qu'il n'y a pas de pertes par percolation. S'il y a eu des remontées capillaires, elles peuvent être dues à un changement de régime au bas de la cuve, aux fluctuations des conditions climatiques, et donc à la non reproductibilité des cycles d'irrigation successifs.

Le comportement de la plante est mis en évidence dans la Figure 11, où l'on fait la relation entre les paramètres suivants :

- Rapport entre les taux d'évapotranspiration effectif et potentiel :  $\frac{ETR(t)}{ETR_o(t)}$
- Taux d'extraction racinaire maximum dans le domaine racinaire :  $S_{max}(t) \text{ en } \text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ .

---

\* A supposer bien sûr que la formule utilisée pour calculer l'évapotranspiration potentielle soit réaliste. On néglige l'évaporation directe du sol nu dans l'interprétation des résultats (important couvert végétal).



- Pression racinaire à l'interface sol-racines :  $H_r(t)$  en cm.

Plus précisément, la Figure 12 met en relief la relation entre le profil d'extraction racinaire  $S(z)$  et le profil hydrique  $\theta(z)$  sur l'axe de symétrie  $r = 0$ . La faible profondeur des racines actives (une vingtaine de centimètres) est compensée par une très importante densité racinaire en surface\*. Pour cette raison, la cote d'activité maximum des racines reste inférieure à 10 cm, même en situation de stress hydrique.

\*

\*

\*

---

\* Le profil de densité racinaire est drainé en Figure 4. On notera que l'extraction racinaire s'annule dans la partie saturée du sol, quelle que soit la densité racinaire (voir  $S(z)$  à  $t = 12$  H).

## DISCUSSION ET CONCLUSION

A l'issue de cette étude, on pense pouvoir dégager les caractéristiques essentielles de l'irrigation localisée conduite à l'INRA-Montfavet sur culture de maïs, grâce à sa simulation par le modèle "IRLOC". La modélisation mathématique est apparue en effet comme un outil d'analyse des transferts hydriques permettant de combler les lacunes des mesures neutroniques, et d'extrapoler certains résultats non directement accessibles à la mesure (comme l'extraction racinaire). On verra également, dans une étude annexe, que le modèle permet d'expérimenter artificiellement diverses modalités d'irrigation.

Si la simulation permet de suppléer aux insuffisances des mesures hydriques, elle reste néanmoins tributaire de celles-ci pour trois raisons :

- La première est que le sous-modèle d'extraction racinaire, qui est en partie empirique, doit être ajusté en fonction des résultats expérimentaux (mesures hydriques).
- La seconde est que le fonctionnement du modèle nécessite la connaissance de l'état hydrique initial du sol, ainsi que les conditions d'écoulement à une cote donnée durant l'ensemble du cycle d'irrigation (cette cote devant être supérieure à la profondeur maximum des racines).
- La troisième est liée à la méthode de mesure des caractéristiques hydrodynamiques non saturées du sol,  $K(h)$  et  $h(\theta)$ , dont les incertitudes se répercutent automatiquement sur la simulation.

Les deux premiers arguments invoqués suffisent à montrer qu'on ne peut ignorer les erreurs qui affectent les mesures neutroniques, puisqu'elles se répercutent indirectement sur les résultats de simulation :

- Le rayon d'influence de la sonde à neutrons (10 à 15 cm) a pour effet d'estomper les gradients d'humidité. Les teneurs en eau mesurées résultent de l'intégration dans l'espace de l'humidité du sol autour du point de mesure.
- Le maillage horizontal des mesures (25 cm) est en l'occurrence trop peu dense, étant donné la taille réduite du volume de sol intéressé par les transferts. Il en est de même du maillage vertical (10 cm) pour la couche superficielle du sol.

- Les comptages neutroniques semblent être affectés d'une fluctuation aléatoire correspondant à  $\pm 0.005 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  d'humidité.

Malgré les limites de cette démarche, on a pu mettre en évidence de façon relativement fiable certaines caractéristiques des transferts durant le cycle d'irrigation localisée :

- Extrême localisation des transferts durant l'ensemble du cycle d'irrigation, et notamment taille réduite du bulbe d'humectation dont le volume est de l'ordre de  $0.10 \text{ m}^3$  par mètre linéaire de rampe.
- Extrême localisation du système racinaire, ou du moins de sa partie active : le volume intéressé par l'extraction racinaire est de l'ordre de  $0.10$  à  $0.15 \text{ m}^3$  par mètre linéaire.  
La densité du système racinaire est très forte en surface ; le taux de décroissance de la densité racinaire avec la profondeur est environ cinq fois plus fort que les taux mesurés en irrigation classique.
- Il n'apparaît pas de pertes par percolation durant les six journées du cycle d'irrigation. Cependant, l'eau apportée par irrigation n'est pas entièrement exploitée par les plantes : 30% de la dose d'irrigation reste stockée dans la couche de sol 0-50 cm.  
La limitation de la consommation en eau des plantes apparaît au cours de la troisième journée du cycle. Durant la seconde unité du cycle, la consommation en eau n'atteint que 20% de l'évapotranspiration potentielle cumulée.

Ces résultats ne sont pas surprenants, si l'on tient compte des conditions pédologiques particulières - faible perméabilité et faible porosité du sol - comme on l'a montré dans le chapitre IV de cette étude. La localisation du système racinaire apparaît comme la conséquence des facultés d'adaptation des plantes à un apport localisé d'eau et/ou d'éléments fertilisants\*. Du fait de cette localisation et de la nature texturée du sol (relation  $h(\theta)$ ), les plantes limitent leur consommation en eau pour une humidité relativement élevée du sol :  $0.15 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  en moyenne pour la tranche de sol 0-15 cm.

---

\* Ce phénomène a été souvent observé par les expérimentateurs ; il est attribué tantôt à l'hydrotropisme (Black et Mitchell, 1974 ; Villoughby et Cockroft, 1974), tantôt au chimiotropisme des plantes (L. Rolland, 1973). Une localisation excessive des racines n'est pas toujours souhaitable (cf. Ababou, 1979).

Ainsi, la "réserve utile" du sol est faible pour ce type d'irrigation et ce type de sol. On peut penser qu'une période plus longue de stress hydrique (qui est ici de deux à trois jours) aurait entraîné le développement en profondeur de nouvelles racines, ou la remise en activité d'anciennes racines.

En pratique, il semble préférable de doubler la fréquence d'irrigation afin de réduire les périodes de stress hydrique de la plante. D'autre part, on montre dans l'étude Annexe que le volume de sol humecté ne peut pas être augmenté en agissant sur le débit d'irrigation.

A l'issue de cette étude, une question se pose : peut-on passer de la simulation simple à la prévision ? La réponse est négative dès lors qu'interviennent des processus aussi complexes que la transpiration et l'évaporation, même si l'on suppose parfaitement connues les caractéristiques hydrodynamiques du sol et les conditions-limites. Par contre, il semble possible de prédire approximativement certaines caractéristiques de l'infiltration localisée simple (sans évaporation ni transpiration) et d'utiliser ces résultats en vue d'applications pratiques : cf étude Annexe .

BIBLIOGRAPHIE

- R. ABABOU, 1978  
 "Simulation d'une infiltration localisée  
 Mémoire de D.E.A., Grenoble.
- R. ABABOU, 1979  
 "Les inconnues de l'irrigation au goutte-à-goutte"  
 Revue marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires, n°32,  
 (3-41), Rabat.
- R. ABABOU, M. VAUCLIN, G. VACHAUD, 1979  
 "Etude numérique de l'infiltration de l'eau suite à une irrigation  
 localisée"  
 Séminaire sur l'Irrigation Localisée organisé par la C.E.E.,  
 programme AGRIMED, Bologne, 6-9 Novembre 1979.
- BLACK, MITCHELL, 1974  
 "Changes in root distribution of mature pear trees in response to  
 trickle irrigation"  
 End Int. Drip Irrig. Congress, Proceedings (p.437) San Diego, U.S.A.
- R.A. FEDDES, E. BRESLER, S.P. NEIMAN, 1974  
 "Field test of a modified numerical model for water uptake by root systems"  
 Wat. Res. Res. 10, 6 (1199-1206)
- D. GOLDBERG, B. GORNAT, D. RIMON, 1976  
 "Effect of drip irrigation on root distribution of an annual crop"  
 (5-10), in "Drip Irrigation" (296 p.)
- A.A. MAHBOUBI, 1980  
 "Etude in-situ du bilan hydrique pour quelques graminées : extraction  
 de l'eau par le système racinaire et résistance à la sécheresse"  
 Thèse de Docteur-Ingénieur, Acad. de Montpellier.
- M.N. NIMAH, R.J. HANKS, 1973  
 Model for estimating soil water, plant, and atmospheric interrelations"  
 I, II Soil Sci. Soc. Am. Proc. 37 (522-532)

C.D. RAPIER, S.A. BARBER, 1970

"Rooting systems of soybeans"

(1) Agron.J?, 62 (581-584)

L. ROLLAND, 1973

in "L'irrigation au goutte-à-goutte"

Bulletin Irrig. Drain., n°14, FAO, Rome.

M. Th. Van GENUCHTEN, 1980

"A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils"

Soil Sci. Soc. Am. J., 44 (892-898).

WILLOUGHBY, COCKROFT, 1974

"Changes in root patterns of peach trees under trickle irrigation"

2nd Int. Drip Irrig. Congress, Proceedings (p.439), San Diego, U.S.A.

DATE	29/9/79	26/9/79	27/9/79	28/9/79	29/9/79	30/9/79	1/10/79
ETP mm/j	5.6	3.2	2.9	2.8	2.5	2.7	2.8
Horaire des mesures	08h 20h	-	08h	14h	-	-	14h
Temps t depuis le début de l'irrigation	t = 0h t = 12h	-	t = 48h	t = 78h	-	-	t = 150h
Commentaires	Début Infiltration Fin Infiltration	-	-	-	-	-	Fin du cycle d'irrigation

TABLEAU I : Planning des Mesures et Données climatiques pour la cuve 4.

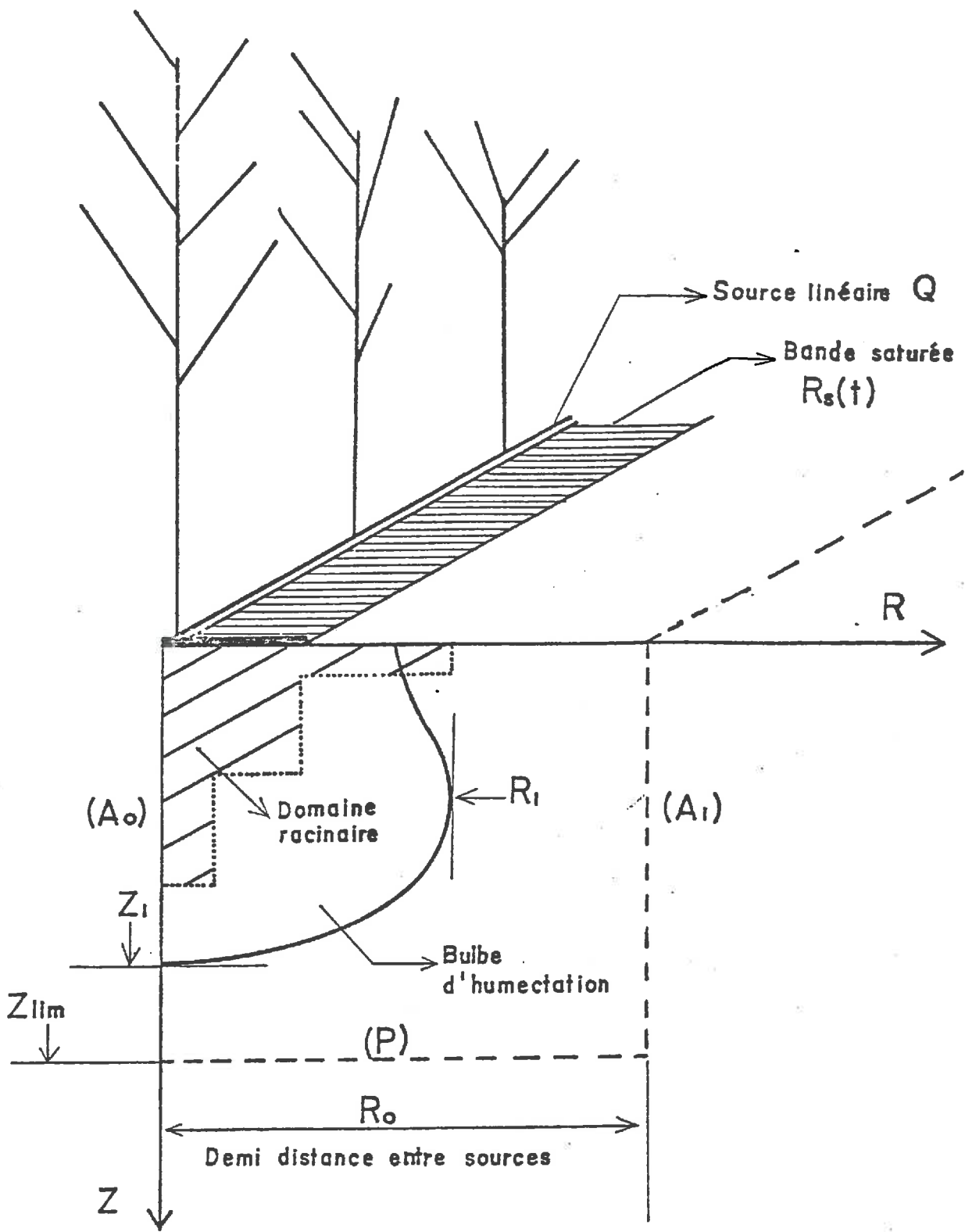


FIGURE 1 - MODELISATION D'UNE IRRIGATION LOCALISEE LINEAIRE



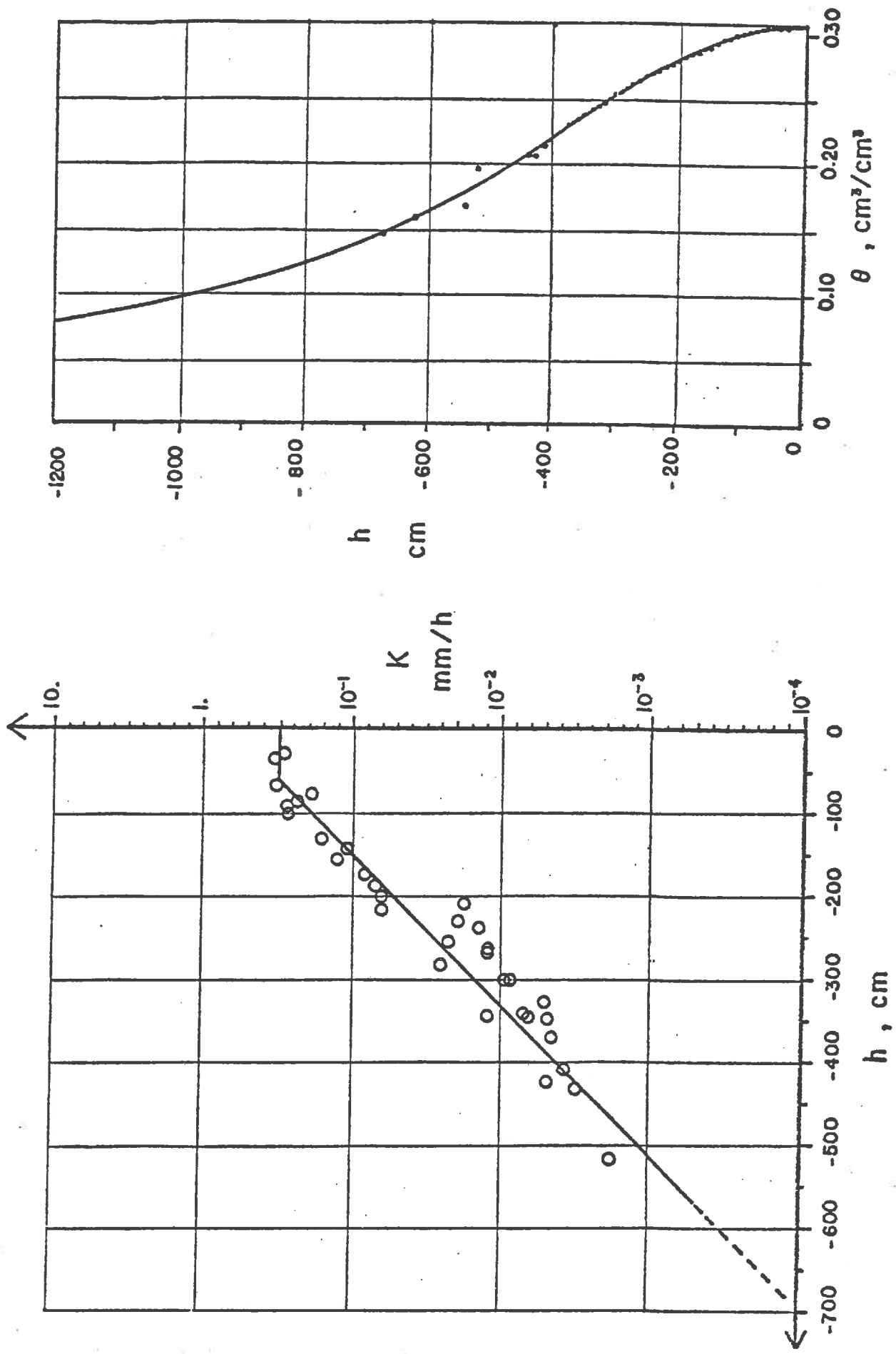


FIGURE 2 - CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES DU SOL DE LA CUVE 4 :  $K(h)$  ET  $h(\theta)$

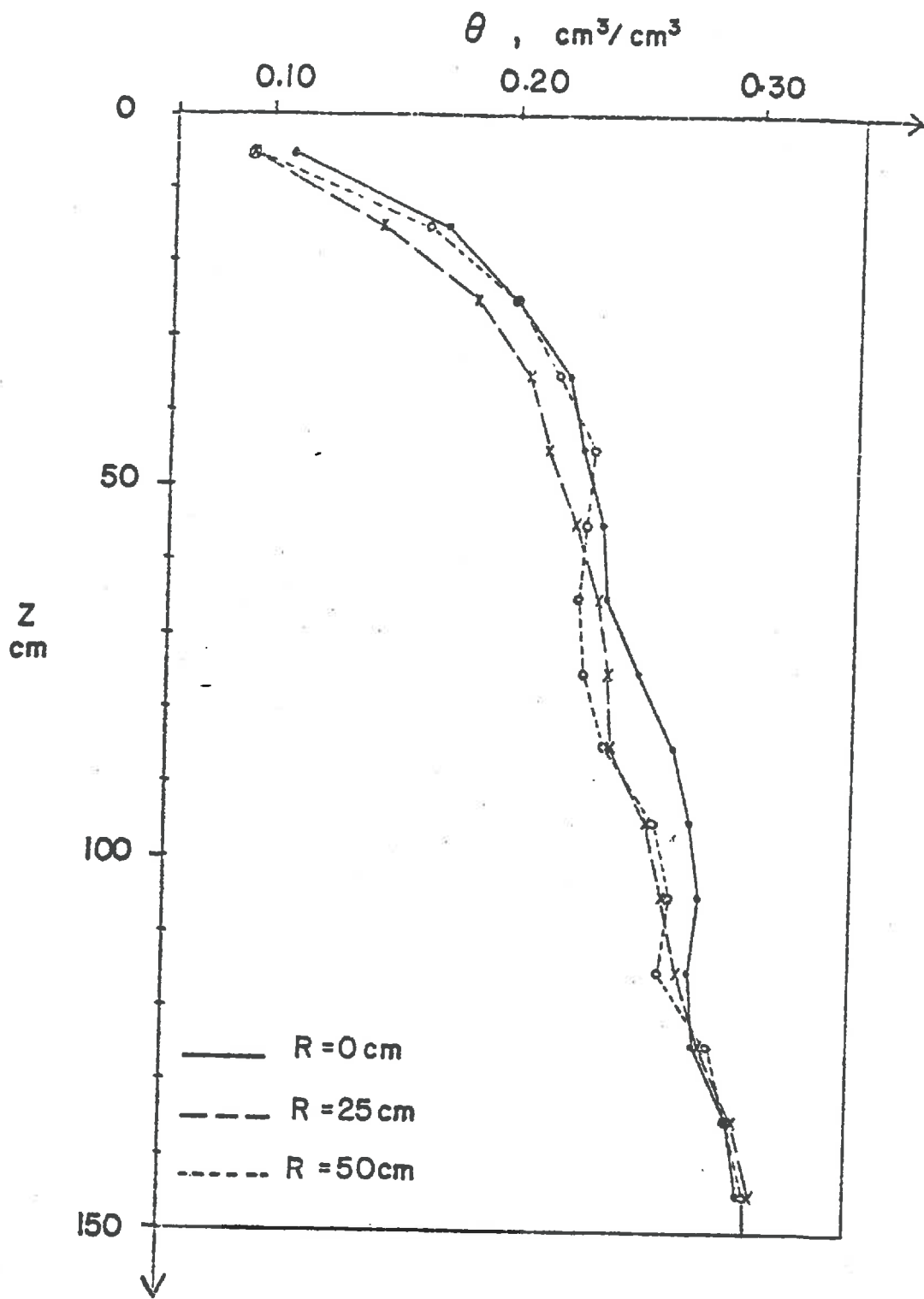


FIGURE 3.a - PROFILS HYDRIQUES INITIAUX SUR LES TROIS VERTICALES DE MESURE.

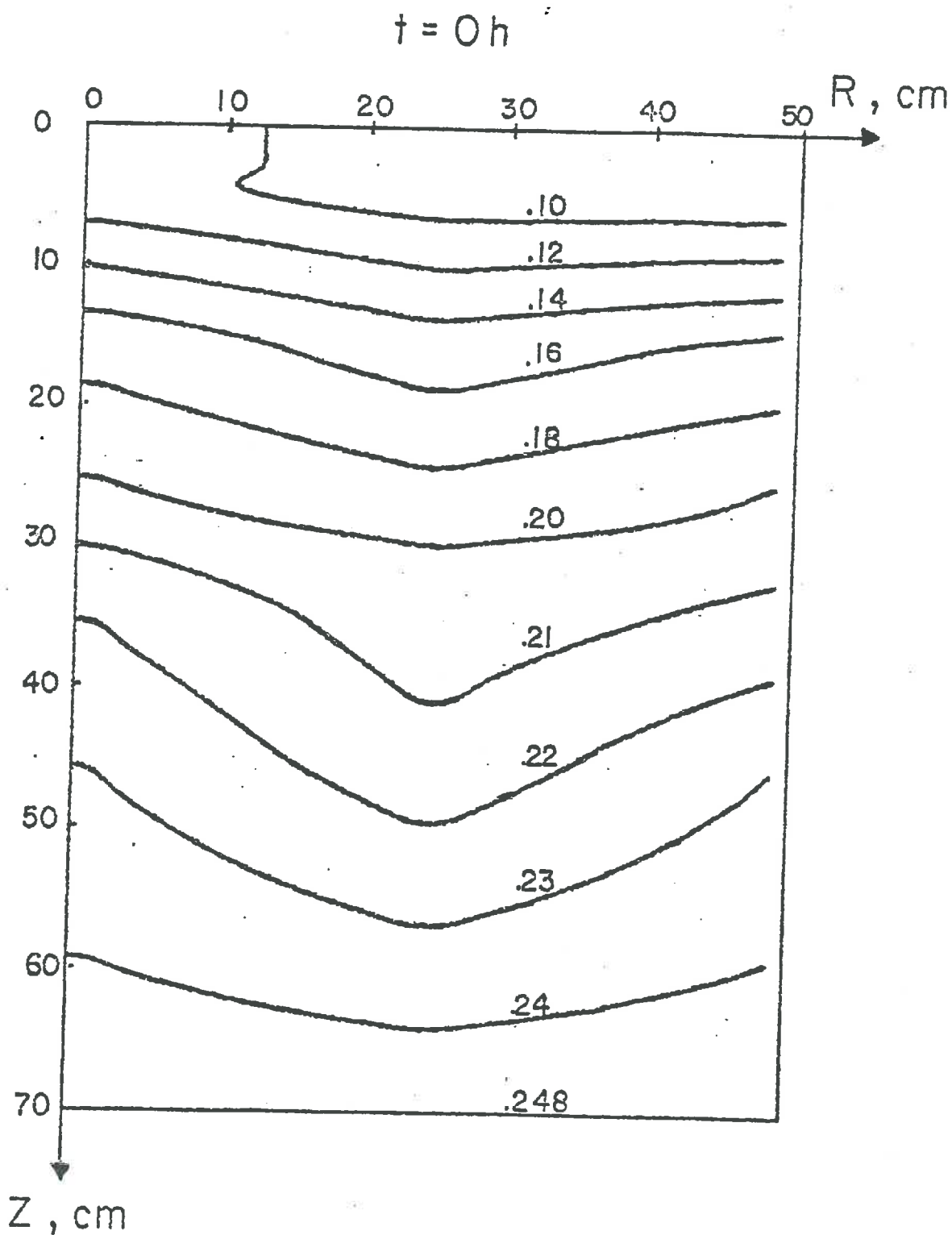


FIGURE 3.b - ETAT INITIAL DU SOL EN REPRESENTATION BIDIMENSIONNELLE.

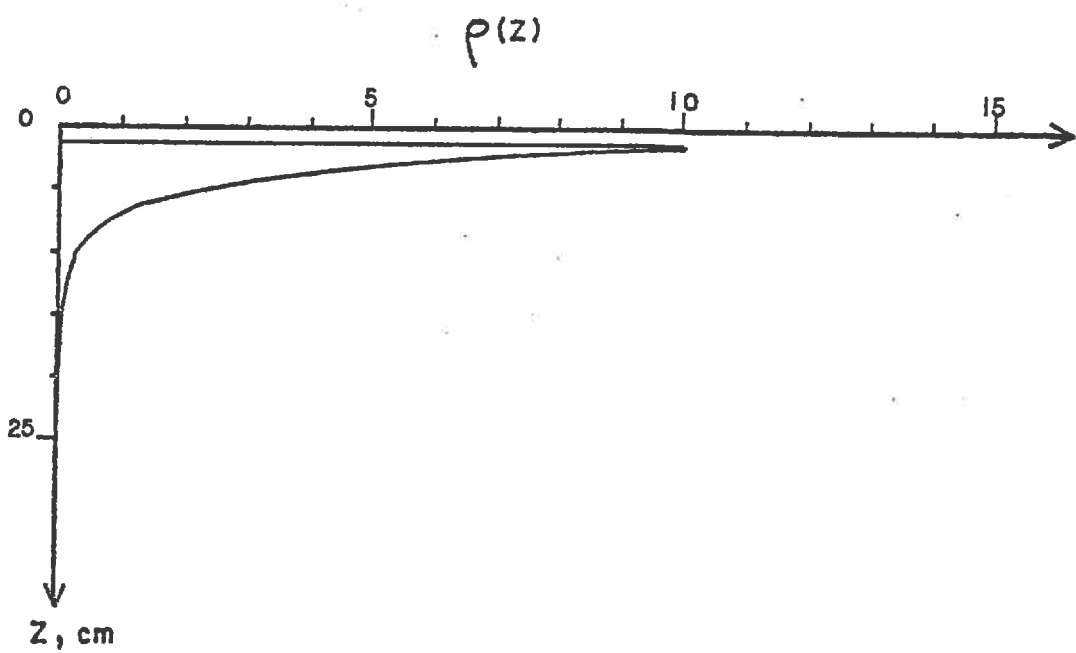
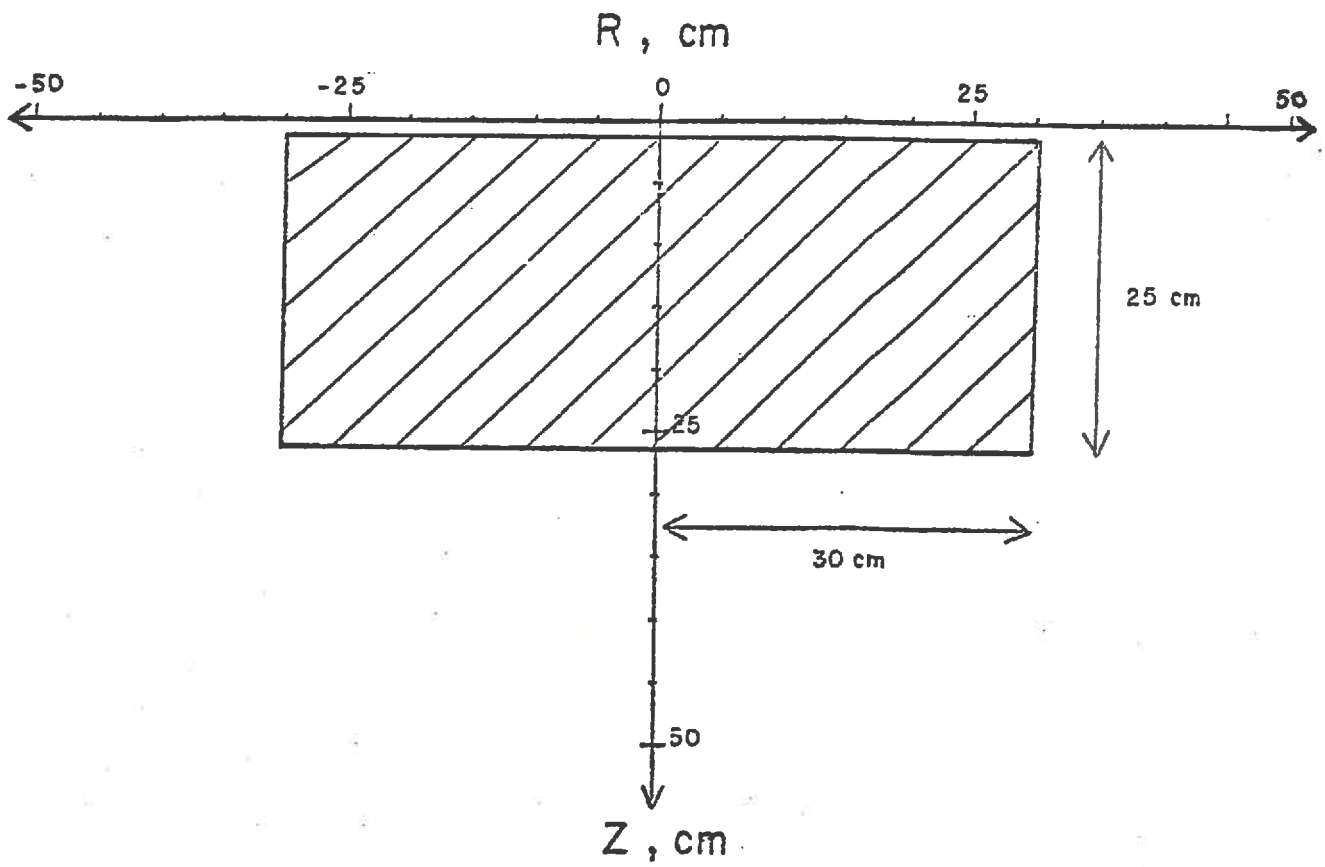


FIGURE 4 - CARACTERISTIQUES DU SYSTEME RACINAIRE

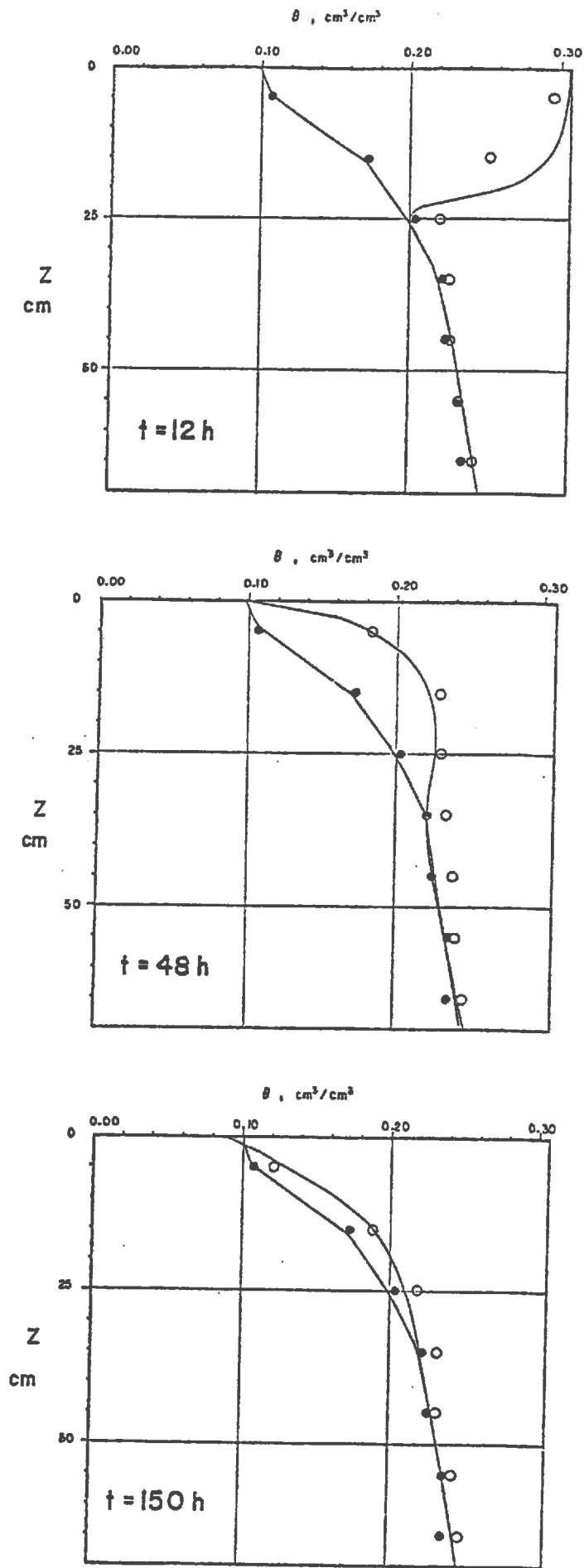


FIGURE 5 - PROFILS HYDRIQUES SUR L'AXE DE SYMETRIE  $R=0$   
(SIMULES ET EXPERIMENTAUX)

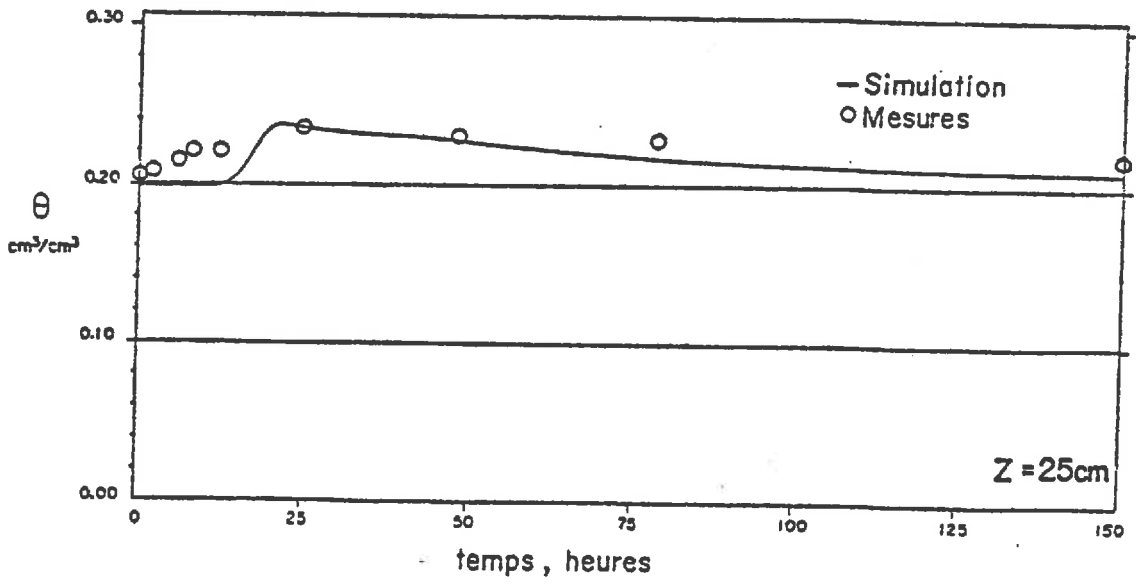
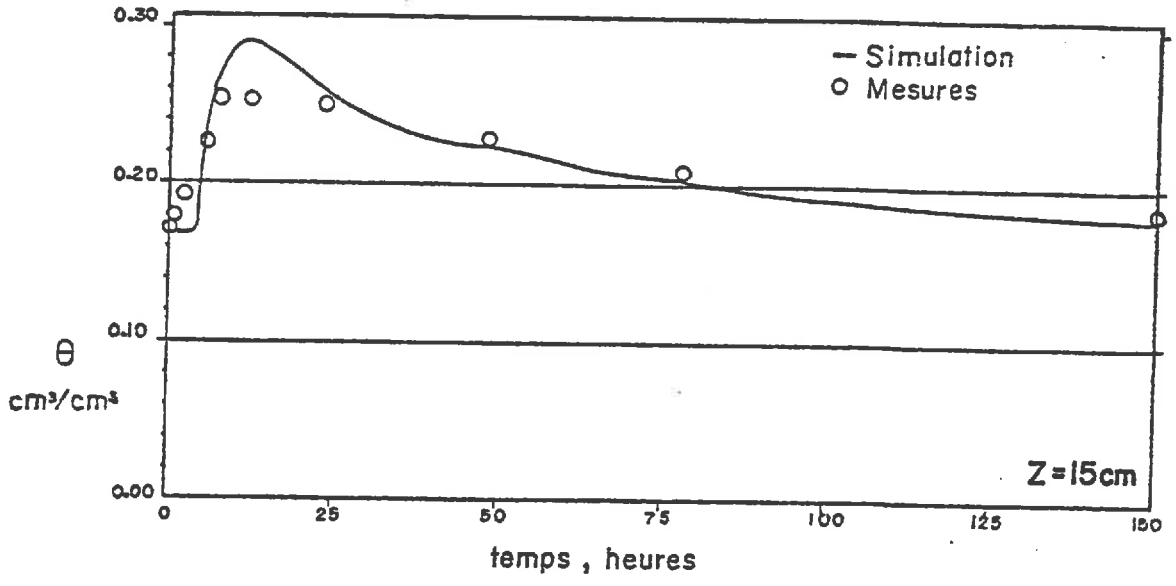
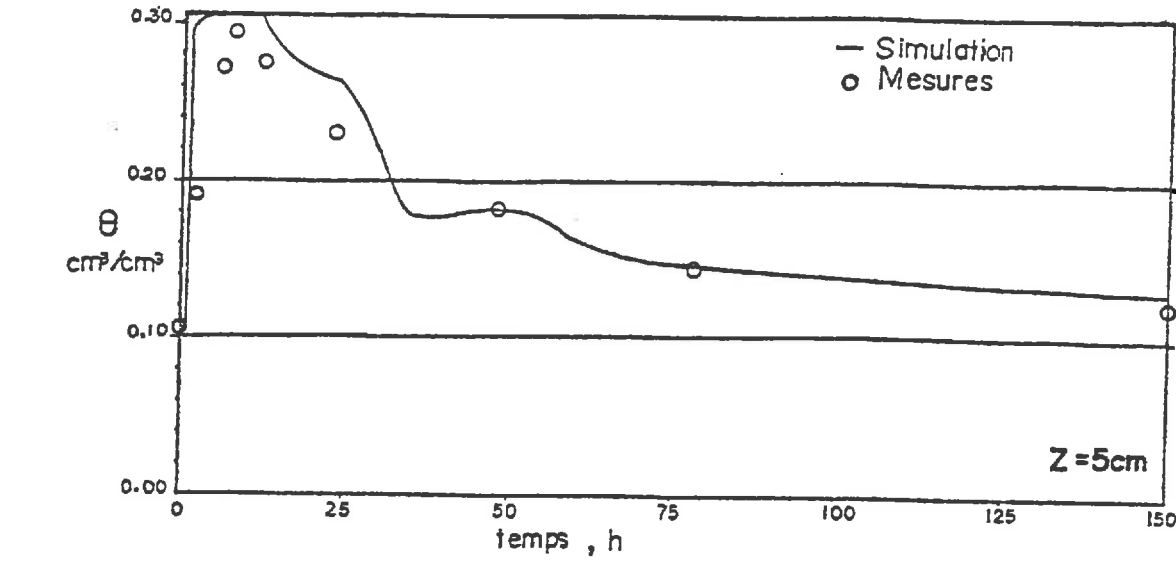


FIGURE 6 - EVOLUTION DE LA TENEUR EN EAU EN TROIS POINTS SUR L'AXE DE SYMETRIE R=0 (SIMULEE ET EXPERIMENTALE)

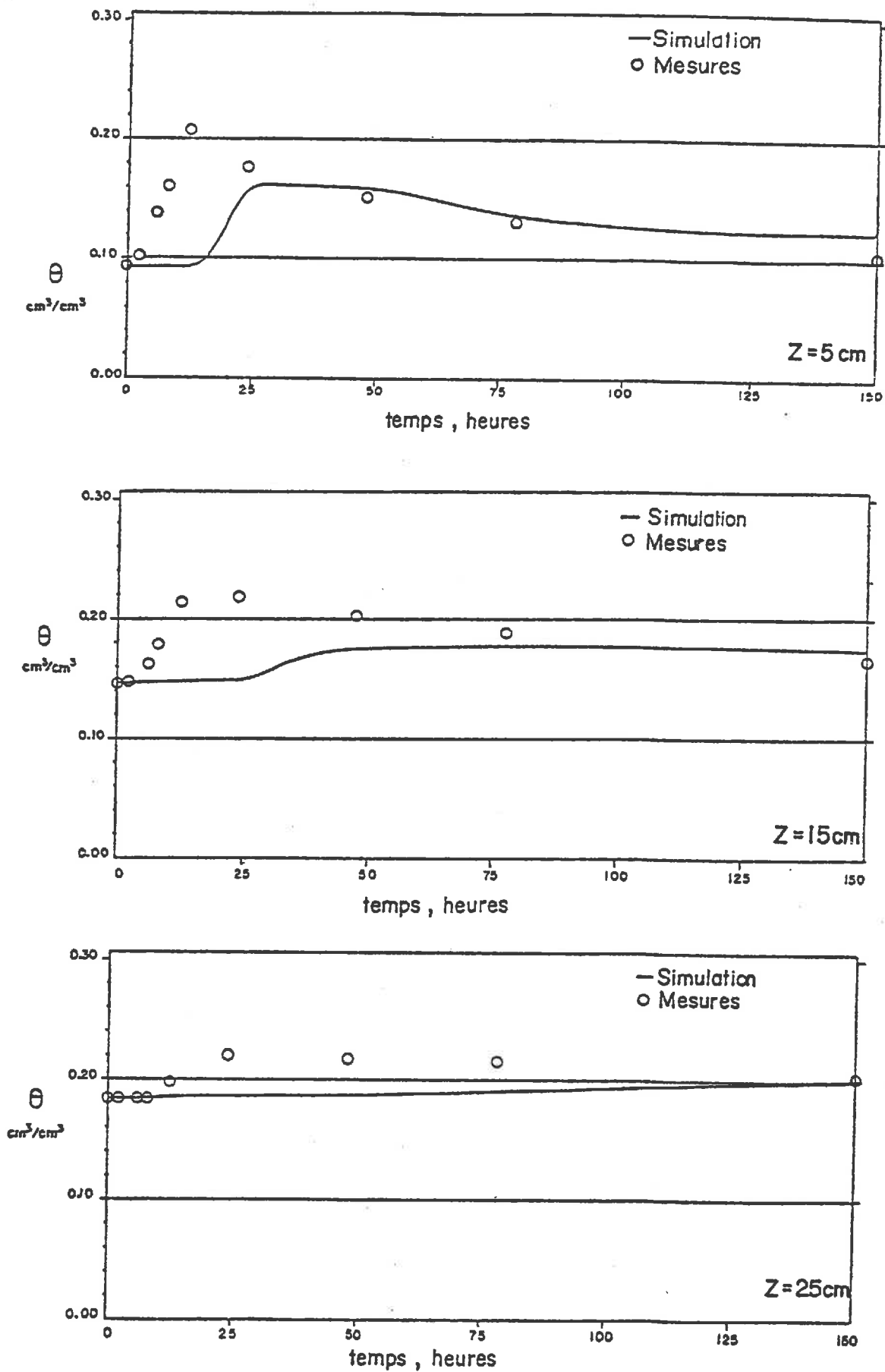


FIGURE 7 - EVOLUTION DE LA TENEUR EN EAU EN TROIS POINTS SUR LA VERTICALE R=25cm.(SIMULEE ET EXPERIMENTALE)

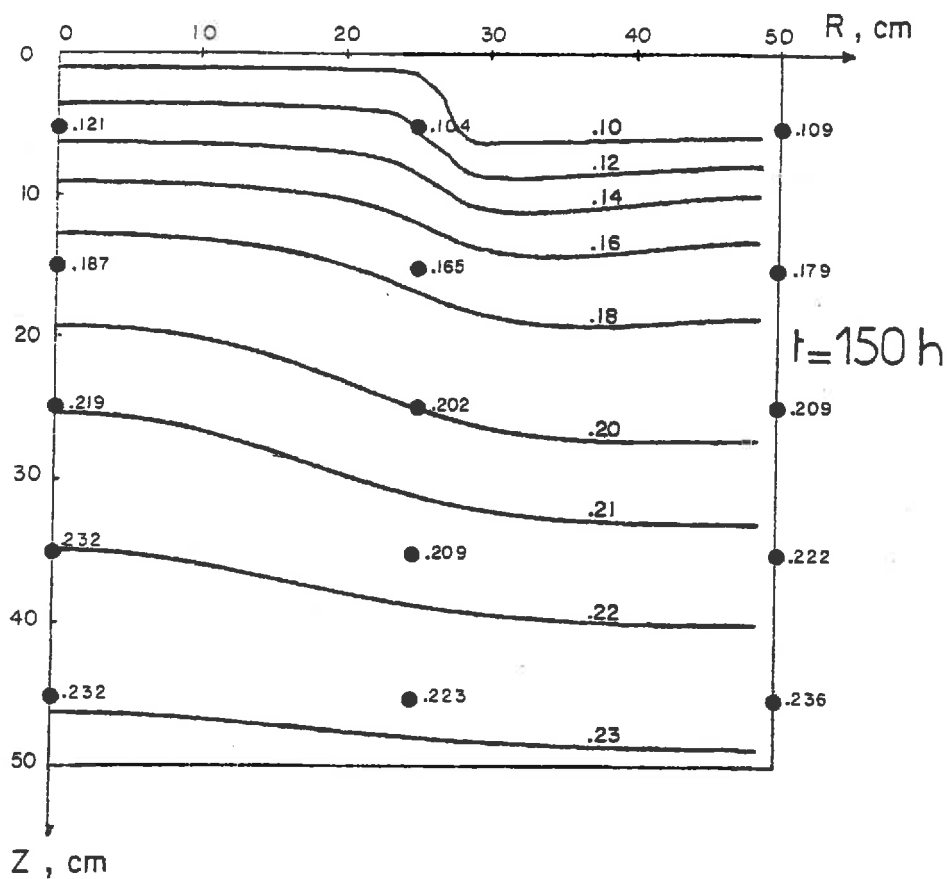
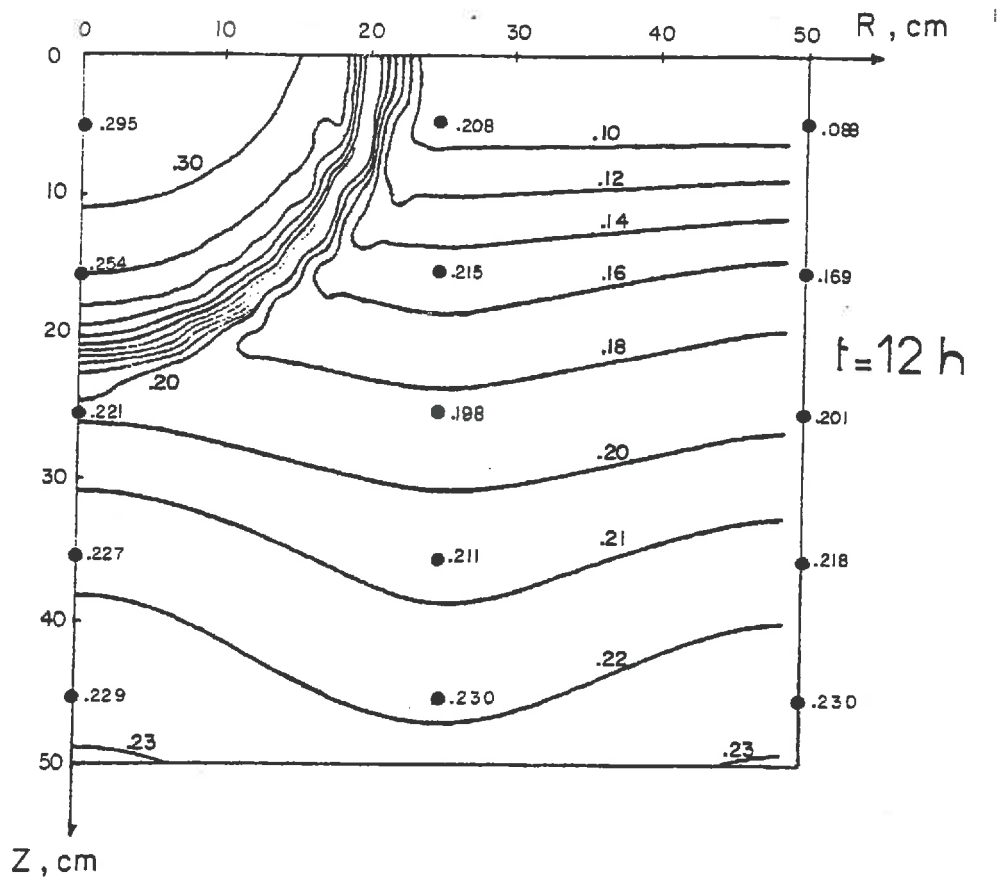


FIGURE 8 - REPRESENTATION BIDIMENSIONNELLE DE L'ETAT D'HUMIDITE DU SOL (SIMULATION) ET COMPARAISON AVEC LES DONNEES EXPERIMENTALES.



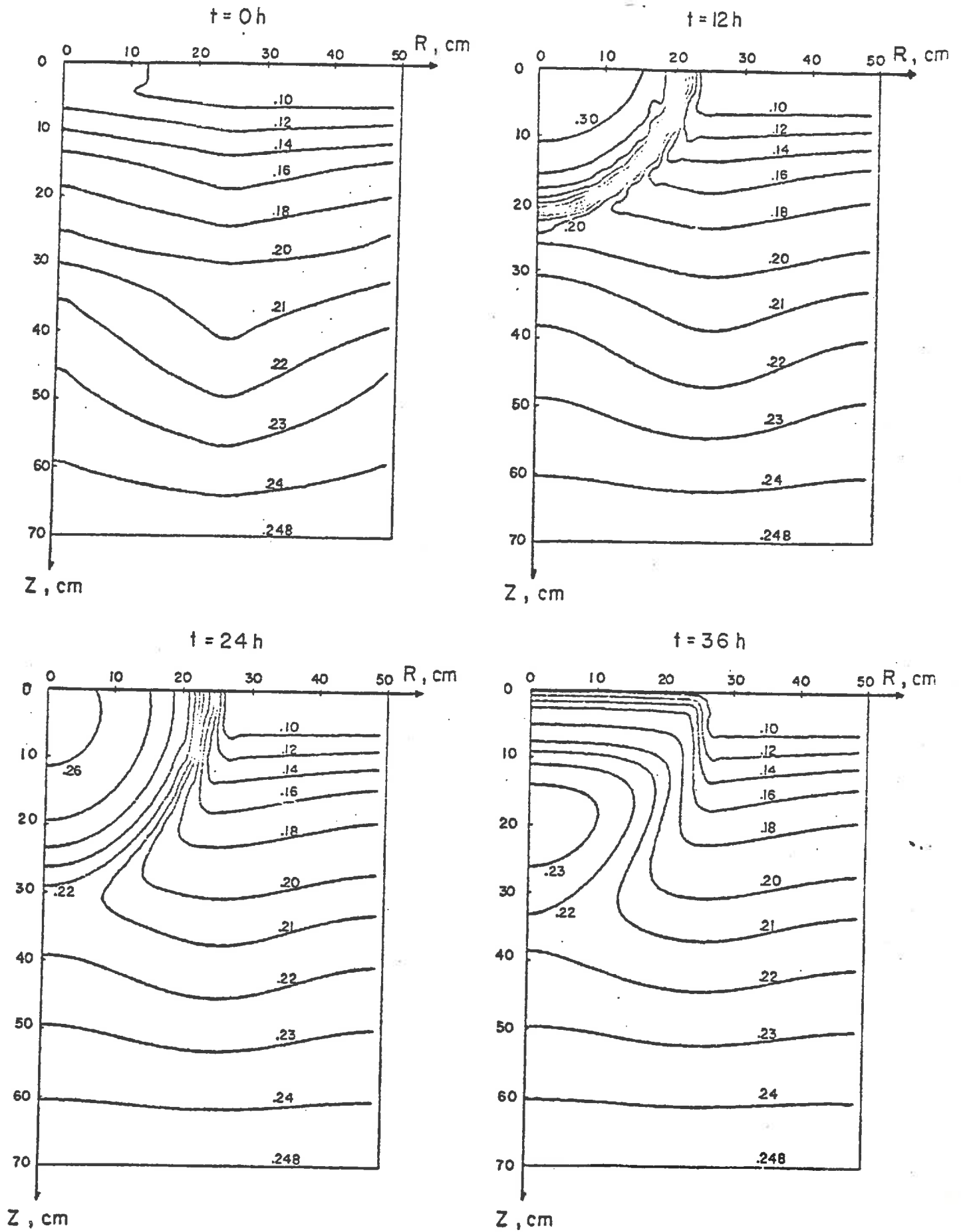


FIGURE 9 - CHAMPS D'ISOHYETES DANS LE SOL A DIFFERENTS INSTANTS (SIMULATION)

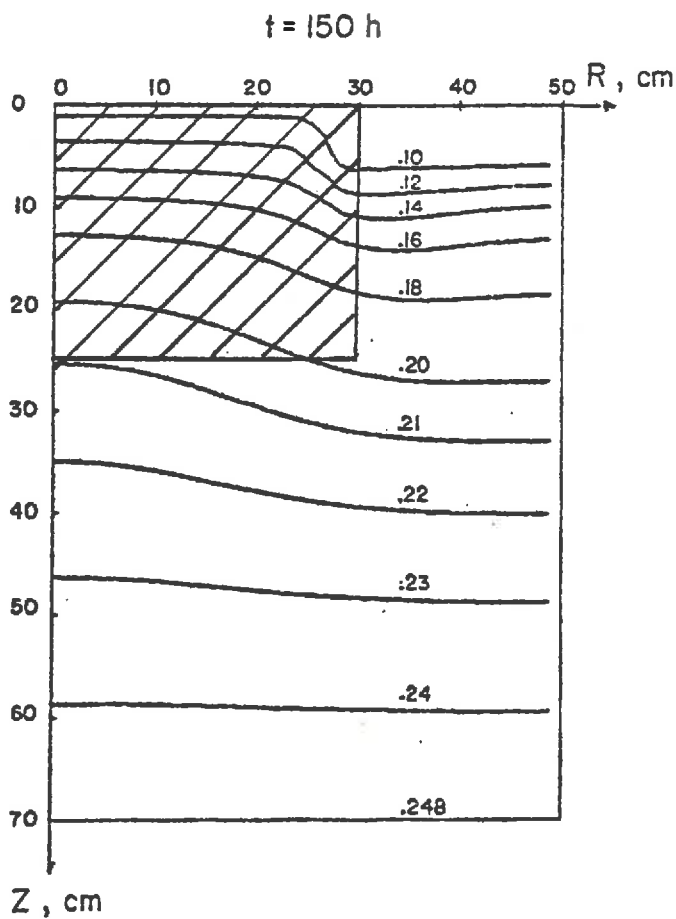
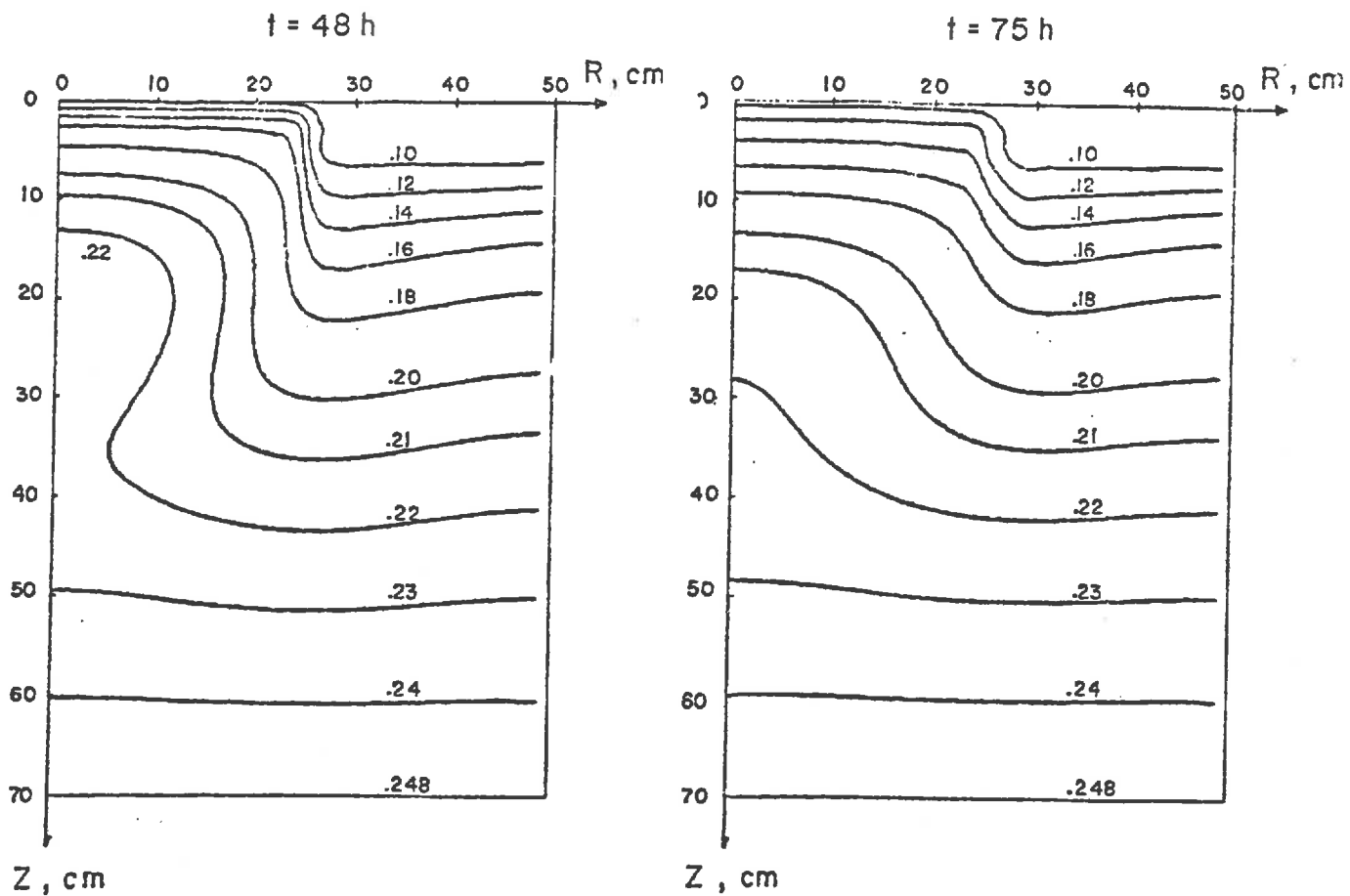


FIGURE 9 - (SUITE)

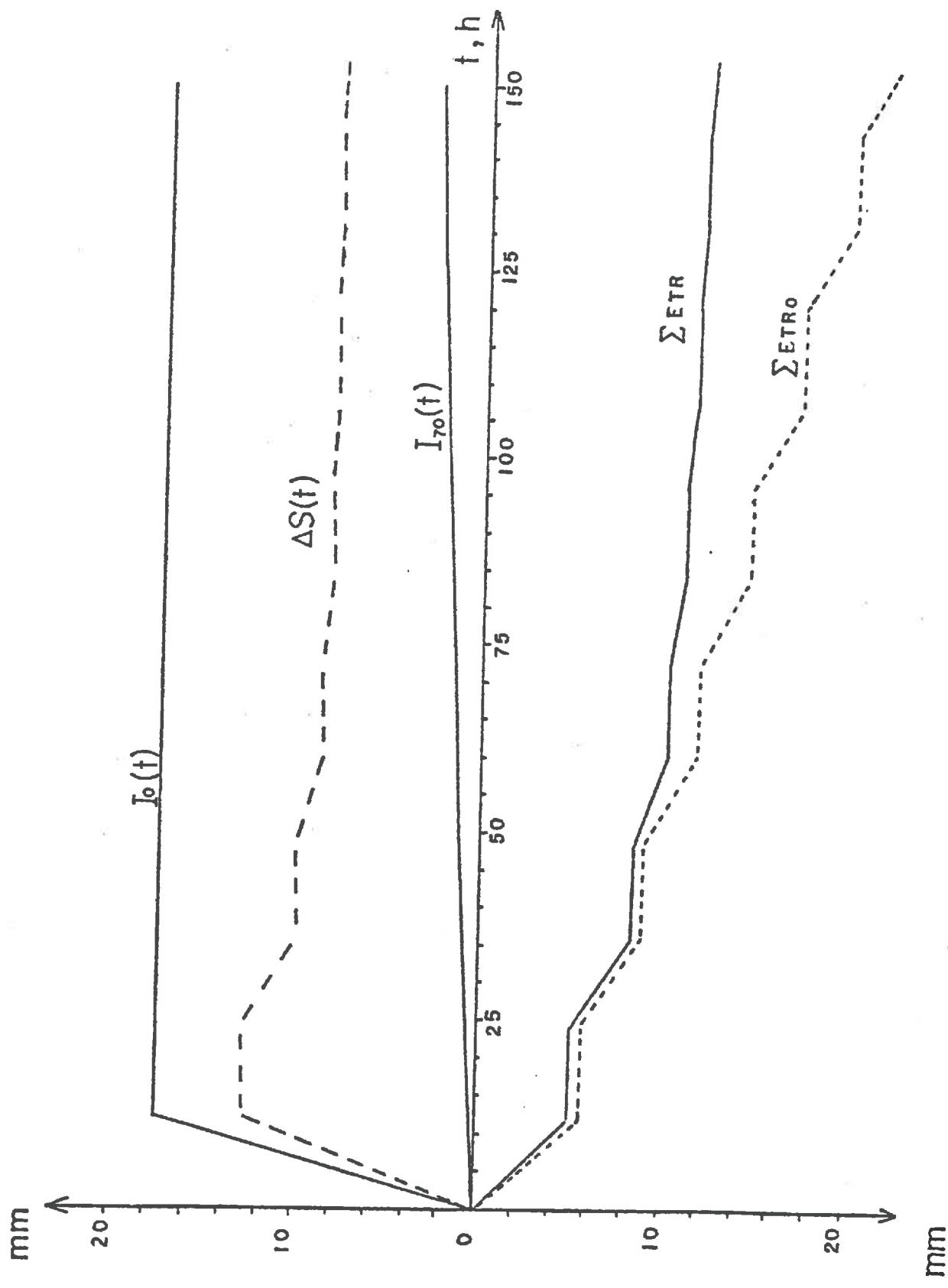


FIGURE 10 - BILAN HYDRIQUE ET "ETR EN FONCTION DU TEMPS (SIMULATION)

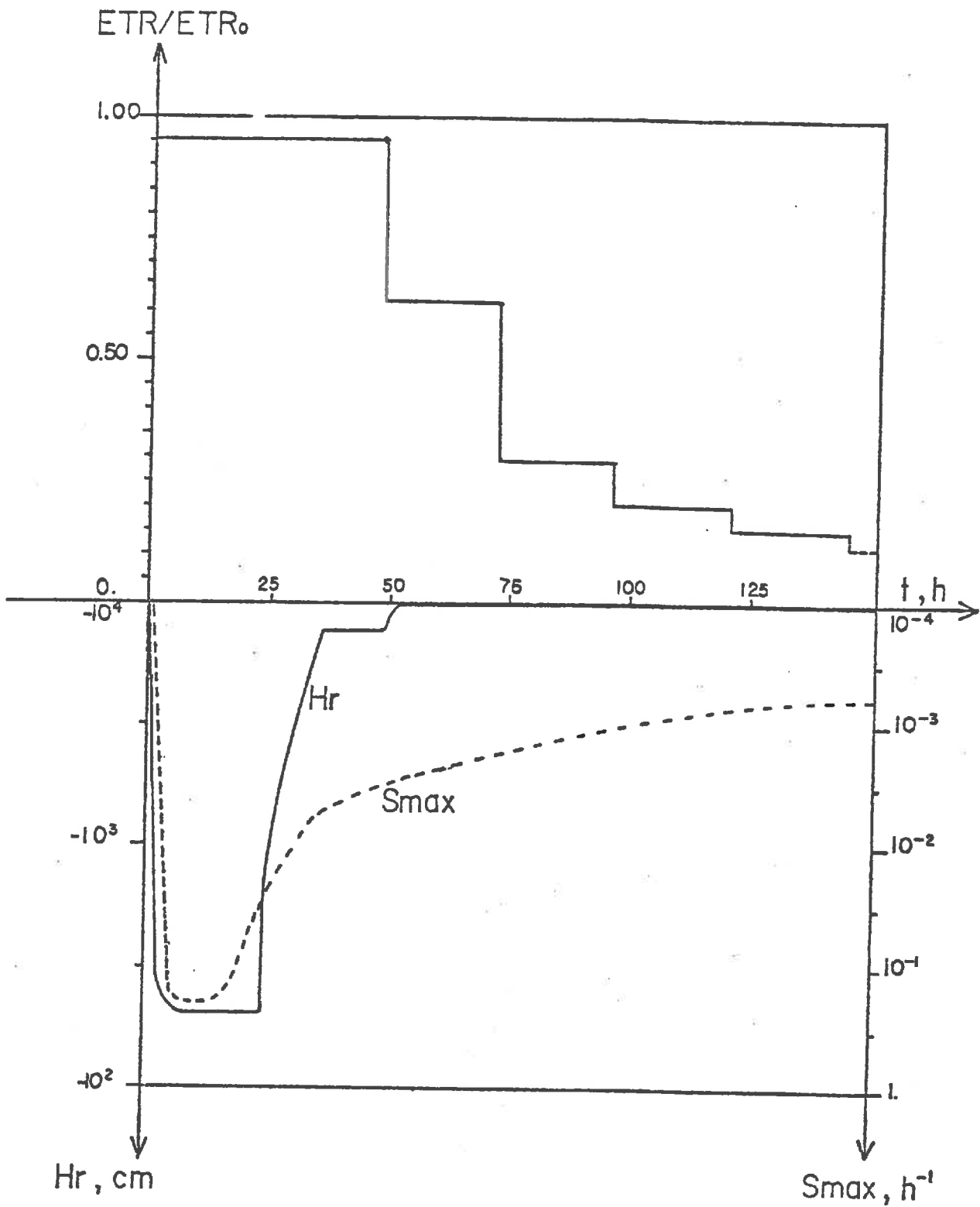


FIGURE 11 - EVOLUTION DE LA PRESSION RACINAIRE ET DU TAUX MAXIMUM D'EXTRACTION RACINAIRE, COMPARES A L'ETR (SIMULATION).

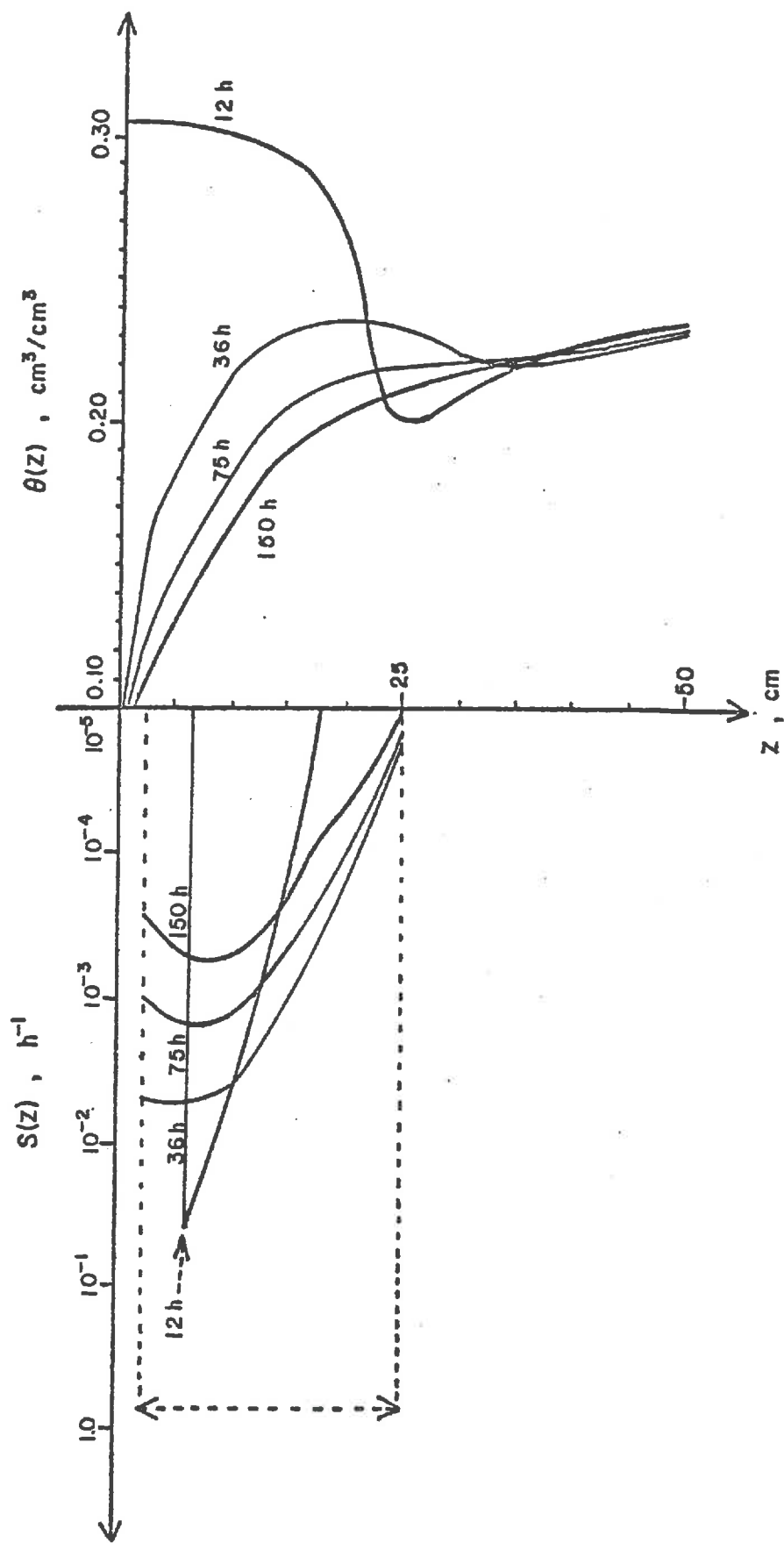


FIGURE 12 - EVOLUTION DES PROFILS D'EXTRACTION RACINAIRE SUR L'AXE DE SYMETRIE  $R = 0$  (SIMULATION)

ANNEXE au CHAPITRE II

---

INFLUENCE DU DEBIT ET DE LA DOSE SUR LA  
CINETIQUE DE L'INFILTRATION LOCALISEE

Rachia ABABOU

I.M.G.

Laboratoire de Mécanique des Fluides

Université des Sciences de

GRENOBLE

## INTRODUCTION.

On utilise le modèle de simulation IRLOC dans le but de dégager les lois de variation de l'état hydrique du sol pour une infiltration localisée linéaire, en fonction de la dose appliquée et pour différents débits.

A cette fin, on s'affranchit, dans un premier stade, des conditions climatiques (ETR nulle : il n'y a ni évaporation, ni extraction racinaire). De plus, on suppose un état initial homogène du sol, correspondant à une humidité de l'ordre de la capacité au champ, avec écoulement gravitaire négligeable.

On s'attache alors exclusivement à l'analyse du bulbe d'humectation obtenue par simulation d'une irrigation localisée.

Dans un second stade, on tente de revenir à des hypothèses plus réalistes en corrigeant les résultats obtenus afin de tenir compte, de façon globale et approchée, de l'évapotranspiration.

## METHODOLOGIE.

Le "bulbe d'humectation" est défini à chaque instant par une frontière de teneur en eau donnée, supposée correspondre à la position du front d'humectation.

On notera  $\theta_0$  la teneur en eau initiale du sol, et  $\theta_1$  la teneur en eau caractérisant la frontière du bulbe d'humectation. La valeur de  $\theta_1$  est choisie en fonction de l'allure des fronts d'humectation\*.

Pour le sol de la cuve 4 de l'I.N.R.A.-MONTFAVET, les valeurs numériques sont les suivantes :

$$\theta_s = 0.3060 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$$

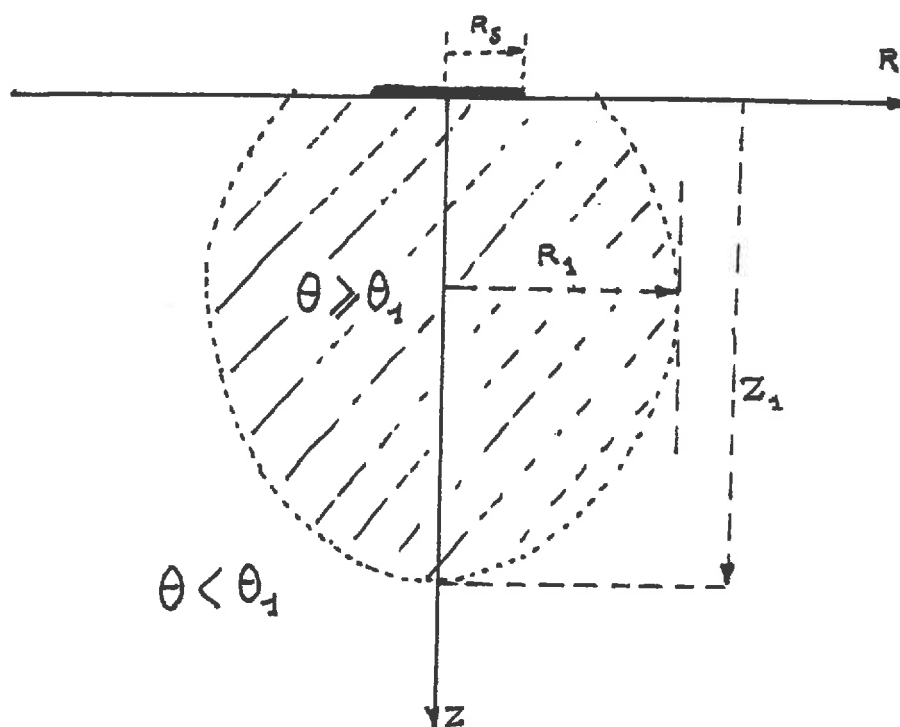
$$\theta_0 = 0.150 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$$

$$\theta_1 = 0.205 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$$

Les dimensions du bulbe ainsi que l'étendue de la zone saturée à la surface du sol sont alors calculées automatiquement par le modèle IRLOC :

---

\* Le choix de  $\theta_1$  est d'autant moins sujet à caution que le front d'humectation est raide, ce qui est le cas ici.



$R_1$  = extension latérale maximum du bulbe

$Z_1$  = profondeur maximum du bulbe

$V_1$  = volume du bulbe

$R_s$  = taille de la zone saturée à la surface du sol

Les variables testées sont :

- 1) le débit  $Q$ , en l/h/m
- 2) la dose  $I$ , en l/m ( $I = Q \times t$ )

La gamme des débits testés va de 0.5 à 6.0 l/h/m  
(0.5 , 1.5 , 3.0 et 6.0)

La gamme des doses testées va de 2 à 104 l/m

### 1) Influence de la dose :

On a trouvé avec une très bonne approximation que les lois analytiques suivantes étaient vérifiées pour le sol de la Cuve 4 de l'I.N.R.A.-MONTFAVET :



$$V_1 (I) = V_1^* (Q) \cdot I \quad (1)$$

$$R_1 (I) = R_1^* (Q) \cdot I^{1/2} \quad (2)$$

$$Z_1 (I) = Z_2^* (Q) \cdot I^{1/2} \quad (3)$$

$$R_s (I) = R_s^* (Q) \cdot I^{1/2} \quad (4)$$

Les variables étoilées sont des grandeurs adimensionnelles fonction uniquement du débit, et donc constantes pour un débit donné.

On trouvera la représentation graphique des relations (1), (2), (3) et (4) dans les Figures 1, 2, 3 et 4 : les points représentent des résultats de simulation et non des résultats expérimentaux.

## 2) Influence du débit :

Les variables étoilées  $V_1^*$ ,  $R_1^*$ ,  $Z_1^*$ ,  $R_s^*$  peuvent être interprétées comme des vitesses d'accroissement des grandeurs correspondantes. En effet, on peut écrire :

$$(5) \quad V_1^* (Q) = \frac{V_1}{I} = \frac{\partial V_1}{\partial I}$$

$$(6) \quad R_1^* (Q) = \frac{R_1}{I^{1/2}} = \frac{\partial R_1}{\partial (I^{1/2})}$$

$$(7) \quad Z_1^* (Q) = \frac{Z_1}{I^{1/2}} = \frac{\partial Z_1}{\partial (I^{1/2})}$$

$$(8) \quad R_s^* (Q) = \frac{R_s}{I^{1/2}} = \frac{\partial R_s}{\partial (I^{1/2})}$$

La représentation graphique de  $V_1^* (Q)$  -FIGURE 5- montre que le volume du bulbe progresse un peu plus vite (en fonction de la dose) pour des débits faibles.

La représentation graphique des relations  $R_1^* (Q)$ ,  $Z_1^* (Q)$  et  $R_s^* (Q)$  sur une même figure -Figure 6- permet de dégager deux conclusions importantes :

- a) la vitesse d'accroissement de  $Z_1$  (profondeur max. du bulbe) diminue lorsqu'on augmente le débit, au contraire de  $R_1$  : un accroissement de débit a donc pour effet de diminuer la vitesse de pénétration profonde du bulbe et corrélativement d'augmenter sa vitesse d'expansion latérale, environ du même ordre de grandeur (ceci explique que le volume du bulbe est finalement peu affecté par un changement de débit, cf. Figure 5).

- b) la vitesse d'accroissement de  $R_s$  (taille de la zone saturée en surface) est toujours inférieure à celle de  $R_1$ , et tend vers celle-ci lorsque le débit augmente : ainsi, pour les forts débits, l'accroissement de la zone saturée en surface se traduit intégralement par un accroissement latéral du bulbe.

Enfin, on a représenté l'évolution d'un paramètre de forme indépendant de la dose (ou du temps d'infiltration) :

$$\lambda(Q) = \frac{R_1(Q, I)}{Z_1(Q, I)} = \frac{R_1^*(Q)}{Z_1^*(Q)}$$

La signification de  $\lambda(Q)$  (représenté Figure 7 selon une échelle semi-logarithmique) est celle d'un coefficient traduisant l'extension latérale du bulbe : on voit par exemple que le rapport  $\lambda(Q) = \frac{R_1}{Z_1}$  passe de 1. à 5. lorsque le débit passe de 1 l/h/m à 7 l/h/m.

La forme du bulbe apparaît donc assez sensible à une variation du débit, selon une loi expérimentale :

$$\lambda(Q) = \frac{R_1}{Z_1} = 0.78 \exp (.252 \times Q)$$

#### DISCUSSION ET CONCLUSION.

L'intérêt de cette étude réside à notre sens dans l'utilisation de variables descriptives simples. L'évolution de ces variables peut être traduite sous forme analytique (en fonction de la dose) ou graphique (en fonction du débit). On pense pouvoir généraliser une telle approche à d'autres types de sols (en particulier sableux) et à d'autres modes d'apport localisés (source ponctuelle).

On peut tester l'utilité pratique des abaques représentées en Figure 5, Figure 6 et Figure 7 sur le cas d'une irrigation réelle, étudiée dans la partie précédente de ce rapport :

- Espacement entre sources :  $S_0 = 1 \text{ m}$
- Durée d'infiltration :  $t = 12\text{h}$
- Débit :  $Q = 1.46 \text{ l/h/m}$
- Dose :  $I = 17.5 \text{ l/m}$
- ETP journalière :  $ETP_j = 5.6 \text{ mm/j}$
- ETP horaire durant l'infiltration :  $ETP = 0.46 \text{ mm/h}$
- ETP cumulée durant l'infiltration :  $\Sigma ETP = 5.6 \text{ mm}$

On se servira des abaques en utilisant un débit  $Q'$  et une dose  $I'$  corrigés de façon à tenir compte de l'évapotranspiration :

$$\begin{aligned} Q' &= Q - ETP \times S_0 \\ &= 1.46 \text{ l/h/m} - 0.46 \text{ l/h/m} \\ &= 1.0 \text{ l/h/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I' &= I - \Sigma ETP \times S_0 \\ &= 17.5 \text{ l/m} - 5.6 \text{ l/m} \\ &= 12. \text{ l/m} \end{aligned}$$

On trouve alors d'après les abaques 5, 6 et 7 les résultats suivants :

$$\begin{aligned} V_1^* (Q') &= 7.5 \\ R_1^* (Q') \approx Z_1 (Q) &\approx 6.8 \end{aligned}$$

D'où les valeurs suivantes pour les dimensions du bulbe :

$$\begin{aligned} V_1 &= V_1^* \times I' = 7.5 \times 12 \approx 90 \text{ l/m} = 0.09 \text{ m}^3/\text{m} \\ R_1 &= Z_1 = 6.8 \times 12 = 24 \text{ cm} \end{aligned}$$

On retrouve donc les principaux résultats obtenus expérimentalement et par simulation dans la partie précédente : le volume du bulbe est de l'ordre de  $0.1 \text{ m}^3/\text{m}$ , et celui-ci est approximativement circulaire, de rayon 25 cm.

De plus, les abaques montrent qu'on ne peut pas augmenter le volume du bulbe en jouant sur le débit : une pénétration plus importante du bulbe en profondeur ne peut être obtenue qu'avec des débits trop faibles pour être pratiqués. Inversement, une augmentation du débit entraîne un "flaquage" important en surface (de l'ordre de 20 cm de rayon pour un débit de 4.5 l/h/m) sans pour autant augmenter le volume global du bulbe. Notons cependant que ce dernier renseignement doit être interprété avec prudence, en l'absence d'informations précises sur la conductivité réelle de la couche superficielle du sol, qui influe beaucoup sur l'extension ou non d'une zone saturée à la surface du sol.

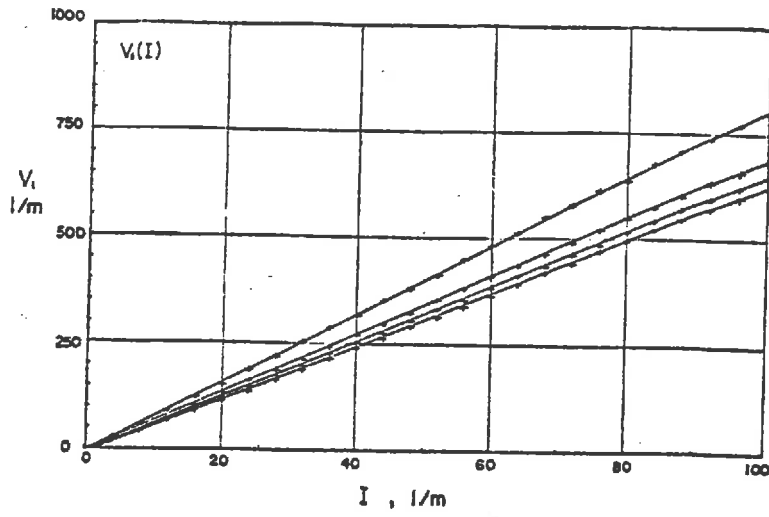


FIGURE 1

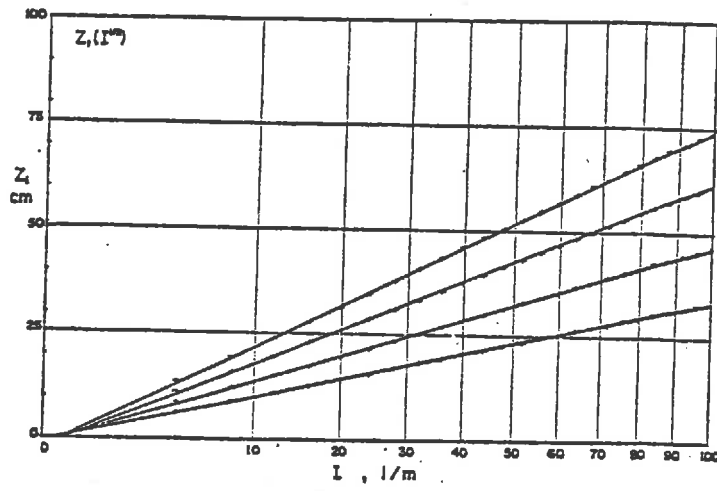


FIGURE 2

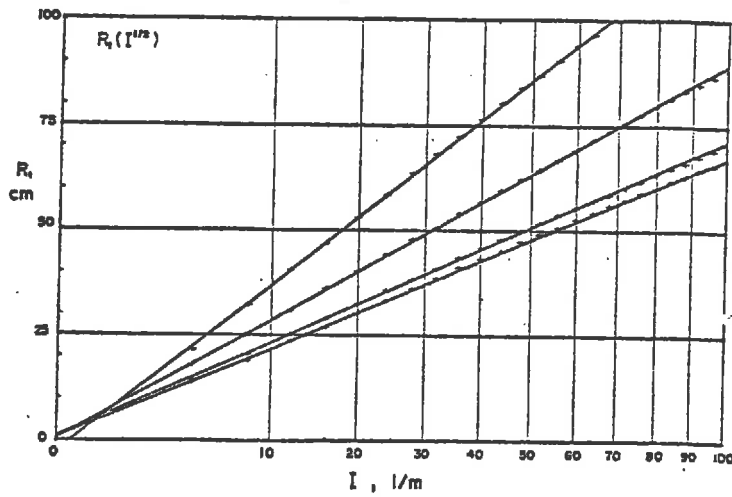


FIGURE 3

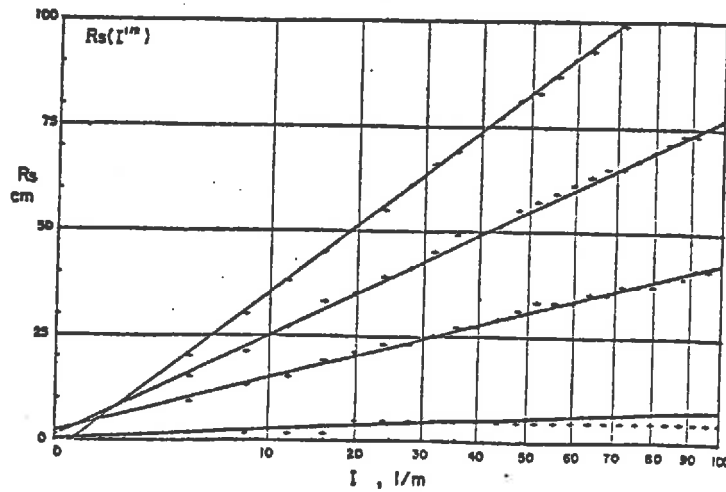


FIGURE 4

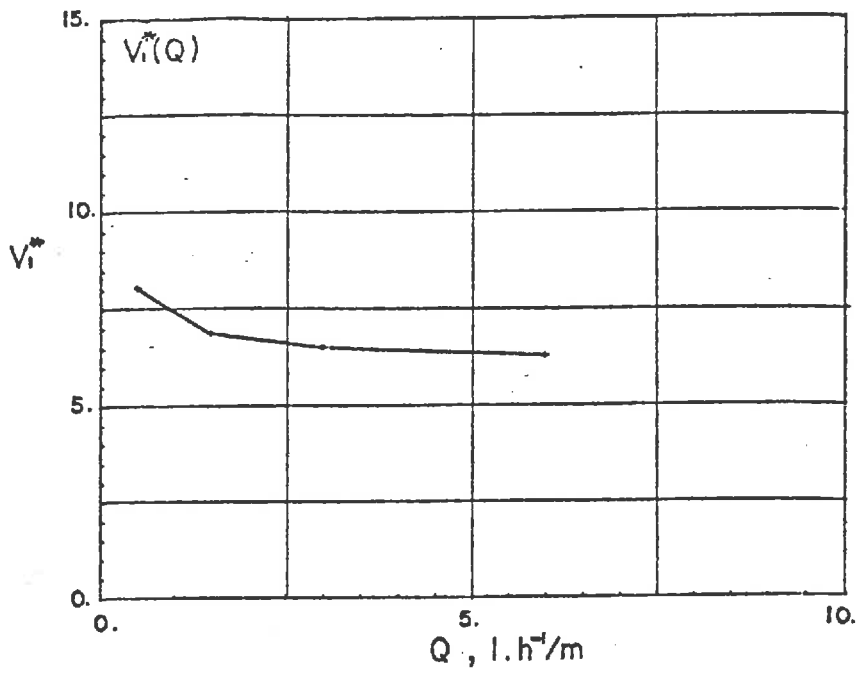


FIGURE 5

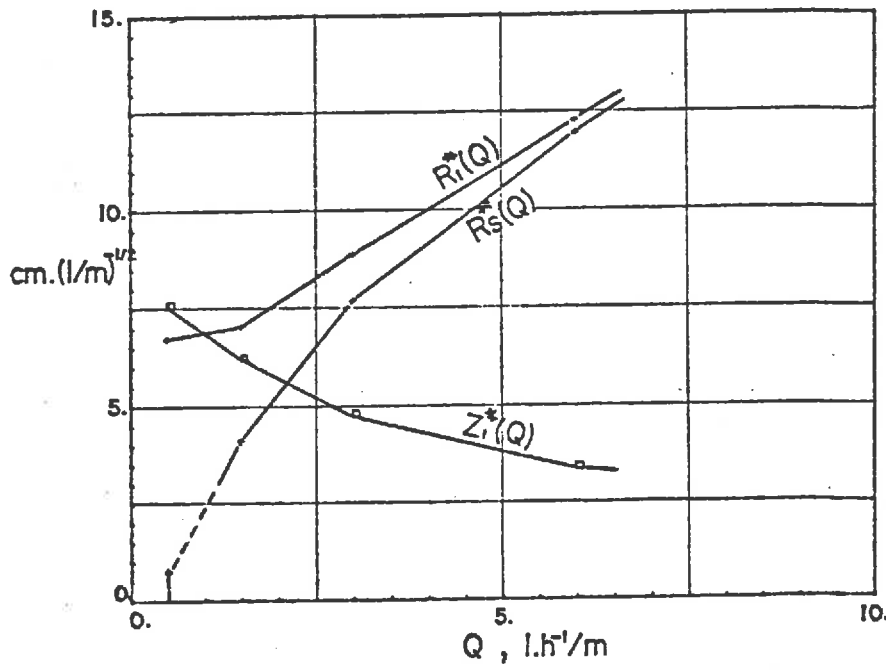


FIGURE 6

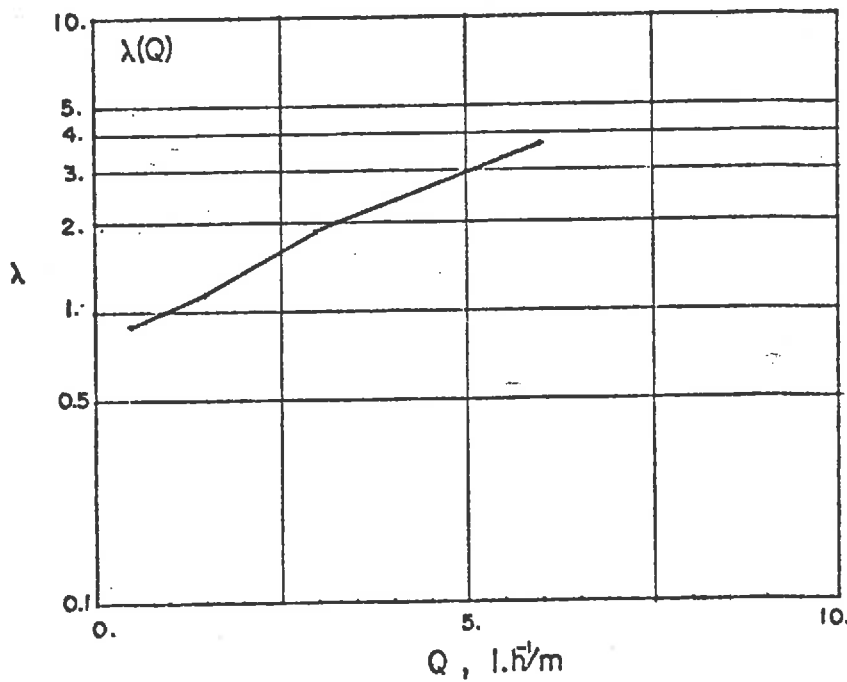


FIGURE 7

CHAPITRE III

ETUDE DE TRANSFERTS HYDRIQUES ET DE SOLUTES  
SUR SOL NU ET SOUS CULTURE DE MAIS

B. BLAVOUX, J. NOUGLIER, M. FRESLON

Centre Universitaire d'Avignon  
Laboratoire de Géologie  
33, rue Louis Pasteur  
84000 AVIGNON

## Résumé.

L'étude de la propagation de l'eau et des sels dans un sol de type loess sous climat méditerranéen a été entreprise à partir de Décembre 1978 à l'INRA d'AVIGNON dans des cuves expérimentales.

Des techniques de mesure complémentaires ont été utilisées (mesures d'humidité et de potentiel au moyen de sonde à neutrons et de tensiomètres, prélèvements d'eau par bougies poreuses pour analyses chimiques et isotopiques).

Une expérience de traçage Nitrate-Tritium sur cuve irriguée au goutte à goutte et cultivée en Maïs a montré que l'eau, à 20cm sous l'axe des plants, arrivait rapidement, mais assez mélangée, et que le bulbe d'irrigation était très localisé (demi-sphère de rayon compris entre 20 et 40cm. Cette technique semble donc particulièrement appropriée pour éviter les pertes en profondeur en eau et en sels.

L'étude de la propagation du signal "Pluie-Entrée" dans le sol au moyen de l'oxygène-18 montre un fort amortissement des amplitudes de variations avec la profondeur, et plus particulièrement dans les 60 premiers centimètres. La pluviométrie exceptionnelle d'Octobre 1979 après un été particulièrement sec, a permis d'obtenir un traçage très marqué.

Un mélange progressif avec l'eau évaporée s'est manifesté jusqu'à la saturation complète du sol. Le phénomène de Piston-Flow apparaît, lorsque l'eau très positive (résultats du mélange de l'eau évaporée avec les pluies successives) est poussée par les pluies très négatives de fin octobre, celles-ci apparaissant à 20cm après un délai de 2 mois.

Cette étude, dans un sol et sous climat très typés, a permis de mettre en évidence une technique d'irrigation garantissant à la fois une bonne gestion de l'eau et une utilisation complète des sels par la plante et de caractériser la vitesse de transit de l'eau, cette donnée étant particulièrement intéressante dans la prévention d'une propagation éventuelle de polluants vers la nappe.



## Table des Matières

### INTRODUCTION

#### 1° Partie : Conduite de la recherche

##### A - Equipement de terrain.

- 1) La cuve nue n°3 (planches 1, 2 et 3)
- 2) La cuve cultivée n°5 (planches 1, 4 et 5)
- 3) Les lysimètres (planche 6)

##### B - Techniques utilisées pour l'acquisition des données et pour les prélèvements d'eau.

- 1) Mesure de l'humidité.
- 2) Mesure de la pression hydraulique
- 3) Les prélèvements d'eau sur les cuves.
- 4) Les prélèvements d'eau sur les lysimètres
- 5) Les précipitations

##### C - Techniques d'analyse.

##### D - Calendrier des opérations.

#### 2° Partie : A - Traçage de l'irrigation au goutte à goutte sur la cuve cultivée en maïs au moyen des nitrates et du tritium.

- 1) Conditions de l'expérience
- 2) Résultats et observations
- 3) Interprétation et principales conclusions

#### B - Propagation du signal isotopique "Pluie-entrée" dans la cuve au sol nu.

- 1) Conditions de l'expérience
- 2) Amplitude des signaux isotopiques aux différentes profondeurs (figure 10)
- 3) La propagation du signal isotopique aux différents niveaux (figure 11)
  - a) Principales caractéristiques du signal Pluie
  - b) le marquage à l'évaporation
  - c) Propagation de la première impulsion négative de Décembre 1978 Janvier 1979
  - d) Les impulsions de saison chaude - Avril à Octobre 79
  - e) Propagation de la seconde impulsion négative d'Octobre 1979

### CONCLUSION.

## I N T R O D U C T I O N

Un projet initial de recherche intitulé "Evaluation de l'infiltration profonde des eaux d'irrigation à la nappe alluviale au moyen des isotopes de l'environnement" avait été transmis à la D.G.R.S.T. Ce projet n'ayant pas été retenu, une attribution correspondant au 1/4 de la 1ère demande nous a été cependant allouée pour participer à une action coordonnée élaborée à partir de plusieurs projets : les projets de M. GUENNELON (I.N.R.A. Avignon) de M. VACHAUD (Université de Grenoble) de M. COUCHAT (C.E.N. Cadarache) et de M. BERGER (C.E.P.E. Montpellier). Ces cinq recherches devaient se localiser sur un même site expérimental de la station des Sciences du Sol à Montfavet-Avignon. Ainsi compte tenu des besoins de chaque équipe un nouveau projet a pu être élaboré qui se proposait d'étudier les transferts hydriques dans un sol de type loess, sous climat méditerranéen à l'aide des traceurs chimiques et des isotopes de l'environnement. Il s'agissait plus particulièrement d'analyser la transformation du signal isotopique "Pluie-Entrée" et sa propagation soit en sol nu, soit en sol cultivé dans des cuves expérimentales et dans deux lysimètres.

La mise en place des dispositifs expérimentaux spécifiques à notre travail, le programme d'échantillonnage sur une période d'un cycle hydrologique complet et la réalisation des analyses chimiques et isotopiques ont été confiés à Maurice FRESLON, étudiant de 3ème cycle, des Sciences de l'Eau (Paris 6) qui présentera une thèse sur les résultats complets de cette opération à la fin de 1980.

Les dispositifs expérimentaux utilisés ainsi que les résultats disponibles à ce jour sont décrits dans ce rapport. Aidés par les conditions météorologiques très favorables qui nous ont ménagé un automne 1979 très pluvieux après une année exceptionnellement sèche, nous observons la propagation dans le sol de signaux hydriques naturels parfaitement contrastés dont l'interprétation ne fait que commencer. Pour mener à terme ce programme analytique qui dépasse de beaucoup l'enveloppe initiale et les moyens de nos laboratoires, une aide complémentaire serait nécessaire notamment pour faire effectuer des analyses de deutérium permettant de préciser l'importance des phénomènes d'évaporation et la profondeur à laquelle ils se manifestent dans ce sol de loess soumis au climat méditerranéen.

## PREMIERE PARTIE

### CONDUITE DE LA RECHERCHE

#### A - EQUIPEMENT DE TERRAIN.

On dispose à l'I.N.R.A. Montfavet de deux cuves expérimentales et de deux lysimètres dont les caractéristiques géométriques sont précisées sur les planches en annexe (1 à 6).

Le sol de remplissage est un loess dont les caractéristiques physiques et minéralogiques ont été définies à l'I.N.R.A. et qui a été étudié dans son contexte géologique à Collias (Gard) par M. FRESLON. Le remplissage des cuves s'est fait sous l'eau tandis que celui des lysimètres a été réalisé à sec.

#### 1) La cuve n° 3 (planches 1, 2 et 3).

Elle est équipée d'un tube central de sonde à neutrons, de 2 séries (Z et Y) de 5 bougies poreuses placées de part et d'autre du tube à 20, 40, 60, 100 et 140 cm de profondeur, fonctionnelles depuis Décembre 1978 et d'une batterie de 6 tensiomètres verticaux installés en Octobre 1979 aux profondeurs de 20, 40, 60, 80, 100 et 125 cm. Une bougie verticale à 12 cm a été également ajoutée au dispositif en Octobre 1979. Cette cuve sans fond est soumise aux précipitations naturelles.

#### 2) La cuve cultivée n° 5 (planches 1, 4 et 5).

L'équipement très complet de cette cuve avec 5 tubes pour les mesures à la sonde à neutrons et 15 tensiomètres a été disposé en fonction des plants de maïs et de leur dispositif d'irrigation au goutte à goutte. La cuve cultivée est recouverte d'un tunnel plastifié la protégeant des précipitations mais qui la laisse soumise à l'évapotranspiration. L'équipement spécifique à notre étude est constitué par des bougies poreuses implantées de manière à former un bulbe autour d'un plant de maïs avec des gradients vertical et horizontal.

#### 3) Les lysimètres (planche 6).

Tous les 2 soumis aux précipitations l'un est en sol nu, l'autre recouvert de gazon.

## B - TECHNIQUES UTILISEES POUR L'ACQUISITION DES DONNEES ET POUR LES PRELEVEMENTS D'EAU.

Etant donné le volume limité des cuves, les techniques de mesure de l'humidité, de la charge hydraulique, de la composition de la solution du sol reposent sur des procédés non destructifs.

### 1) Mesure de l'humidité.

Elle est obtenue à l'aide d'une sonde neutronique. Deux types d'appareil sont à notre disposition, une sonde N.E.A. et une sonde H.P 310. L'erreur faite sur la mesure est d'environ 0,5 % de l'humidité volumique. Il a été montré d'autre part que la sphère d'influence de la N.E.A. (R = 20 cm) était supérieure à celle de la H.P. 310.

### 2) Mesure de la pression hydraulique.

On utilise des tensiomètres horizontaux ou verticaux reliés à un manomètre à mercure et des tensiomètres à capteur de pression moins précis ( $\pm 10$  mbars) mais d'un emploi plus facile.

### 3) Les prélèvements d'eau sur les cuves.

Les cannes prolongeant les bougies poreuses font un angle de  $10^\circ$  environ avec l'horizontale de manière à permettre l'écoulement gravitaire de l'eau vers le flacon d'échantillonnage (planche 7). En se rapportant à une courbe  $\psi$  ( $\theta$ ) établie en laboratoire on a une bonne indication des tensions in situ. Pour extraire l'eau du sol on doit appliquer une dépression supérieure à celle indiquée par le tensiomètre correspondant ou, à défaut de mesure tensiométrique, à celle correspondant à l'humidité mesurée. Afin de prélever toujours le même type d'eau, nous avons échantillonné à une pression de 300 mbars correspondant à 20 % d'humidité volumique. Ces conditions permettent d'extraire de l'eau pendant une grande partie de l'année mais en saison sèche nous avons opéré sous 400 mbars sans jamais aller au-delà. Les échantillons prélevés dans les premiers centimètres sont donc peu nombreux en été.

La durée de la dépression appliquée se limite, soit au remplissage du flacon de prélèvement de 20 cc, soit dans les conditions défavorables à un temps maximum de 8 heures pour éviter de faire intervenir de l'eau trop éloignée de la bougie. La durée moyenne a été de 6 heures. La sphère de volume prélevée est alors

limitée à 5 cm de rayon mais la sphère d'influence peut être plus importante et donc créer quelques perturbations locales. Une expérience avec tensiomètres et bougies est envisagée pour déterminer cette sphère d'influence. Les tuyaux des cannes aboutissent par l'intermédiaire de robinets individuels à un collecteur permettant de faire communiquer telle ou telle canne avec la pompe (planche 7). La pompe utilisée est une pompe électrique péristaltique très pratique d'emploi.

#### 4) Les prélèvements d'eau sur les lysimètres.

Une légère pente du fond permet l'écoulement de l'eau vers une crépine puis dans un bidon réceptacle de 30 litres. Sur le lysimètre A, un enregistreur de débit (enregistreur de pluviographe à augets basculants) est interposé entre la sortie d'eau du lysimètre et le bidon.

#### 5) Les précipitations.

Deux pluviomètres association de 400 cm<sup>2</sup> de surface collectrice sont installés sur le site expérimental. Les précipitations hebdomadaires interceptées par un pluviomètre sont stockées dans un récipient enterré et fermé pour éviter l'évaporation. Les averses d'un montant supérieur à 5 mm sont prélevées directement sur le second pluviomètre. Les autres paramètres climatiques sont fournis par la station de bioclimatologie de Montfavet (I.N.R.A.).

### C - TECHNIQUES D'ANALYSE.

Les analyses chimiques ont été effectuées au laboratoire de la Faculté des Sciences d'Avignon :

- Les éléments majeurs par absorption atomique (I.L. 257),
- Les sulfates, nitrates, chlorures par colorimétrie (Cecil 292)
- Les bicarbonates par volumétrie.

Les analyses de nitrates sur les faibles volumes d'eau (20 cc) recueillis lors des expériences de traçage ont été effectuées à l'I.N.R.A. à l'aide d'une électrode spécifique.

Les analyses isotopiques ont été faites au Centre de Recherches Géodynamiques de Thonon.

- L'oxygène 18, isotope stable de la molécule d'eau, sur un spectromètre de masse Varian CH-7, après équilibration avec CO<sub>2</sub>,

- Le tritium ( $^3\text{H}$ ) par comptage direct en scintillation liquide sur un compteur Nucléar-Chicago, le volume de l'échantillon ne permettant pas un enrichissement par électrolyse.

#### D - CALENDRIER DES OPERATIONS.

Le calendrier des expériences réalisées est détaillé sur la planche 8 en annexe. Toutes ces expériences seront développées dans la thèse de M. FRESLON. Seuls les résultats du traçage sur la cuve 5 au moyen du tritium et des nitrates, introduits par le goutte à goutte lors de l'irrigation du maïs et ceux de l'étude de la propagation du signal Pluie naturel (oxygène 18) dans la cuve 3 à sol nu sont présentés ci-après.

## DEUXIEME PARTIE

### ANALYSE ET INTERPRETATION DES RESULTATS DES TRACAGES

#### A - TRACAGE DE L'IRRIGATION AU GOUTTE A GOUTTE SUR LA CUVE CULTIVEE EN MAIS AU MOYEN DES NITRATES ET DU TRITIUM.

Le maïs a été planté en Juin 1979 sur la cuve n° 5 décrite précédemment et soumis à partir du 10 Juillet à une irrigation au goutte à goutte 2 fois par semaine. Les apports dont la qualité a été contrôlée, sont restés constants pendant tout le stade végétatif et égaux à la moitié de l'ETP calculée par la formule de Gerbier et Brochet.

L'analyse des transferts hydriques en utilisant les résultats de la sonde et des tensiomètres ainsi que leur modélisation incombait aux équipes de l'I.N.R.A. et de Grenoble. Dans le cadre de notre programme, nous avons effectué un double traçage, au moyen du tritium pour suivre le trajet de l'eau et au moyen des nitrates pour étudier la propagation et l'utilisation de cet élément nutritif.

##### 1) Conditions de l'expérience.

L'expérience s'est poursuivie du 20 au 31 Août 1979 pendant le développement maximum du maïs. Elle a consisté à l'injection par le goutte à goutte de 10 l d'eau tritiée à 55 000 UT et contenant 980 mg/l de  $\text{NO}_3^-$ , le 20 Août à 10 h. Cet apport s'est effectué sur le plant de maïs situé dans l'axe du bulbe constitué par les bougies poreuses. Une irrigation au goutte à goutte s'est effectuée ensuite normalement le 20 Août à 15 h (20 l), le 21 Août (40 l), le 23 Août (28 l), le 24 Août (22 l) et le 28 Août (50 l) avec une eau de nappe contenant 70 UT et 16 mg/l de  $\text{NO}_3^-$ . Des prélèvements horaires puis journaliers ont été effectués sur toutes les bougies poreuses.

##### 2) Résultats et observations.

Tous les résultats analytiques ( $\text{NO}_3^-$  et  $^3\text{H}$ ) sont reportés dans le tableau 1 en annexe.

Les courbes de la figure 9 montrent l'évolution des concentrations dans les deux bougies directement à la verticale du plant arrosé à 20 cm et 40 cm de profondeur. Sur les autres bougies latérales ou plus profondes aucune répercussion

du traçage n'a pu être mise en évidence pendant cette même période (voir tableau des résultats).

L'eau tritiée et le sel arrivent très rapidement en B<sub>1</sub> à une profondeur de 20 cm, quelques heures après l'injection.

Le maximum de concentration observé est très inférieur à la concentration initiale de l'eau marquée, 4 fois moins environ.

Une très légère arrivée d'eau tritiée et de nitrates est perceptible deux jours après l'injection à 40 cm de profondeur.

Les deux courbes de restitution présentent des caractères différents : une montée plus rapide et plus importante des concentrations en nitrates, une persistance plus grande des fortes teneurs en tritium alors que les concentrations en nitrates diminuent très rapidement.

### 3) Interprétation et principales conclusions.

Cette étude a montré que le bulbe créé par l'irrigation au goutte à goutte est très localisé avec un rayon compris entre 20 et 40 cm. Ces résultats confirment ceux des chercheurs de l'I.N.R.A. et prouvent que ce type d'irrigation est très efficace avec une bonne utilisation à la fois de l'eau et des sels, sans pertes en profondeur.

Les vitesses de l'eau avec sa minéralisation sont rapides comparées à celles qui seront obtenues sur la cuve nue. Elles indiquent le cheminement préférentiel de l'eau par des microfissures dans la zone du bulbe créés par les humidifications successives après les périodes de retrait<sup>(\*)</sup> et (surtout) par le développement des racines du maïs; mais il faut surtout prendre en compte les forts gradients de potentiel qui règnent dans cette zone racinaire.

Néanmoins, les mélanges sont déjà importants entre l'eau préexistante et les apports successifs.

Enfin, le comportement du tritium est très légèrement différent de celui des nitrates. La vitesse modale des nitrates (0,4 cm/h) est plus grande que celle

---

(\*) La redistribution de l'eau après irrigation est en effet rapide et de l'ordre de la journée.



du tritium (0,3 cm/h), bien que ce dernier soit le marqueur type de la molécule d'eau. Cette anomalie déjà mentionnée dans d'autres études de traçage demandera une étude approfondie. Il peut s'agir ici d'une absorption préférentielle du maïs dans la zone racinaire.

On remarquera que l'azote est consommé plus rapidement que l'eau tritiée dans les conditions de l'expérience avec les concentrations et les quantités d'eau d'arrosage qui ont été choisies.

## B - PROPAGATION DU SIGNAL ISOTOPIQUE "PLUIE-ENTREE" DANS LA CUVE AU SOL NU.

### 1) Conditions de l'expérience.

La récolte des précipitations et l'analyse de leur teneur en oxygène-18 (isotope stable de la molécule d'eau) permet de définir un signal naturel bien contrasté avec les saisons. Cette étude a commencé en Décembre 1978. Des prélèvements d'eau hebdomadaires ou plus fréquents lors d'évènements hydrologiques sont effectués dans la cuve à sol nu à différents niveaux par l'intermédiaire des bougies poreuses. Leur teneur en oxygène-18 est analysée de façon à étudier la propagation du signal météorique et sa transformation en profondeur. Ces opérations ont été également commencées en Décembre 1978 et se poursuivent encore actuellement. La verticale (Z) de 5 bougies a plus particulièrement été étudiée mais des comparaisons sont faites avec l'autre verticale (Y). Plus de 500 analyses d' $^{18}\text{O}$  ont été ainsi effectuées. Les principaux résultats sont figurés sur les planches 10 et 11 fournies en annexe.

### 2) Amplitude des signaux isotopiques aux différentes profondeurs (figure 10).

L'amplitude des variations en oxygène-18 de la pluie en 1979 est particulièrement élevée et atteint près de  $16 \delta^{18}\text{O} \text{ ‰}$  pour l'ensemble des pluies et  $12,5 \delta \text{ ‰}$  si l'on ne considère que les grosses averses d'un montant supérieur à 10 mm. On rappellera que l'incertitude sur un dosage d'oxygène-18 est égale à  $\pm 0,1 \delta \text{ ‰}$  et que l'on a donc un signal météorique très contrasté.

Sur le profil Z l'amplitude des variations en oxygène-18 de l'eau d'infiltration est déjà réduite à  $4,7 \delta \text{ ‰}$  dès 20 cm de profondeur. Elle décroît très rapidement à  $2,7 \delta \text{ ‰}$  à 40 cm et  $1,6 \delta \text{ ‰}$  à 60 cm. L'amortissement de ce signal à l'infiltration est moins prononcé au-delà de cette profondeur (1  $\delta$  de variation à 140 cm de profondeur).

Sur le profil Y les amplitudes du signal infiltration sont encore plus faibles ; 2,5 ‰ à 20 cm et 0,5 ‰ à 140 cm. Bien qu'encore incomplets, ces résultats montrent qu'il existe une hétérogénéité importante à l'échelle de la case, latéralement.

L'important amortissement du signal "Pluie" jusqu'à une profondeur de 60 cm environ implique des mélanges dans cette zone et donc <sup>des</sup> phénomènes de dispersion prépondérants. Des forts gradients de potentiel certainement inversés lors des périodes à forte évaporation et des infiltrations rapides dans les microfissures sont les principaux responsables de ce phénomène. Au-delà de 60 cm ce sont les circulations gravitaires qui prédominent. C'est le domaine des écoulements type "piston" où la diffusion joue un rôle important.

### 3) La propagation du signal isotopique aux différents niveaux (figure 11).

#### a) Principales caractéristiques du signal Pluie.

On sait que la teneur en oxygène-18 des précipitations est grossièrement fonction de la température au sol mais aussi de l'origine des masses d'air et de l'intensité de l'averse et donc du type de temps. Pour qu'une averse ou une série d'averses constituent un bon marqueur il faut non seulement que leur composition s'écarte de la teneur moyenne des eaux du sol mais aussi que la quantité précipitée soit suffisamment importante pour constituer une impulsion.

L'étude du signal "Pluie" à Avignon de Décembre 1978 à Janvier 1980, montre que les conditions d'un bon traçage sont réunies sous ce climat méditerranéen. Les pluies abondantes en Décembre 1978 et Janvier 1979 avec des teneurs basses en  $^{18}\text{O}$  (valeurs négatives voisines de  $- 11 \text{ ‰}$ ), les fortes précipitations d'Octobre 1979 avec des valeurs basses suivies de celles de Décembre 1979 avec des teneurs très basses ( $- 15 \text{ ‰}$ ) constituent des impulsions négatives remarquables et l'essentiel de l'infiltration. A l'inverse quelques violents orages d'été comme celui de Juillet 1979 avec une teneur en  $^{18}\text{O}$  de  $- 3,7 \text{ ‰}$  constituent des signaux positifs (par rapport à la moyenne) très localisés et survenant en saison sèche. Leur pénétration dans le sol est importante à étudier.

#### b) Le marquage à l'évaporation.

Les eaux qui ont subi une évaporation sont enrichies en isotopes lourds (oxygène-18 et deutérium) par rapport aux eaux météoriques qui n'y ont pas été soumises. Certaines eaux prélevées dans les premiers centimètres du sol pourront ainsi par évaporation acquérir des teneurs en oxygène-18 élevées qui peuvent être

confondues avec celles des précipitations estivales plus lourdes. Toutefois le doute n'est plus permis si l'on effectue l'analyse du couple oxygène-18 - deutérium. En effet, les teneurs en  $^{18}\text{O}$  et  $^2\text{H}$  des précipitations sont corrélées linéairement suivant l'équation :  $\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + b$  (CRAIG, 1961). La bonne constance de la pente de 8, vérifiée pour toutes les précipitations du globe est due au fait que la condensation est un phénomène qui se produit à l'équilibre.

L'évaporation est par contre toujours un phénomène cinétique complexe. Dans un même environnement climatique des eaux qui ont subi différents degrés d'évaporation présentent toujours une corrélation linéaire entre leurs teneurs en  $^{18}\text{O}$  et  $^2\text{H}$  mais avec une pente plus faible que la droite météorologique ( $3 < a < 8$ ). Elles sont donc parfaitement identifiables sur un diagramme  $\delta^{18}\text{O} - \delta^2\text{H}$  car elles se situent à droite et en dessous de la droite météorologique (planche 12).

c) Propagation de la première impulsion négative de Décembre 1978 - Janvier 1979.

La première impulsion négative constituée par les pluies de fin Décembre 78 et début Janvier 79 (teneur - 11  $\delta$ ) a un premier effet inverse au niveau de la bougie à 20 cm puisqu'elle fait monter la teneur de l'eau du sol de - 7,5  $\delta$  à - 6,4  $\delta$ . Il faut donc considérer que ce sont d'abord les eaux de rétention de la tranche supérieure ayant subi une longue évaporation estivale qui sont poussées par les pluies négatives d'un montant de 120 mm. Un certain mélange doit déjà s'effectuer mais l'impulsion négative n'est sensible qu'à la fin Janvier à 20 cm soit 4 semaines après. Le même signal très amorti est également perçu à 40 cm et à 60 cm. L'impulsion négative s'y manifeste fin Mars à 40 cm soit 3 mois après et vers la mi-Avril à 60 cm.

d) Les impulsions de saison chaude - Avril à Octobre 79.

Chaque événement hydrologique important engendre à 20 cm une perturbation minime et rapide de la teneur isotopique de l'eau, sous forme de pics toujours positifs. Il s'agit encore de l'arrivée d'eaux de la tranche superficielle enrichies en oxygène-18. Elles sont probablement mélangées avec l'eau de pluie qui vient de tomber. La reconstitution de l'histoire de ces molécules d'eau est difficile en l'absence de dosages de deutérium.

Ces pics positifs apparaissent parfois à 40cm mais jamais au-delà. Les teneurs moyennes restent d'autre part assez négatives et un enrichissement par évaporation n'est pas décelable à 40 cm. Déjà à 20 cm dans le loess il semble que les tendances à l'enrichissement en oxygène-18 de l'eau soient la résultante de mouvements descendants et non pas un phénomène d'évaporation se développant à ce niveau.

e) Propagation de la seconde impulsion négative d'Octobre 1979.

Cette impulsion est plus complexe car elle débute par de fortes précipitations à teneur en  $^{18}\text{O}$  (- 7,8  $\delta$ ) proches de la moyenne des eaux du sol, mais elle se poursuit fin Octobre par de très fortes précipitations (73 mm) à teneur en  $^{18}\text{O}$  basse (- 11,0  $\delta$ ). Elle déclenche cependant à 20 cm un enrichissement progressif et très important de l'eau du sol qui atteint une concentration de - 4,2  $\delta$  ‰ à la fin Octobre. Comme lors de la 1ère recharge hivernale il ne peut s'agir que des eaux de la tranche supérieure enrichies par évaporation qui sont chassées vers le bas. Après un palier dû à la sécheresse de Novembre (19 mm), les pluies d'automne sont repérables à 20 cm à la fin Décembre et l'impulsion négative qui se manifeste encore le 20 Janvier est particulièrement marquée.

A 40 et 60 cm de profondeur la montée des teneurs est un peu amortie mais bien visible. Le signal négatif n'est pas encore apparu mais les prélèvements se poursuivent pour essayer de saisir la totalité du phénomène et voir s'il sera encore perceptible aux niveaux 100 et 140 cm.

## CONCLUSION

L'aide apportée par la D.G.R.S.T. aux 5 projets coordonnés sur le site de l'I.N.R.A. à Avignon a permis la mise en place et le rodage de dispositifs expérimentaux complets et originaux. Il s'agit de 2 cases sans fond équipées de tubes de sonde à neutrons, de tensiomètres et de bougies poreuses permettant des mesures d'humidité, de charges hydrauliques et de la composition de la solution du sol par des procédés non destructifs. Ces installations ont été complétées par deux lysimètres. Elles pourront servir à d'autres expérimentations très souhaitables. Cette étude a permis en outre la collaboration d'équipes ayant des objectifs différents travaillant à des échelles différentes et utilisant des techniques complémentaires. Cette première confrontation a été très profitable.

Le traçage de l'irrigation au goutte à goutte sur la cuve cultivée en maïs au moyen d'une solution tritiée avec des nitrates a montré que le bulbe ainsi créé est très localisé avec un rayon de 20 à 40 cm. Dans cette zone les vitesses de l'eau avec sa minéralisation sont rapides bien que les mélanges entre l'eau préexistante et les apports successifs soient importants. Dans les conditions de l'expérience, la bonne utilisation de l'eau et des engrais azotés a été vérifiée puisqu'il n'a pas été constaté de pertes en profondeur. Ces expériences devront être reprises avec d'autres paramètres pour mieux cerner les risques de pollution des nappes alluviales par les engrais.

L'analyse de la propagation dans la cuve au sol nu du signal isotopique naturel constitué par les teneurs en oxygène-18 de la pluie est également pleine d'intérêt. Un signal météorique très contrasté a été défini. L'important amortissement de ce signal "Pluie" jusqu'à une profondeur de 60 cm implique des mélanges prépondérants dans cette zone superficielle soumise à de forts gradients de potentiel. Les phénomènes de dispersion y sont importants mais ne sont pas suffisants pour oblitérer totalement le signal pluie. Des déplacements d'eau évaporée, enrichie en isotopes lourds dans les premiers centimètres ont été mis en évidence. Ils supposent un mécanisme de "Piston percé" de la pluie qui s'infiltrer sur les eaux de rétention du loess. Au-delà de 60 cm ce sont les circulations gravitaires qui prédominent. C'est le domaine des écoulements type "Piston simple" où la diffusion joue un rôle important.

Sur l'étude très précise de ces phénomènes repose la compréhension du transfert des minéralisations dans la zone non saturée sous climat méditerranéen. Tous nos résultats doivent encore être dépouillés en fonction de tous les paramètres physiques mesurés sur le site. Pour traiter l'important stock d'échantillons récoltés et à venir pour le dernier cycle hydrologique, pour faire analyser le deutérium sur 50 échantillons afin de cerner les phénomènes d'évaporation, un complément d'aide est sollicité de la D.G.R.S.T.

Fig. Vue generale du cadre de l'étude

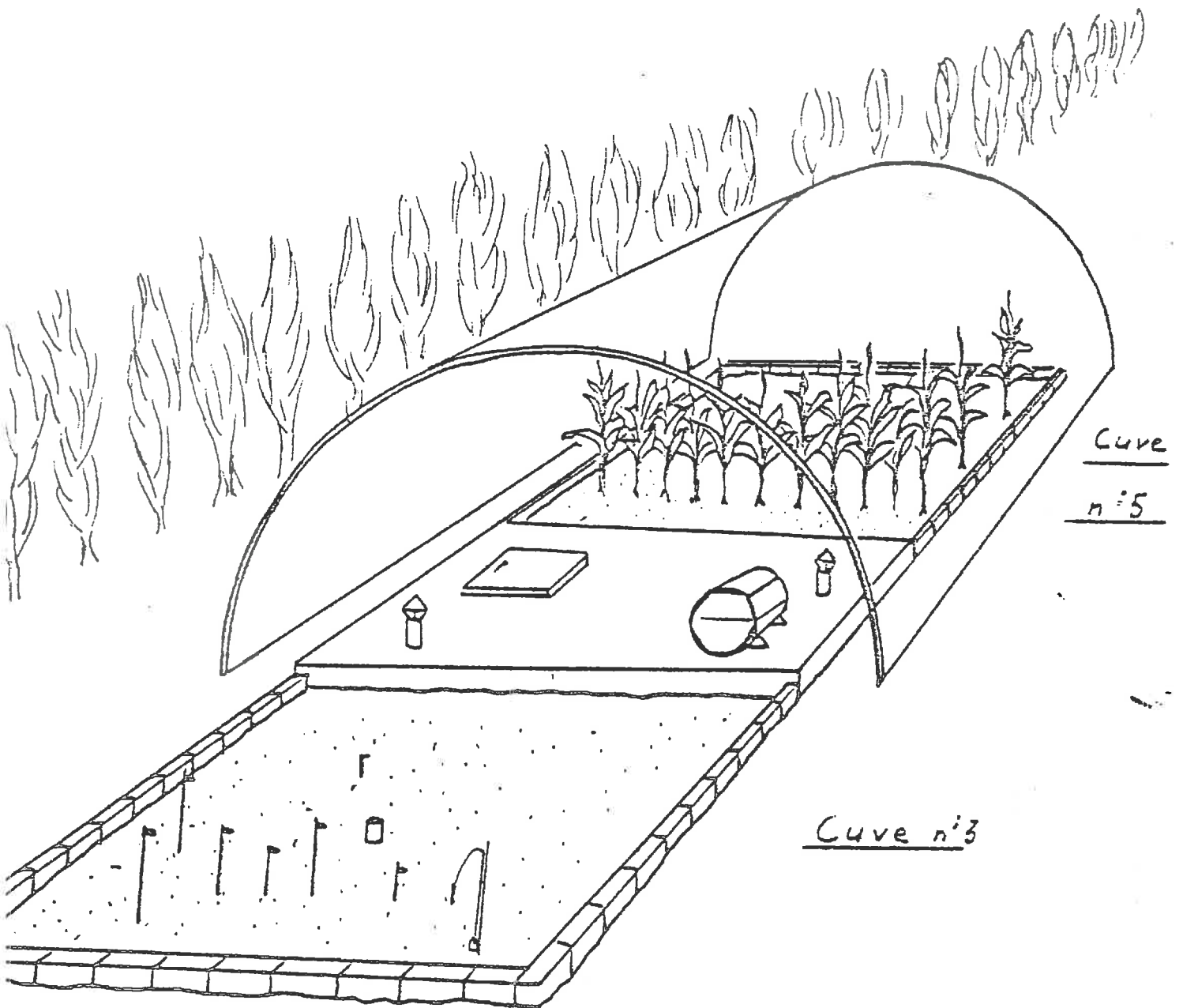
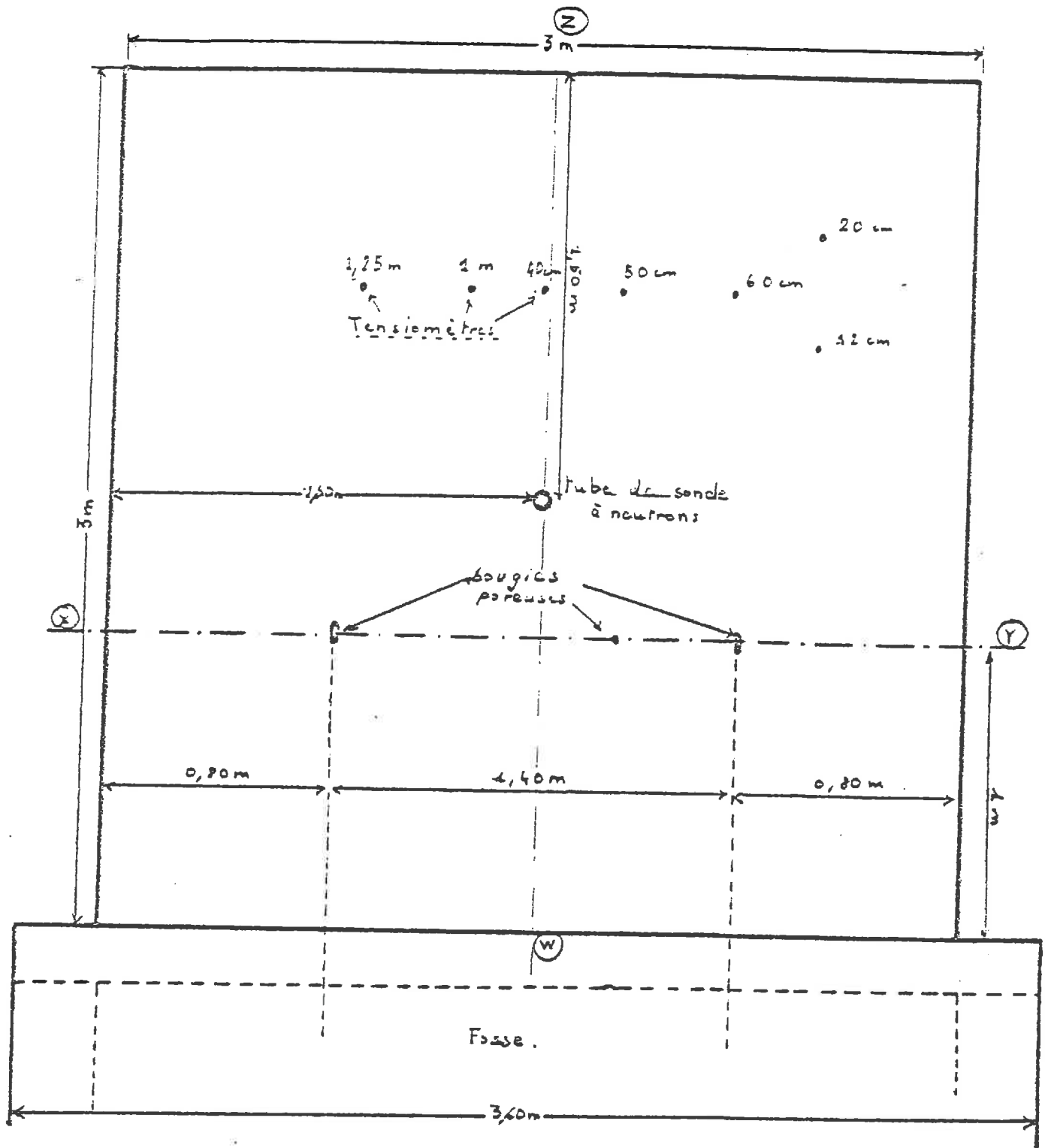


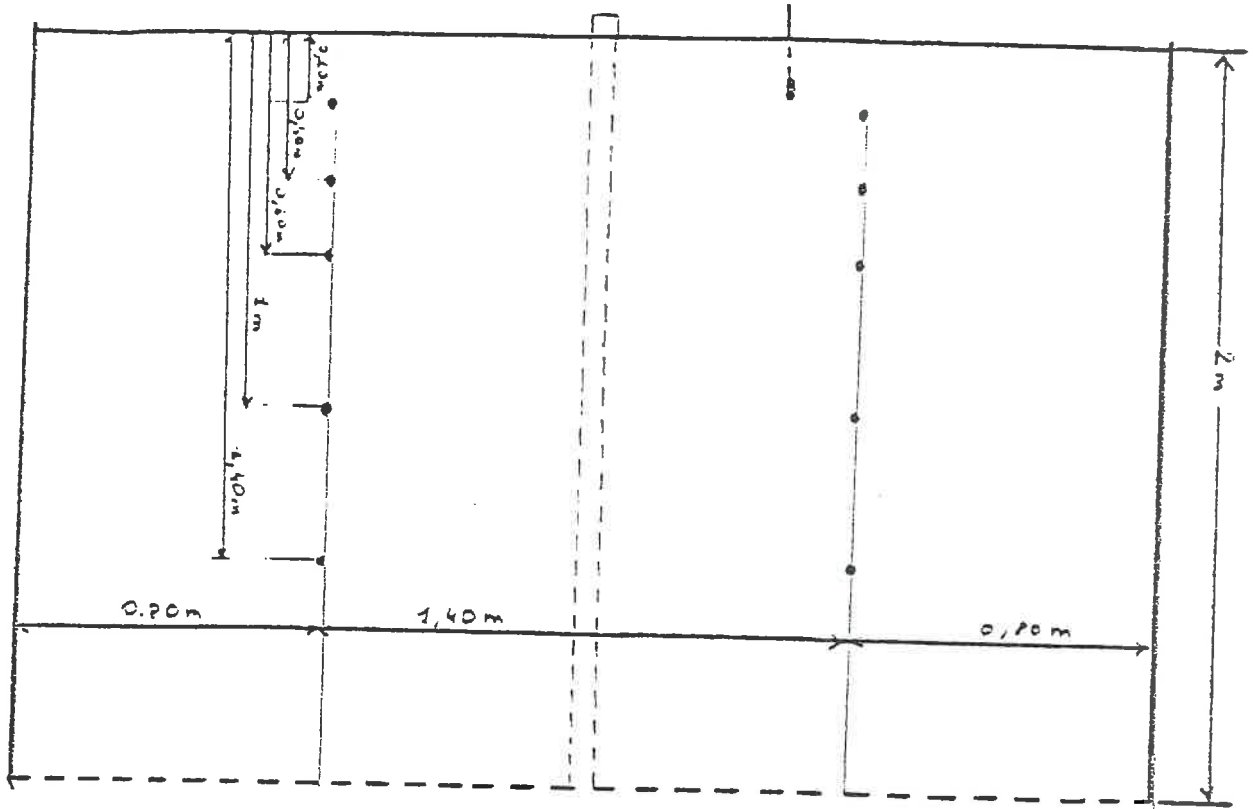
Fig2: Cuve sol n° 3

Echelle 1/20

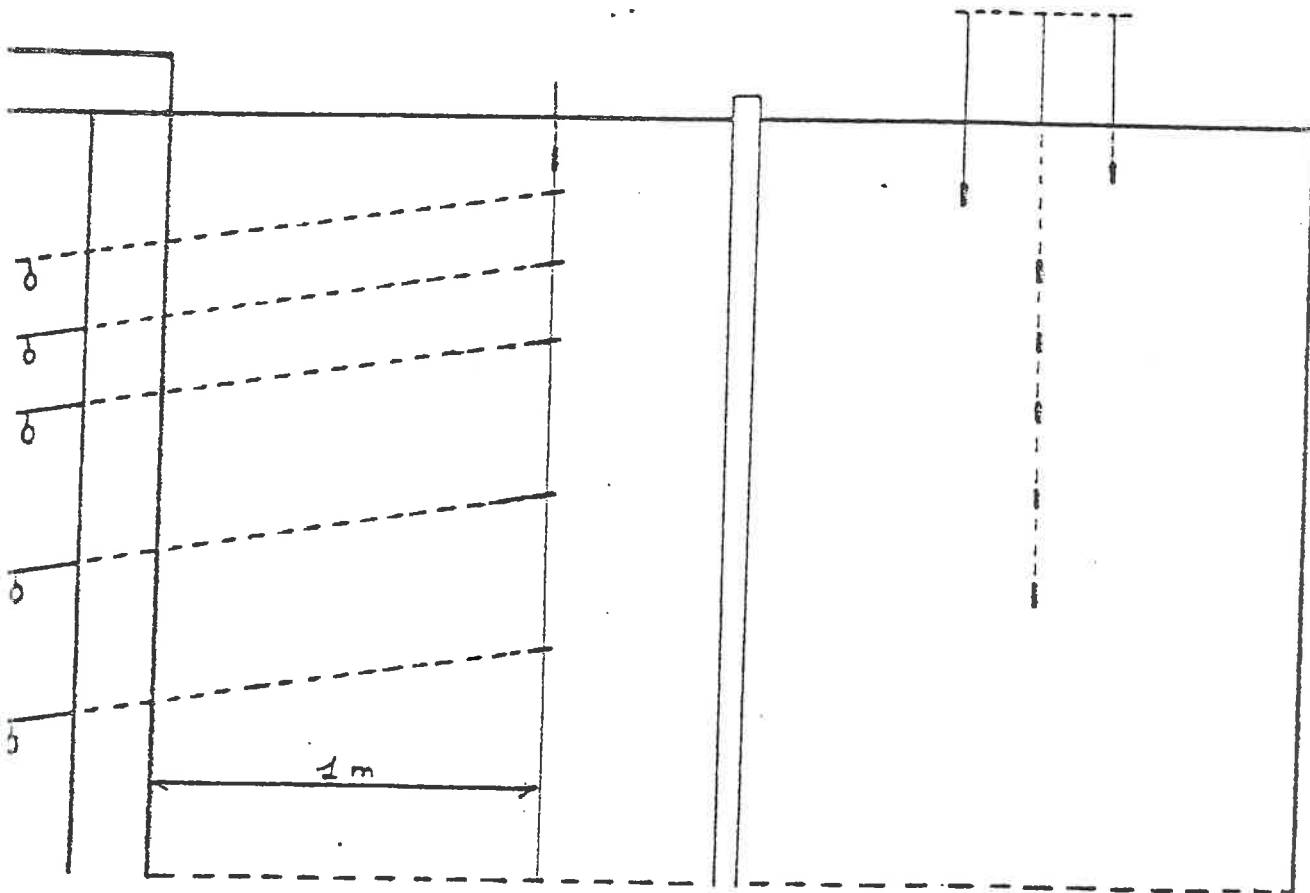


Vue de dessus





Coupe dans le plan (X-Y)

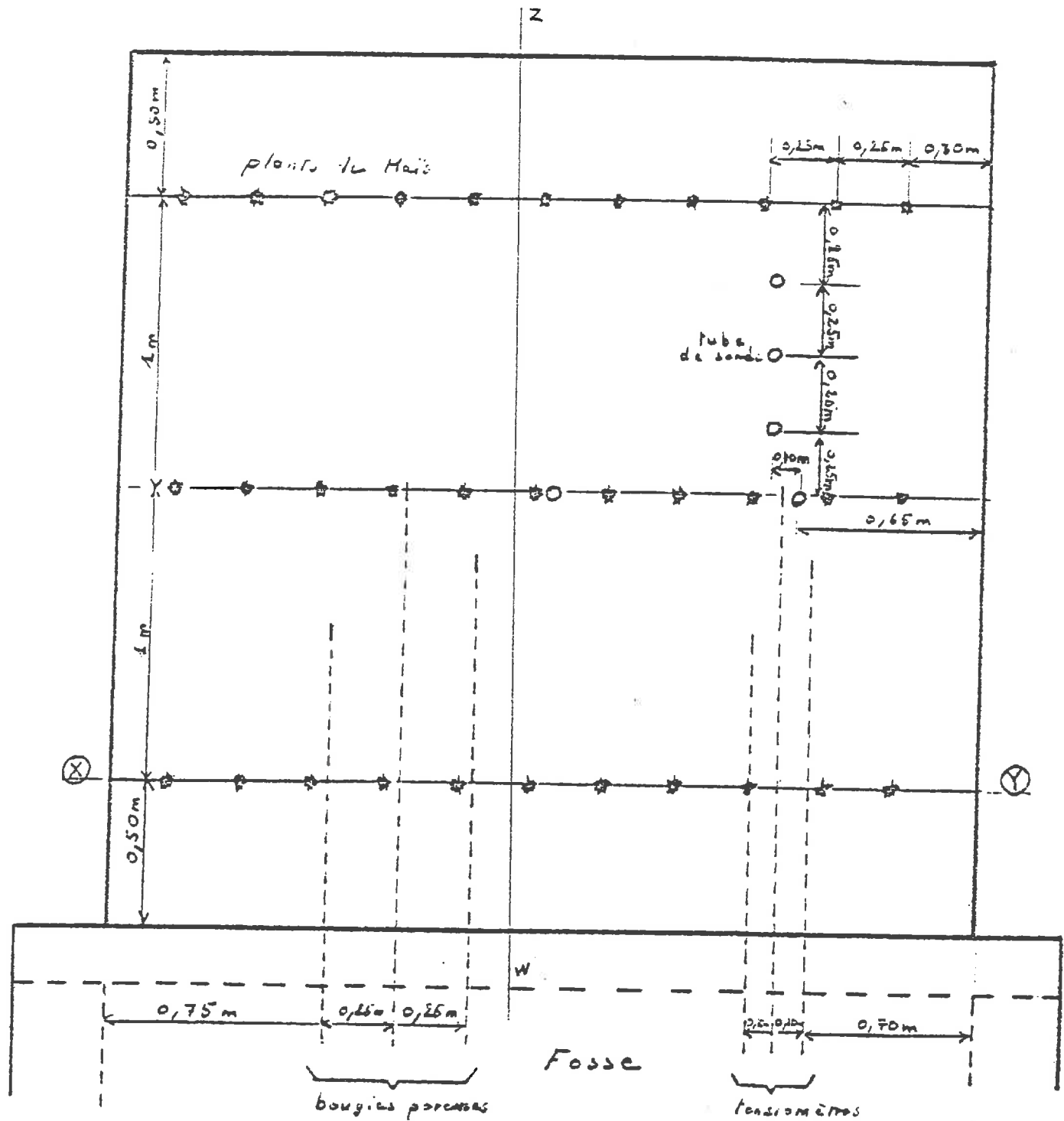


Coupe dans le plan (Z-W)

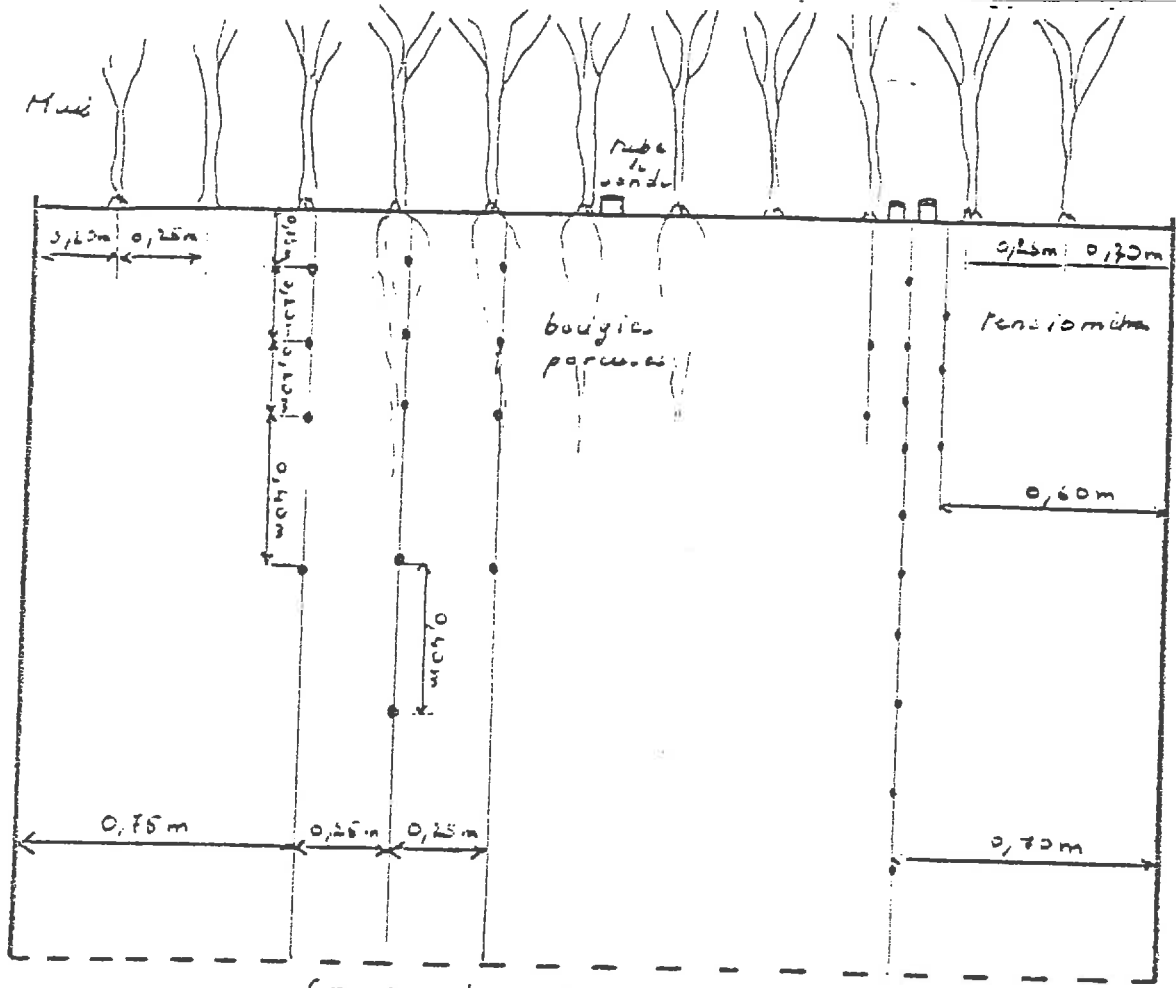
Fig. Cuve plantée de Maïs n° 5

④

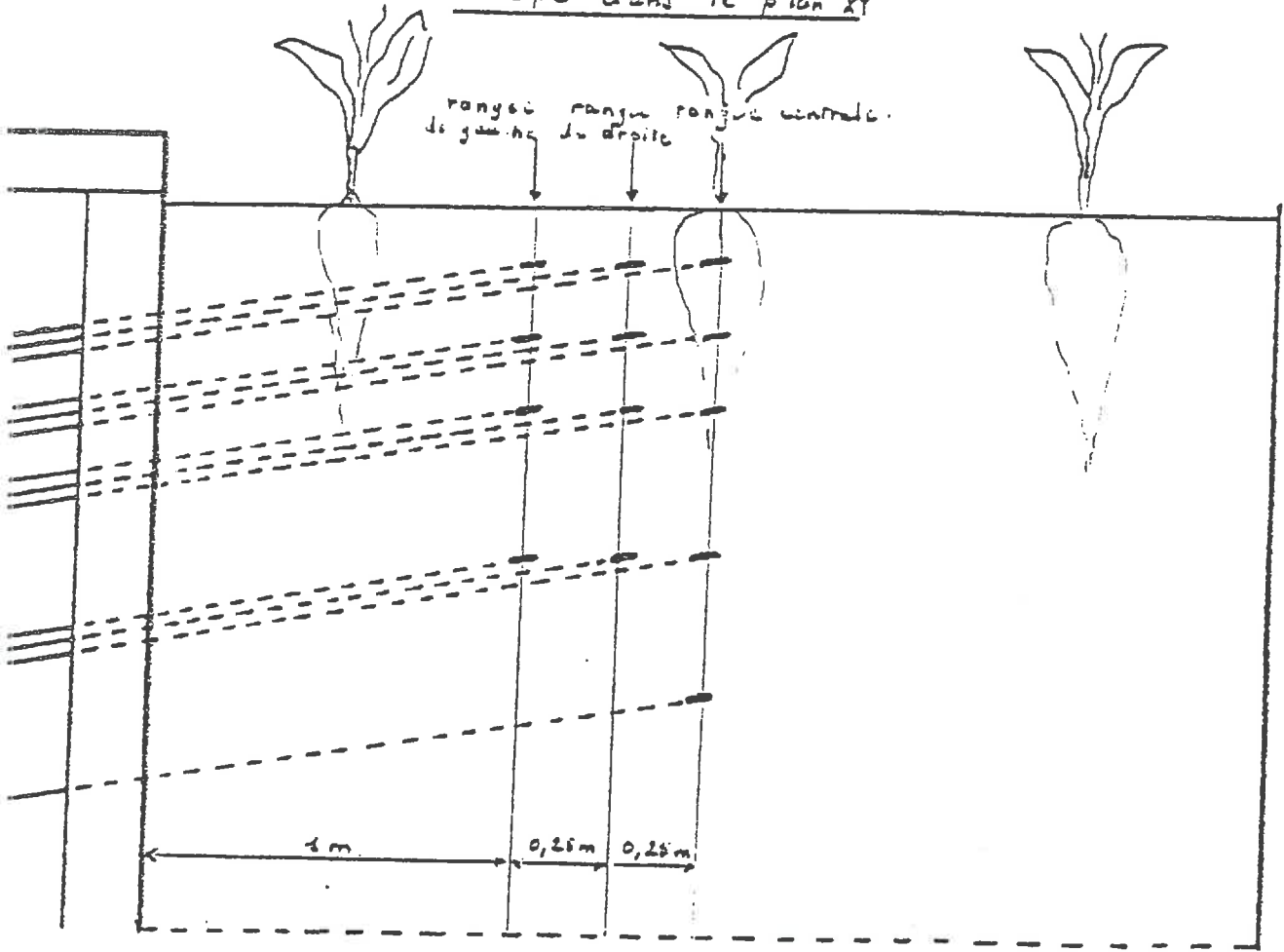
Echelle 1/10



Vue de dessus



Coupe dans le plan XY

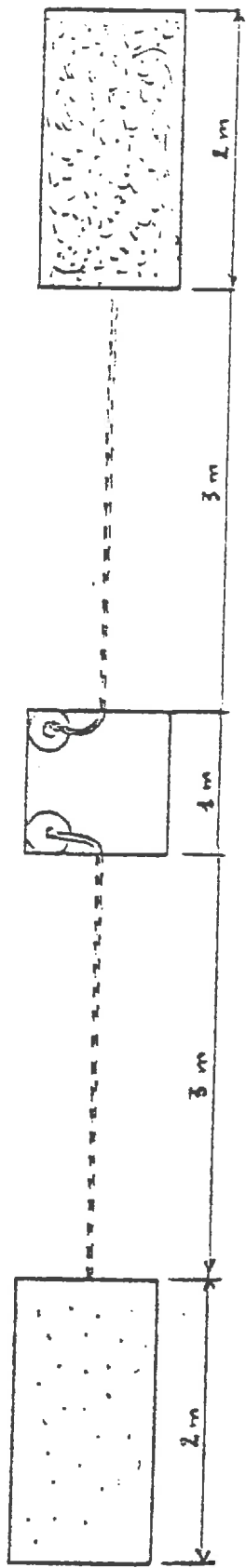


Coupe dans le plan ZW

Fig 5 Cuve plantée n°5.

Fig. 6. Emplacement des lysimètres (Échelle 1/60.)

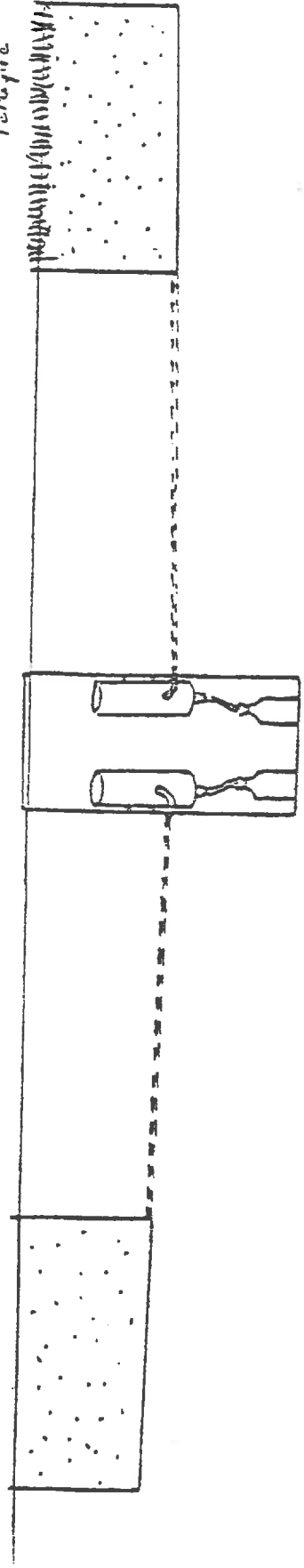
(B)



(A)

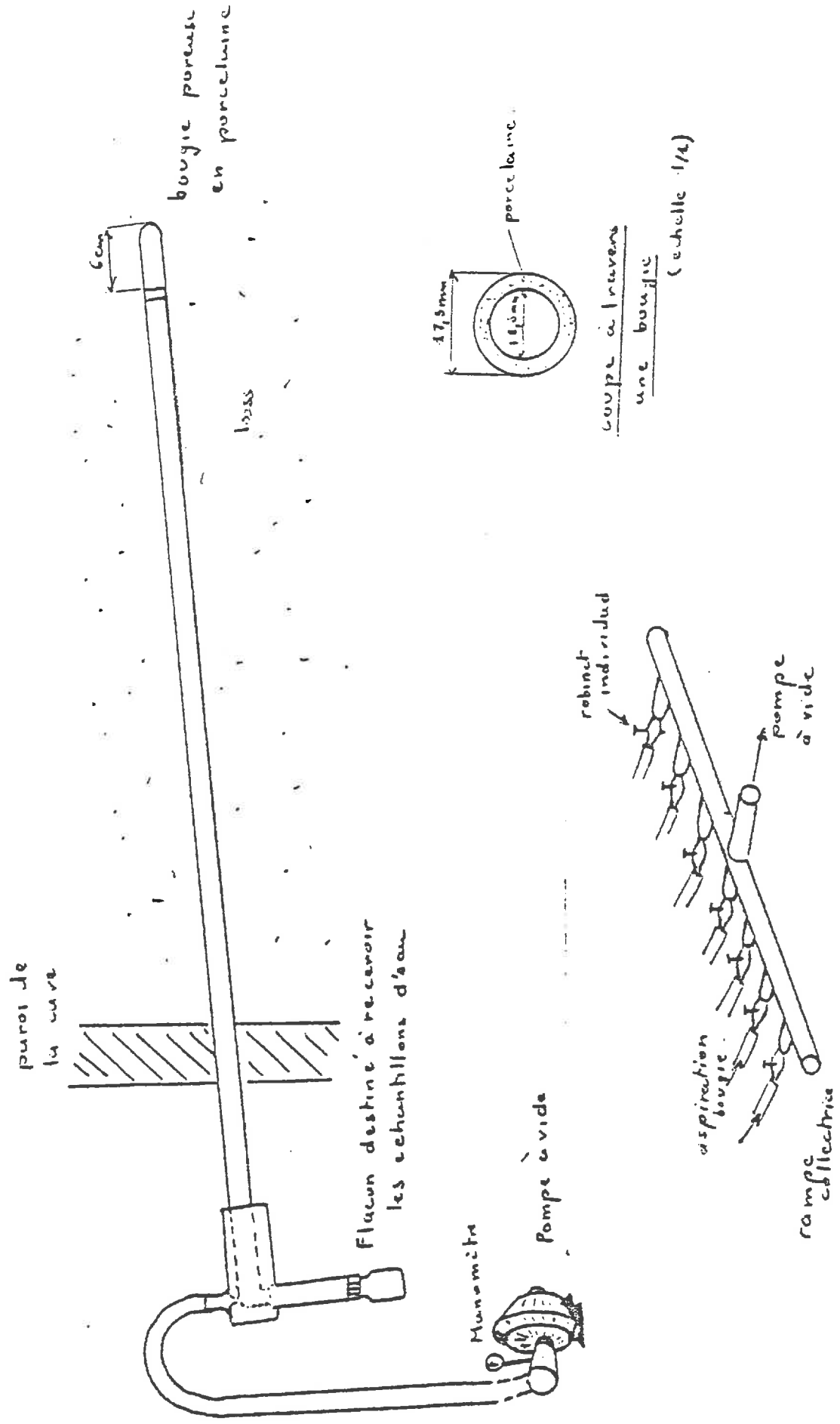
Vue de dessus

Fosse.



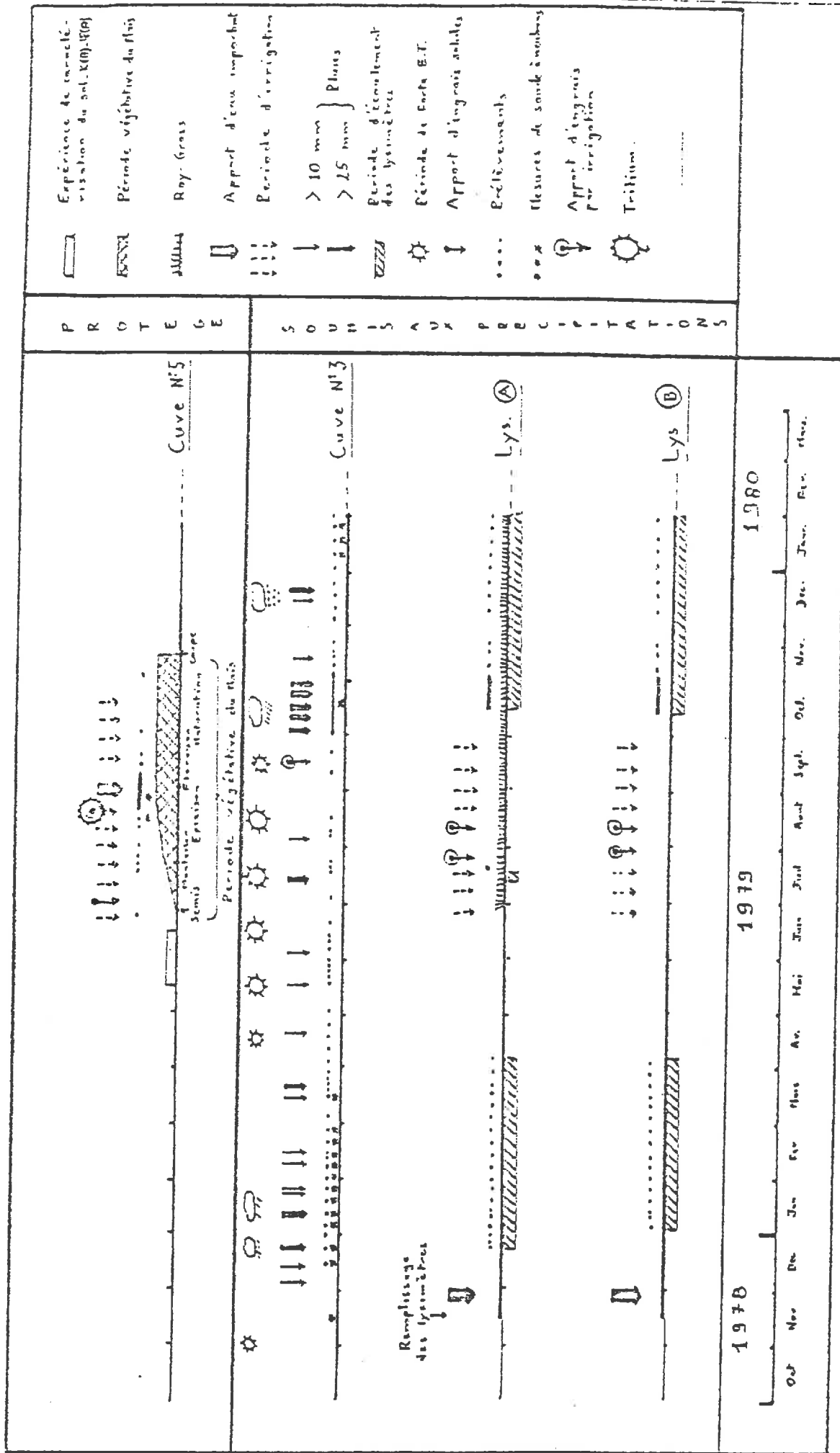
Coupe dans le plan Médon.

Fig. 7, Detail d'une canne avec bougie poreuse dans cure 3 ou 5  
 (echelle 1/5)

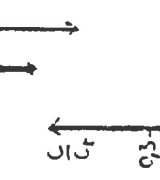


Detail du systeme à dépression

Fig. 8 : CALENDRIER DES EXPERIENCES REALISEES.

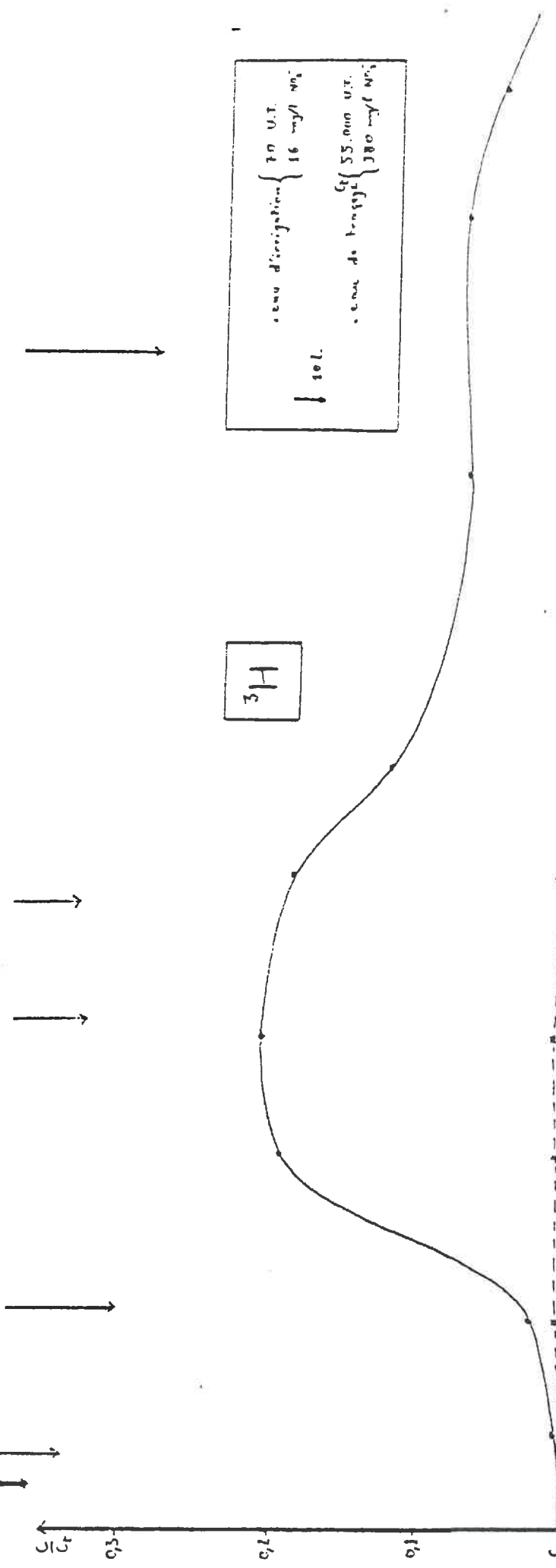


sol. ↓



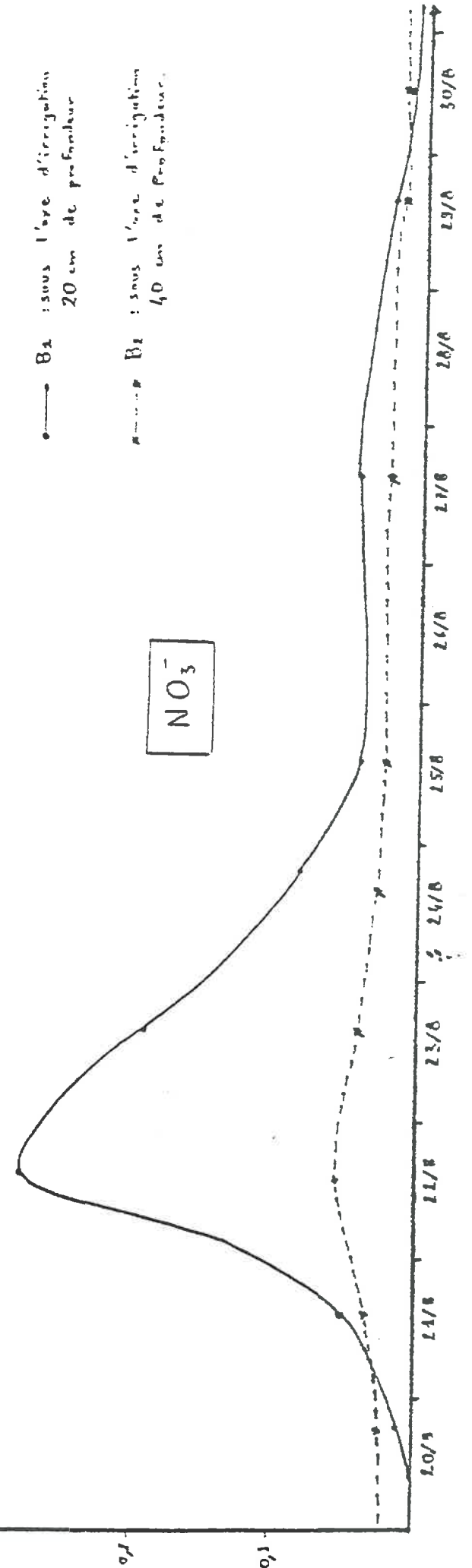
$^3\text{H}$

eau d'irrigation  $\left\{ \begin{array}{l} 70 \text{ U.T.} \\ 16 \text{ mg/l NO}_3^- \end{array} \right.$   
 sol. ↓  
 eau de base  $\left\{ \begin{array}{l} 55.000 \text{ U.T.} \\ 380 \text{ mg/l NO}_3^- \end{array} \right.$



$\text{NO}_3^-$

— Ba : sous l'axe d'irrigation  
 20 cm de profondeur  
 - - - - - Ba : sous l'axe d'irrigation  
 40 cm de profondeur.



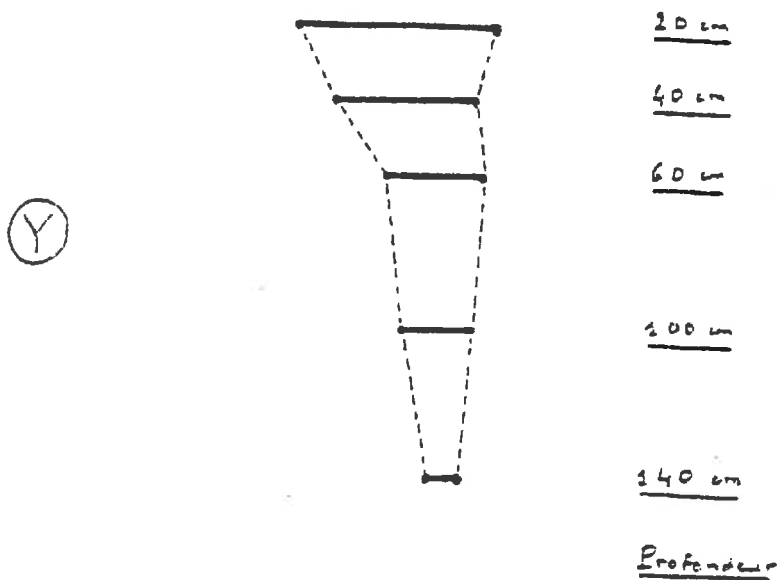
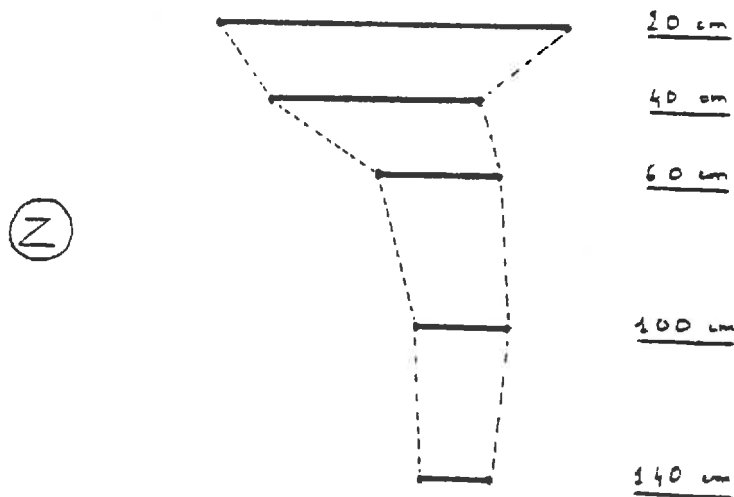
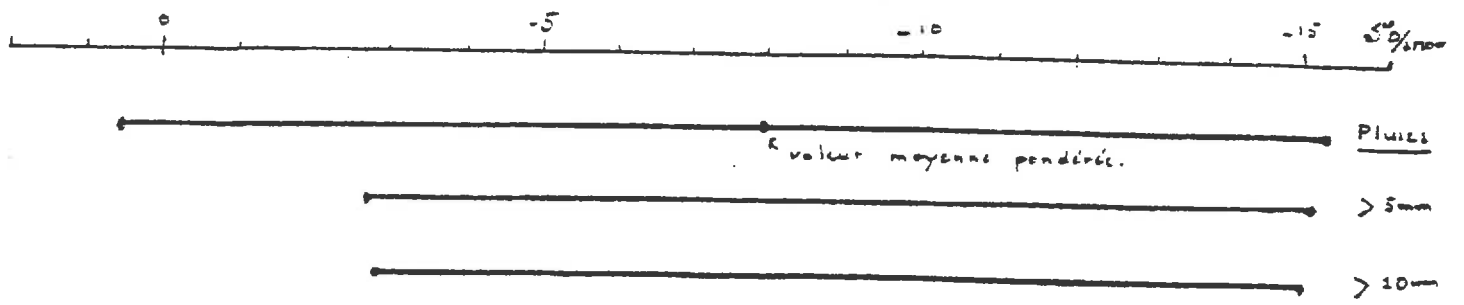


Fig. 10 : Amplitudes du signal "Pluie" et "Infiltration" à différentes profondeurs pour la période du 27/12/18 au 3/1/20



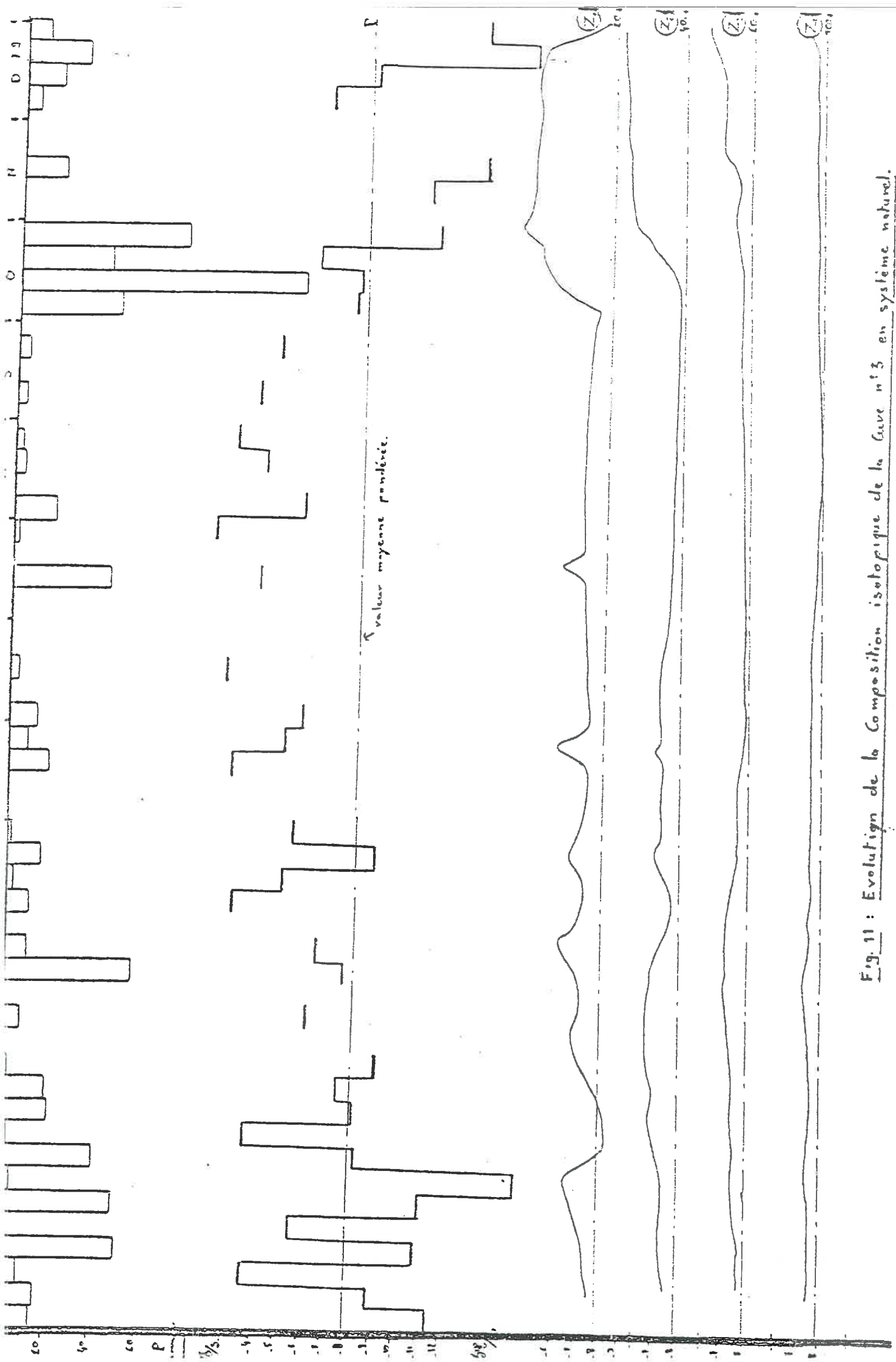
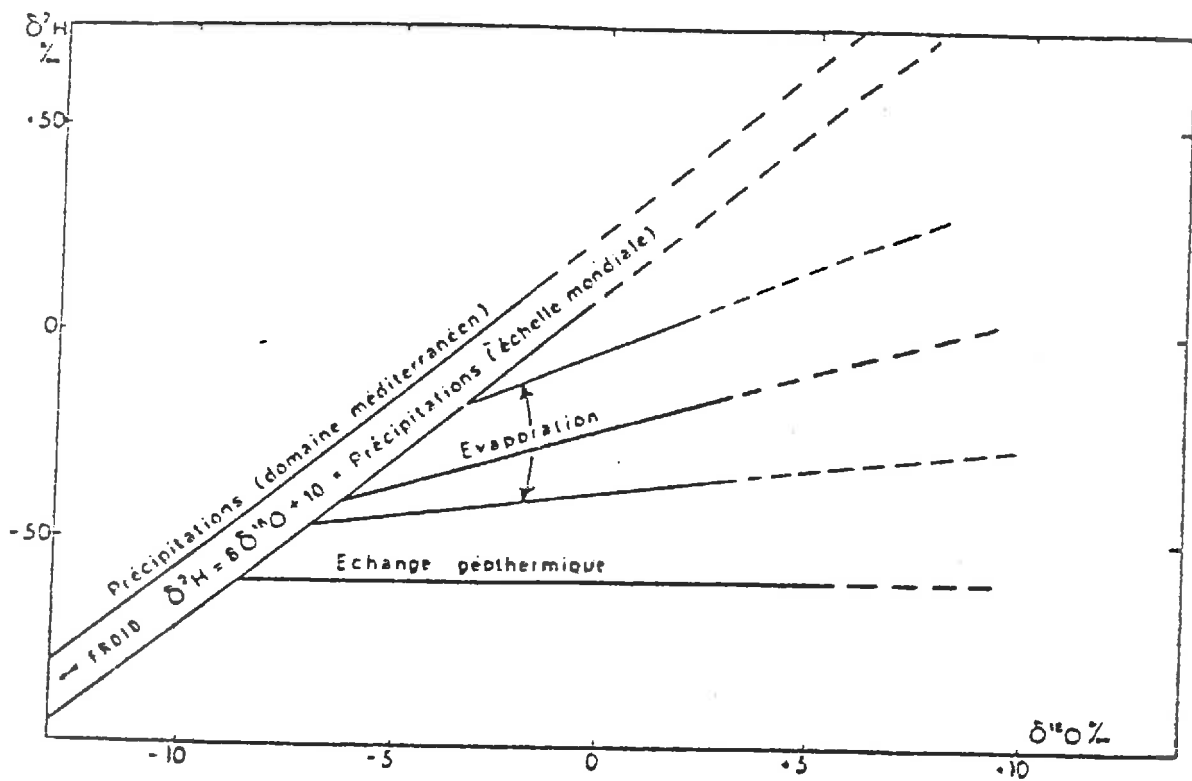


Fig. 11 : Evolution de la Composition isotopique de la Cave n°3 en système naturel.



(d'après FONTES - 1976)

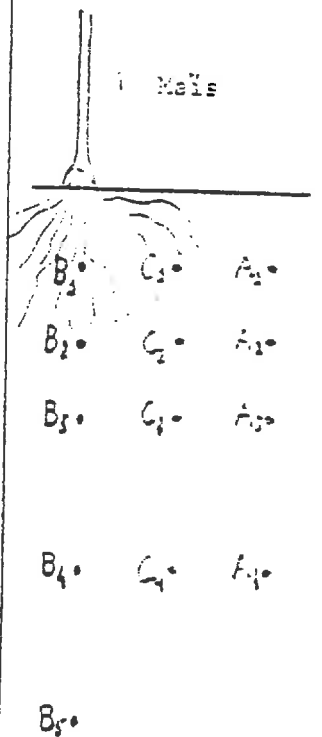
Fig 12- Relations oxygène-18 - deutérium dans les eaux naturelles.

Tableau 1 - Résultats de l'expérience (Août 79).

a - Tritium (en U.T.)

	17/8	20/8 20h	21/8	22/8	23/8	24/8	25/8	27/8	29/8	30/8
B1	59 ± 19	109 ± 22	1022 ± 512	10035 ± 562	11263 ± 531	10418 ± 401	7871 ± 196	3712 ± 217	4189 ± 164	3053 ± 51
B2	88 ± 21		58 ± 20	101 ± 21	168 ± 23	115 ± 21	101 ± 21	113 ± 21	109 ± 21	98 ± 21
B3	48 ± 29		137 ± 23	89 ± 20	90 ± 20	71 ± 19	71 ± 19	60 ± 18	44 ± 17	63 ± 19
B4	94 ± 21		132 ± 23							56 ± 22
C1	76 ± 20		51 ± 19	93 ± 20	50 ± 18	71 ± 19	92 ± 20	76 ± 20	85 ± 20	93 ± 20
C2	35 ± 16		85 ± 21							67 ± 23
C3	83 ± 21									106 ± 22
C4	67 ± 20									65 ± 22
A1	94 ± 21		97 ± 21	75 ± 20	82 ± 21	145 ± 24	99 ± 22	84 ± 21	76 ± 20	105 ± 22
A2	90 ± 21		96 ± 21							65 ± 22
A3	70 ± 20									81 ± 20
A4	60 ± 19									99 ± 22

SCHEMA du DISPOSITIF de PRELEVEMENT



b - Nitrates (en mg/l)

	17/8	20/8 20h	21/8	22/8	23/8	24/8	25/8	27/8	29/8	30/8
B1	0,5	7,5	44,9	265	184	80,0	39,5	40,7	19,1	9,3
B2	17,8	18,8	29,1	51,1	43,5	29,8	25,8	19,5	15,9	15,5
B3	47,2	46,6	50,5	57,5	54,2	50,1	46,5	51,4	45,3	41,2
B4	17,5	16,3	22,5	30,2	32,5	27,1	27,9	23,9	24,7	22,8
B5	4,8		6,8		5,7	5,6	5,8	6,9	6,9	4,8

- Les résultats des niveaux A. et C qui ont été perturbés par l'apport d'engrais solides (particulièrement C1) ne sont pas présentés ici.

## Bibliographie

- ARANYOSSY J.F. (1970)  
Contribution à l'étude des transferts d'eau et de solutés dans la zone non saturée par traçage cationique et isotopique.  
Thèse de 3<sup>e</sup> cycle - PARIS
- BLAVOUX B. (1978)  
Etude du cycle de l'eau au moyen de  $^{18}\text{O}$  et du Tritium.  
Thèse de Doctorat d'Etat (PARIS)
- FEODOROFF (1965)  
Etude expérimentale de l'infiltration de l'eau non saturante.  
Annales Agronomiques, 16, 127-175 - 231-265
- FONTES J.C. (1975)  
Isotopes du milieu et cycle des eaux naturelles - quelques aspects.  
Thèse de Doctorat d'Etat - PARIS
- GAUDET J.P. (1978)  
Transfert d'eau et de solutés dans les sols non saturés - Mesures et simulation.  
Thèse de Doctorat d'Etat, Grenoble.
- GUENNELON R. - CABIBEL B. (1977)  
Applications diverses de la Méthode d'humidimétrie neutronique au contrôle et à l'utilisation des réserves hydriques des sols.  
Annales Agronomiques, 1977, 28, 489-502.
- HANSEN E.A., HARRIS A.R. (1975)  
Validity of Soil-Water samples collected with porous ceramic cup.  
Soil Sc. Soc. of Am. Proc. 1975, vol.39, pp. 528-536.
- HILLEL D. (1973)  
L'eau et le Sol. Principes et Processus Physiques. Vander, Editeur.
- LE LEUCH M., BOURGUET M. (1979)  
Rôle des sols dans le fonctionnement hydrodynamique d'un bassin versant élémentaire schisteux en Bretagne.  
Traçage naturel de l'eau par l' $^{18}\text{O}$   
S.D.S. 157  
Ecol. Nat. Sup. Ag. de Rennes  
Inst. Nat. de la Rech. Agro. Centre de Rennes
- PEIROLO Joël (1979)  
Les composantes de l'écoulement d'un bassin versant en fonction de l'humidité d'une toposéquence.  
Thèse de 3<sup>e</sup> cycle, PARIS.

- SCHERMANN D. (1977)

Transfert des Nitrates à travers la zone non saturée.

Travail de fin d'Etude ENPC.

Agence Fin. Bas. Seine-Normandie

- SIWERTZ E. (1973)

Etude expérimentale par le Tritium et l'<sup>18</sup>O de l'infiltration sur les lysimètres et le Bassin de Thonon.

Thèse de 3<sup>e</sup> cycle, PARIS.

CHAPITRE III

ETUDE DE TRANSFERTS HYDRIQUES ET DE SOLUTES  
SUR SOL NU ET SOUS CULTURE DE MAIS

B. BLAVOUX, J. NOUGIER, M. FRESLON

Centre Universitaire d'Avignon  
Laboratoire de Géologie  
33, rue Louis Pasteur  
84000 AVIGNON

## Résumé.

L'étude de la propagation de l'eau et des sels dans un sol de type loess sous climat méditerranéen a été entreprise à partir de Décembre 1978 à l'INRA d'AVIGNON dans des cuves expérimentales.

Des techniques de mesure complémentaires ont été utilisées (mesures d'humidité et de potentiel au moyen de sonde à neutrons et de tensiomètres, prélèvements d'eau par bougies poreuses pour analyses chimiques et isotopiques).

Une expérience de traçage Nitrate-Tritium sur cuve irriguée au goutte à goutte et cultivée en Maïs a montré que l'eau, à 20cm sous l'axe des plants, arrivait rapidement, mais assez mélangée, et que le bulbe d'irrigation était très localisé (demi-sphère de rayon compris entre 20 et 40cm. Cette technique semble donc particulièrement appropriée pour éviter les pertes en profondeur en eau et en sels.

L'étude de la propagation du signal "Pluie-Entrée" dans le sol au moyen de l'oxygène-18 montre un fort amortissement des amplitudes de variations avec la profondeur, et plus particulièrement dans les 60 premiers centimètres. La pluviométrie exceptionnelle d'Octobre 1979 après un été particulièrement sec, a permis d'obtenir un traçage très marqué.

Un mélange progressif avec l'eau évaporée s'est manifesté jusqu'à la saturation complète du sol. Le phénomène de Piston-Flow apparaît, lorsque l'eau très positive (résultats du mélange de l'eau évaporée avec les pluies successives) est poussée par les pluies très négatives de fin octobre, celles-ci apparaissant à 20cm après un délai de 2 mois.

Cette étude, dans un sol et sous climat très typés, a permis de mettre en évidence une technique d'irrigation garantissant à la fois une bonne gestion de l'eau et une utilisation complète des sels par la plante et de caractériser la vitesse de transit de l'eau, cette donnée étant particulièrement intéressante dans la prévention d'une propagation éventuelle de polluants vers la nappe.

## Table des Matières

### INTRODUCTION

#### 1° Partie : Conduite de la recherche

##### A - Equipement de terrain.

- 1) La cuve nue n°3 (planches 1, 2 et 3)
- 2) La cuve cultivée n°5 (planches 1, 4 et 5)
- 3) Les lysimètres (planche 6)

##### B - Techniques utilisées pour l'acquisition des données et pour les prélèvements d'eau.

- 1) Mesure de l'humidité.
- 2) Mesure de la pression hydraulique
- 3) Les prélèvements d'eau sur les cuves.
- 4) Les prélèvements d'eau sur les lysimètres
- 5) Les précipitations

##### C - Techniques d'analyse.

##### D - Calendrier des opérations.

#### 2° Partie : A - Traçage de l'irrigation au goutte à goutte sur la cuve cultivée en maïs au moyen des nitrates et du tritium.

- 1) Conditions de l'expérience
- 2) Résultats et observations
- 3) Interprétation et principales conclusions

#### B - Propagation du signal isotopique "Pluie-entrée" dans la cuve au sol nu.

- 1) Conditions de l'expérience
- 2) Amplitude des signaux isotopiques aux différentes profondeurs (figure 10)
- 3) La propagation du signal isotopique aux différents niveaux (figure 11)
  - a) Principales caractéristiques du signal Pluie
  - b) le marquage à l'évaporation
  - c) Propagation de la première impulsion négative de Décembre 1975  
Janvier 1979
  - d) Les impulsions de saison chaude - Avril à Octobre 79
  - e) Propagation de la seconde impulsion négative d'Octobre 1979

### CONCLUSION.



## I N T R O D U C T I O N

Un projet initial de recherche intitulé "Evaluation de l'infiltration profonde des eaux d'irrigation à la nappe alluviale au moyen des isotopes de l'environnement" avait été transmis à la D.G.R.S.T. Ce projet n'ayant pas été retenu, une attribution correspondant au 1/4 de la 1ère demande nous a été cependant allouée pour participer à une action coordonnée élaborée à partir de plusieurs projets : les projets de M. GUENNELON (I.N.R.A. Avignon) de M. VACHAUD (Université de Grenoble) de M. COUCHAT (C.E.N. Cadarache) et de M. BERGER (C.E.P.E. Montpellier). Ces cinq recherches devaient se localiser sur un même site expérimental de la station des Sciences du Sol à Montfavet-Avignon. Ainsi compte tenu des besoins de chaque équipe un nouveau projet a pu être élaboré qui se proposait d'étudier les transferts hydriques dans un sol de type loess, sous climat méditerranéen à l'aide des traceurs chimiques et des isotopes de l'environnement. Il s'agissait plus particulièrement d'analyser la transformation du signal isotopique "Pluie-Entrée" et sa propagation soit en sol nu, soit en sol cultivé dans des cuves expérimentales et dans deux lysimètres.

La mise en place des dispositifs expérimentaux spécifiques à notre travail, le programme d'échantillonnage sur une période d'un cycle hydrologique complet et la réalisation des analyses chimiques et isotopiques ont été confiés à Maurice FRESLON, étudiant de 3ème cycle, des Sciences de l'Eau (Paris 6) qui présentera une thèse sur les résultats complets de cette opération à la fin de 1980.

Les dispositifs expérimentaux utilisés ainsi que les résultats disponibles à ce jour sont décrits dans ce rapport. Aidés par les conditions météorologiques très favorables qui nous ont ménagé un automne 1979 très pluvieux après une année exceptionnellement sèche, nous observons la propagation dans le sol de signaux hydriques naturels parfaitement contrastés dont l'interprétation ne fait que commencer. Pour mener à terme ce programme analytique qui dépasse de beaucoup l'enveloppe initiale et les moyens de nos laboratoires, une aide complémentaire serait nécessaire notamment pour faire effectuer des analyses de deutérium permettant de préciser l'importance des phénomènes d'évaporation et la profondeur à laquelle ils se manifestent dans ce sol de loess soumis au climat méditerranéen.

## P R E M I E R E P A R T I E

### CONDUITE DE LA RECHERCHE

#### A - EQUIPEMENT DE TERRAIN.

On dispose à l'I.N.R.A. Montfavet de deux cuves expérimentales et de deux lysimètres dont les caractéristiques géométriques sont précisées sur les planches en annexe (1 à 6).

Le sol de remplissage est un loess dont les caractéristiques physiques et minéralogiques ont été définies à l'I.N.R.A. et qui a été étudié dans son contexte géologique à Collias (Gard) par M. FRESLON. Le remplissage des cuves s'est fait sous l'eau tandis que celui des lysimètres a été réalisé à sec.

##### 1) La cuve nue n° 3 (planches 1, 2 et 3).

Elle est équipée d'un tube central de sonde à neutrons, de 2 séries (Z et Y) de 5 bougies poreuses placées de part et d'autre du tube à 20, 40, 60, 100 et 140 cm de profondeur, fonctionnelles depuis Décembre 1978 et d'une batterie de 6 tensiomètres verticaux installés en Octobre 1979 aux profondeurs de 20, 40, 60, 80, 100 et 125 cm. Une bougie verticale à 12 cm a été également ajoutée au dispositif en Octobre 1979. Cette cuve sans fond est soumise aux précipitations naturelles.

##### 2) La cuve cultivée n° 5 (planches 1, 4 et 5).

L'équipement très complet de cette cuve avec 5 tubes pour les mesures à la sonde à neutrons et 15 tensiomètres a été disposé en fonction des plants de maïs et de leur dispositif d'irrigation au goutte à goutte. La cuve cultivée est recouverte d'un tunnel plastifié la protégeant des précipitations mais qui la laisse soumise à l'évapotranspiration. L'équipement spécifique à notre étude est constitué par des bougies poreuses implantées de manière à former un bulbe autour d'un plant de maïs avec des gradients vertical et horizontal.

##### 3) Les lysimètres (planche 6).

Tous les 2 soumis aux précipitations l'un est en sol nu, l'autre recouvert de gazon.

## B - TECHNIQUES UTILISEES POUR L'ACQUISITION DES DONNEES ET POUR LES PRELEVEMENTS D'EAU.

Etant donné le volume limité des cuves, les techniques de mesure de l'humidité, de la charge hydraulique, de la composition de la solution du sol reposent sur des procédés non destructifs.

### 1) Mesure de l'humidité.

Elle est obtenue à l'aide d'une sonde neutronique. Deux types d'appareil sont à notre disposition, une sonde N.E.A. et une sonde H.P 310. L'erreur faite sur la mesure est d'environ 0,5 % de l'humidité volumique. Il a été montré d'autre part, que la sphère d'influence de la N.E.A. ( $R = 20$  cm) était supérieure à celle de la H.P. 310.

### 2) Mesure de la pression hydraulique.

On utilise des tensiomètres horizontaux ou verticaux reliés à un manomètre à mercure et des tensiomètres à capteur de pression moins précis ( $\pm 10$  mbars) mais d'un emploi plus facile.

### 3) Les prélèvements d'eau sur les cuves.

Les cannes prolongeant les bougies poreuses font un angle de  $10^\circ$  environ avec l'horizontale de manière à permettre l'écoulement gravitaire de l'eau vers le flacon d'échantillonnage (planche 7). En se rapportant à une courbe  $\psi(\theta)$  établie en laboratoire on a une bonne indication des tensions in situ. Pour extraire l'eau du sol on doit appliquer une dépression supérieure à celle indiquée par le tensiomètre correspondant ou, à défaut de mesure tensiométrique, à celle correspondant à l'humidité mesurée. Afin de prélever toujours le même type d'eau, nous avons échantillonné à une pression de 300 mbars correspondant à 20 % d'humidité volumique. Ces conditions permettent d'extraire de l'eau pendant une grande partie de l'année mais en saison sèche nous avons opéré sous 400 mbars sans jamais aller au-delà. Les échantillons prélevés dans les premiers centimètres sont donc peu nombreux en été.

La durée de la dépression appliquée se limite, soit au remplissage du flacon de prélèvement de 20 cc, soit dans les conditions défavorables à un temps maximum de 8 heures pour éviter de faire intervenir de l'eau trop éloignée de la bougie. La durée moyenne a été de 6 heures. La sphère de volume prélevée est alors

limitée à 5 cm de rayon mais la sphère d'influence peut être plus importante et donc créer quelques perturbations locales. Une expérience avec tensiomètres et bougies est envisagée pour déterminer cette sphère d'influence. Les tuyaux des cannes aboutissent par l'intermédiaire de robinets individuels à un collecteur permettant de faire communiquer telle ou telle canne avec la pompe (planche 7). La pompe utilisée est une pompe électrique péristaltique très pratique d'emploi.

#### 4) Les prélèvements d'eau sur les lysimètres.

Une légère pente du fond permet l'écoulement de l'eau vers une crépine puis dans un bidon réceptacle de 30 litres. Sur le lysimètre A, un enregistreur de débit (enregistreur de pluviographe à augets basculants) est interposé entre la sortie d'eau du lysimètre et le bidon.

#### 5) Les précipitations.

Deux pluviomètres association de 400 cm<sup>2</sup> de surface collectrice sont installés sur le site expérimental. Les précipitations hebdomadaires interceptées par un pluviomètre sont stockées dans un récipient enterré et fermé pour éviter l'évaporation. Les averses d'un montant supérieur à 5 mm sont prélevées directement sur le second pluviomètre. Les autres paramètres climatiques sont fournis par la station de bioclimatologie de Montfavet (I.N.R.A.).

### C - TECHNIQUES D'ANALYSE.

Les analyses chimiques ont été effectuées au laboratoire de La Faculté des Sciences d'Avignon :

- les éléments majeurs par absorption atomique (I.L. 257),
- les sulfates, nitrates, chlorures par colorimétrie (Cecil 292)
- les bicarbonates par volumétrie.

Les analyses de nitrates sur les faibles volumes d'eau (20 cc) recueillis lors des expériences de traçage ont été effectuées à l'I.N.R.A. à l'aide d'une électrode spécifique.

Les analyses isotopiques ont été faites au Centre de Recherches Géodynamiques de Thonon.

- L'oxygène 18, isotope stable de la molécule d'eau, sur un spectromètre de masse Varian CH-7, après équilibration avec CO<sub>2</sub>,

- Le tritium ( $^3\text{H}$ ) par comptage direct en scintillation liquide sur un compteur Nucléar-Chicago, le volume de l'échantillon ne permettant pas un enrichissement par électrolyse.

#### D - CALENDRIER DES OPERATIONS.

Le calendrier des expériences réalisées est détaillé sur la planche 8 en annexe. Toutes ces expériences seront développées dans la thèse de M. FRESLON. Seuls les résultats du traçage sur la cuve 5 au moyen du tritium et des nitrates, introduits par le goutte à goutte lors de l'irrigation du maïs et ceux de l'étude de la propagation du signal Pluie naturel (oxygène 18) dans la cuve 3 à sol nu sont présentés ci-après.

## DEUXIEME PARTIE

### *ANALYSE ET INTERPRETATION DES RESULTATS DES TRACAGES*

#### A - TRACAGE DE L'IRRIGATION AU GOUTTE A GOUTTE SUR LA CUVE CULTIVEE EN MAIS AU MOYEN DES NITRATES ET DU TRITIUM.

Le maïs a été planté en Juin 1979 sur la cuve n° 5 décrite précédemment et soumis à partir du 10 Juillet à une irrigation au goutte à goutte 2 fois par semaine. Les apports dont la qualité a été contrôlée, sont restés constants pendant tout le stade végétatif et égaux à la moitié de l'ETP calculée par la formule de Gerbier et Brochet.

L'analyse des transferts hydriques en utilisant les résultats de la sonde et des tensiomètres ainsi que leur modélisation incombait aux équipes de l'I.N.R.A. et de Grenoble. Dans le cadre de notre programme, nous avons effectué un double traçage, au moyen du tritium pour suivre le trajet de l'eau et au moyen des nitrates pour étudier la propagation et l'utilisation de cet élément nutritif.

##### 1) Conditions de l'expérience.

L'expérience s'est poursuivie du 20 au 31 Août 1979 pendant le développement maximum du maïs. Elle a consisté à l'injection par le goutte à goutte de 10 l d'eau tritiée à 55 000 UT et contenant 980 mg/l de  $\text{NO}_3^-$ , le 20 Août à 10 h. Cet apport s'est effectué sur le plant de maïs situé dans l'axe du bulbe constitué par les bougies poreuses. Une irrigation au goutte à goutte s'est effectuée ensuite normalement le 20 Août à 15 h (20 l), le 21 Août (40 l), le 23 Août (28 l), le 24 Août (22 l) et le 28 Août (50 l) avec une eau de nappe contenant 70 UT et 16 mg/l de  $\text{NO}_3^-$ . Des prélèvements horaires puis journaliers ont été effectués sur toutes les bougies poreuses.

##### 2) Résultats et observations.

Tous les résultats analytiques ( $\text{NO}_3^-$  et  $^3\text{H}$ ) sont reportés dans le tableau 1 en annexe.

Les courbes de la figure 9 montrent l'évolution des concentrations dans les deux bougies directement à la verticale du plant arrosé à 20 cm et 40 cm de profondeur. Sur les autres bougies latérales ou plus profondes aucune répercu

du traçage n'a pu être mise en évidence pendant cette même période (voir tableau des résultats).

L'eau tritiée et le sel arrivent très rapidement en B<sub>1</sub> à une profondeur de 20 cm, quelques heures après l'injection.

Le maximum de concentration observé est très inférieur à la concentration initiale de l'eau marquée, 4 fois moins environ.

Une très légère arrivée d'eau tritiée et de nitrates est perceptible deux jours après l'injection à 40 cm de profondeur.

Les deux courbes de restitution présentent des caractères différents : une montée plus rapide et plus importante des concentrations en nitrates, une persistance plus grande des fortes teneurs en tritium alors que les concentrations en nitrates diminuent très rapidement.

### 3) Interprétation et principales conclusions.

Cette étude a montré que le bulbe créé par l'irrigation au goutte à goutte est très localisé avec un rayon compris entre 20 et 40 cm. Ces résultats confirment ceux des chercheurs de l'I.N.R.A. et prouvent que ce type d'irrigation est très efficace avec une bonne utilisation à la fois de l'eau et des sels, sans pertes en profondeur.

Les vitesses de l'eau avec sa minéralisation sont rapides comparées à celles qui seront obtenues sur la cuve nue. Elles indiquent le cheminement préférentiel de l'eau par des microfissures dans la zone du bulbe créés par les humidifications successives après les périodes de retrait<sup>(\*)</sup> et (surtout) par le développement des racines du maïs; mais il faut surtout prendre en compte les forts gradients de potentiel qui règnent dans cette zone racinaire.

Néanmoins, les mélanges sont déjà importants entre l'eau préexistante et les apports successifs.

Enfin, le comportement du tritium est très légèrement différent de celui des nitrates. La vitesse modale des nitrates (0,4 cm/h) est plus grande que celle

---

(\*) La redistribution de l'eau après irrigation est en effet rapide et de l'ordre de la journée.



du tritium (0,3 cm/h), bien que ce dernier soit le marqueur type de la molécule d'eau. Cette anomalie déjà mentionnée dans d'autres études de traçage demandera une étude approfondie. Il peut s'agir ici d'une absorption préférentielle du maïs dans la zone racinaire.

On remarquera que l'azote est consommé plus rapidement que l'eau tritiée dans les conditions de l'expérience avec les concentrations et les quantités d'eau d'arrosage qui ont été choisies.

## B - PROPAGATION DU SIGNAL ISOTOPIQUE "PLUIE-ENTREE" DANS LA CUVE AU SOL NU.

### 1) Conditions de l'expérience.

La récolte des précipitations et l'analyse de leur teneur en oxygène-18 (isotope stable de la molécule d'eau) permet de définir un signal naturel bien contrasté avec les saisons. Cette étude a commencé en Décembre 1978. Des prélèvements d'eau hebdomadaires ou plus fréquents lors d'événements hydrologiques sont effectués dans la cuve à sol nu à différents niveaux par l'intermédiaire des bougies poreuses. Leur teneur en oxygène-18 est analysée de façon à étudier la propagation du signal météorique et sa transformation en profondeur. Ces opérations ont été également commencées en Décembre 1978 et se poursuivent encore actuellement. La verticale (Z) de 5 bougies a plus particulièrement été étudiée mais des comparaisons sont faites avec l'autre verticale (Y). Plus de 500 analyses d' $^{18}\text{O}$  ont été ainsi effectuées. Les principaux résultats sont figurés sur les planches 10 et 11 fournies en annexe.

### 2) Amplitude des signaux isotopiques aux différentes profondeurs (figure 10).

L'amplitude des variations en oxygène-18 de la pluie en 1979 est particulièrement élevée et atteint près de  $16 \delta^{18}\text{O} \text{ ‰}$  pour l'ensemble des pluies et  $12,5 \delta \text{ ‰}$  si l'on ne considère que les grosses averses d'un montant supérieur à 10 mm. On rappellera que l'incertitude sur un dosage d'oxygène-18 est égale à  $\pm 0,1 \delta \text{ ‰}$  et que l'on a donc un signal météorique très contrasté.

Sur le profil Z l'amplitude des variations en oxygène-18 de l'eau d'infiltration est déjà réduite à  $4,7 \delta \text{ ‰}$  dès 20 cm de profondeur. Elle décroît très rapidement à  $2,7 \delta \text{ ‰}$  à 40 cm et  $1,6 \delta \text{ ‰}$  à 60 cm. L'amortissement de ce signal à l'infiltration est moins prononcé au-delà de cette profondeur (1  $\delta$  de variation à 140 cm de profondeur).



Sur le profil Y les amplitudes du signal infiltration sont encore plus faibles ;  $2,5 \delta \text{ ‰}$  à 20 cm et  $0,5 \delta \text{ ‰}$  à 140 cm. Bien qu'encore incomplets, ces résultats montrent qu'il existe une hétérogénéité importante à l'échelle de la case, latéralement.

L'important amortissement du signal "Pluie" jusqu'à une profondeur de 60 cm environ implique des mélanges dans cette zone et donc <sup>des</sup> phénomènes de dispersion prépondérants. Des forts gradients de potentiel certainement inversés lors des périodes à forte évaporation et des infiltrations rapides dans les microfissures sont les principaux responsables de ce phénomène. Au-delà de 60 cm ce sont les circulations gravitaires qui prédominent. C'est le domaine des écoulements type "piston" où la diffusion joue un rôle important.

3) La propagation du signal isotopique aux différents niveaux  
(figure 11).

a) Principales caractéristiques du signal Pluie.

On sait que la teneur en oxygène-18 des précipitations est grossièrement fonction de la température au sol mais aussi de l'origine des masses d'air et de l'intensité de l'averse et donc du type de temps. Pour qu'une averse ou une série d'averses constituent un bon marqueur il faut non seulement que leur composition s'écarte de la teneur moyenne des eaux du sol mais aussi que la quantité précipitée soit suffisamment importante pour constituer une impulsion.

L'étude du signal "Pluie" à Avignon de Décembre 1978 à Janvier 1980, montre que les conditions d'un bon traçage sont réunies sous ce climat méditerranéen. Les pluies abondantes en Décembre 1978 et Janvier 1979 avec des teneurs basses en  $^{18}\text{O}$  (valeurs négatives voisines de  $-11 \delta \text{ ‰}$ ), les fortes précipitations d'Octobre 1979 avec des valeurs basses suivies de celles de Décembre 1979 avec des teneurs très basses ( $-15 \delta \text{ ‰}$ ) constituent des impulsions négatives remarquables et l'essentiel de l'infiltration. A l'inverse quelques violents orages d'été comme celui de Juillet 1979 avec une teneur en  $^{18}\text{O}$  de  $-3,7 \delta \text{ ‰}$  constituent des signaux positifs (par rapport à la moyenne) très localisés et survenant en saison sèche. Leur pénétration dans le sol est importante à étudier.

b) Le marquage à l'évaporation.

Les eaux qui ont subi une évaporation sont enrichies en isotopes lourds (oxygène-18 et deutérium) par rapport aux eaux météoriques qui n'y ont pas été soumises. Certaines eaux prélevées dans les premiers centimètres du sol pourront ainsi par évaporation acquérir des teneurs en oxygène-18 élevées qui peuvent être

confondues avec celles des précipitations estivales plus lourdes. Toutefois le doute n'est plus permis si l'on effectue l'analyse du couple oxygène-18 - deutérium. En effet, les teneurs en  $^{18}\text{O}$  et  $^2\text{H}$  des précipitations sont corrélées linéairement suivant l'équation :  $\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + b$  (CRAIG, 1961). La bonne constance de la pente de 8, vérifiée pour toutes les précipitations du globe est due au fait que la condensation est un phénomène qui se produit à l'équilibre.

L'évaporation est par contre toujours un phénomène cinétique complexe. Dans un même environnement climatique des eaux qui ont subi différents degrés d'évaporation présentent toujours une corrélation linéaire entre leurs teneurs en  $^{18}\text{O}$  et  $^2\text{H}$  mais avec une pente plus faible que la droite météorique ( $3 < a < 8$ ). Elles sont donc parfaitement identifiables sur un diagramme  $\delta^{18}\text{O} - \delta^2\text{H}$  car elles se situent à droite et en dessous de la droite météorique (planche 12).

c) Propagation de la première impulsion négative de Décembre 1978 - Janvier 1979.

La première impulsion négative constituée par les pluies de fin Décembre 78 et début Janvier 79 (teneur - 11  $\delta$ ) a un premier effet inverse au niveau de la bougie à 20 cm puisqu'elle fait monter la teneur de l'eau du sol de - 7,5  $\delta$  à - 6,4  $\delta$ . Il faut donc considérer que ce sont d'abord les eaux de rétention de la tranche supérieure ayant subi une longue évaporation estivale qui sont poussées par les pluies négatives d'un montant de 120 mm. Un certain mélange doit déjà s'effectuer mais l'impulsion négative n'est sensible qu'à la fin Janvier à 20 cm soit 4 semaines après. Le même signal très amorti est également perçu à 40 cm et à 60 cm. L'impulsion négative s'y manifeste fin Mars à 40 cm soit 3 mois après et vers la mi-Avril à 60 cm.

d) Les impulsions de saison chaude - Avril à Octobre 79.

Chaque événement hydrologique important engendre à 20 cm une perturbation minime et rapide de la teneur isotopique de l'eau, sous forme de pics toujours positifs. Il s'agit encore de l'arrivée d'eaux de la tranche superficielle enrichies en oxygène-18. Elles sont probablement mélangées avec l'eau de pluie qui vient de tomber. La reconstitution de l'histoire de ces molécules d'eau est difficile en l'absence de dosages de deutérium.

Ces pics positifs apparaissent parfois à 40cm mais jamais au-delà. Les teneurs moyennes restent d'autre part assez négatives et un enrichissement par évaporation n'est pas décelable à 40 cm. Déjà à 20 cm dans le loess il semble que les tendances à l'enrichissement en oxygène-18 de l'eau soient la résultante de mouvements descendants et non pas un phénomène d'évaporation se développant à ce niveau.

e) Propagation de la seconde impulsion négative d'Octobre 1979.

Cette impulsion est plus complexe car elle débute par de fortes précipitations à teneur en  $^{18}\text{O}$  (- 7,8  $\delta$ ) proches de la moyenne des eaux du sol, mais elle se poursuit fin Octobre par de très fortes précipitations (73 mm) à teneur en  $^{18}\text{O}$  basse (- 11,0  $\delta$ ). Elle déclenche cependant à 20 cm un enrichissement progressif et très important de l'eau du sol qui atteint une concentration de - 4,2  $\delta$  ‰ à la fin Octobre. Comme lors de la 1ère recharge hivernale il ne peut s'agir que des eaux de la tranche supérieure enrichies par évaporation qui sont chassées vers le bas. Après un palier dû à la sécheresse de Novembre (19 mm), les pluies d'automne sont repérables à 20 cm à la fin Décembre et l'impulsion négative qui se manifeste encore le 20 Janvier est particulièrement marquée.

A 40 et 60 cm de profondeur la montée des teneurs est un peu amortie mais bien visible. Le signal négatif n'est pas encore apparu mais les prélèvements se poursuivent pour essayer de saisir la totalité du phénomène et voir s'il sera encore perceptible aux niveaux 100 et 140 cm.

## C O N C L U S I O N

L'aide apportée par la D.G.R.S.T. aux 5 projets coordonnés sur le site de l'I.N.R.A. à Avignon a permis la mise en place et le rodage de dispositifs expérimentaux complets et originaux. Il s'agit de 2 cases sans fond équipées de tubes de sonde à neutrons, de tensiomètres et de bougies poreuses permettant des mesures d'humidité, de charges hydrauliques et de la composition de la solution du sol par des procédés non destructifs. Ces installations ont été complétées par deux lysimètres. Elles pourront servir à d'autres expérimentations très souhaitables. Cette étude a permis en outre la collaboration d'équipes ayant des objectifs différents travaillant à des échelles différentes et utilisant des techniques complémentaires. Cette première confrontation a été très profitable.

Le traçage de l'irrigation au goutte à goutte sur la cuve cultivée en maïs au moyen d'une solution tritiée avec des nitrates a montré que le bulbe ainsi créé est très localisé avec un rayon de 20 à 40 cm. Dans cette zone les vitesses de l'eau avec sa minéralisation sont rapides bien que les mélanges entre l'eau préexistante et les apports successifs soient importants. Dans les conditions de l'expérience, la bonne utilisation de l'eau et des engrais azotés a été vérifiée puisqu'il n'a pas été constaté de pertes en profondeur. Ces expériences devront être reprises avec d'autres paramètres pour mieux cerner les risques de pollution des nappes alluviales par les engrais.

L'analyse de la propagation dans la cuve au sol nu du signal isotopique naturel constitué par les teneurs en oxygène-18 de la pluie est également pleine d'intérêt. Un signal météorique très contrasté a été défini. L'important amortissement de ce signal "Pluie" jusqu'à une profondeur de 60 cm implique des mélanges prépondérants dans cette zone superficielle soumise à de forts gradients de potentiel. Les phénomènes de dispersion y sont importants mais ne sont pas suffisants pour oblitérer totalement le signal pluie. Des déplacements d'eau évaporée, enrichie en isotopes lourds dans les premiers centimètres ont été mis en évidence. Ils supposent un mécanisme de "Piston percé" de la pluie qui s'infiltrer, sur les eaux de rétention du loess. Au-delà de 60 cm ce sont les circulations gravitaires qui prédominent. C'est le domaine des écoulements type "Piston simple" où la diffusion joue un rôle important.

Sur l'étude très précise de ces phénomènes repose la compréhension du transfert des minéralisations dans la zone non saturée sous climat méditerranéen. Tous nos résultats doivent encore être dépouillés en fonction de tous les paramètres physiques mesurés sur le site. Pour traiter l'important stock d'échantillons récoltés et à venir pour le dernier cycle hydrologique, pour faire analyser le deutérium sur 50 échantillons afin de cerner les phénomènes d'évaporation, un complément d'aide est sollicité de la D.G.R.S.T.

Fig1. Vue générale du cadre de l'étude

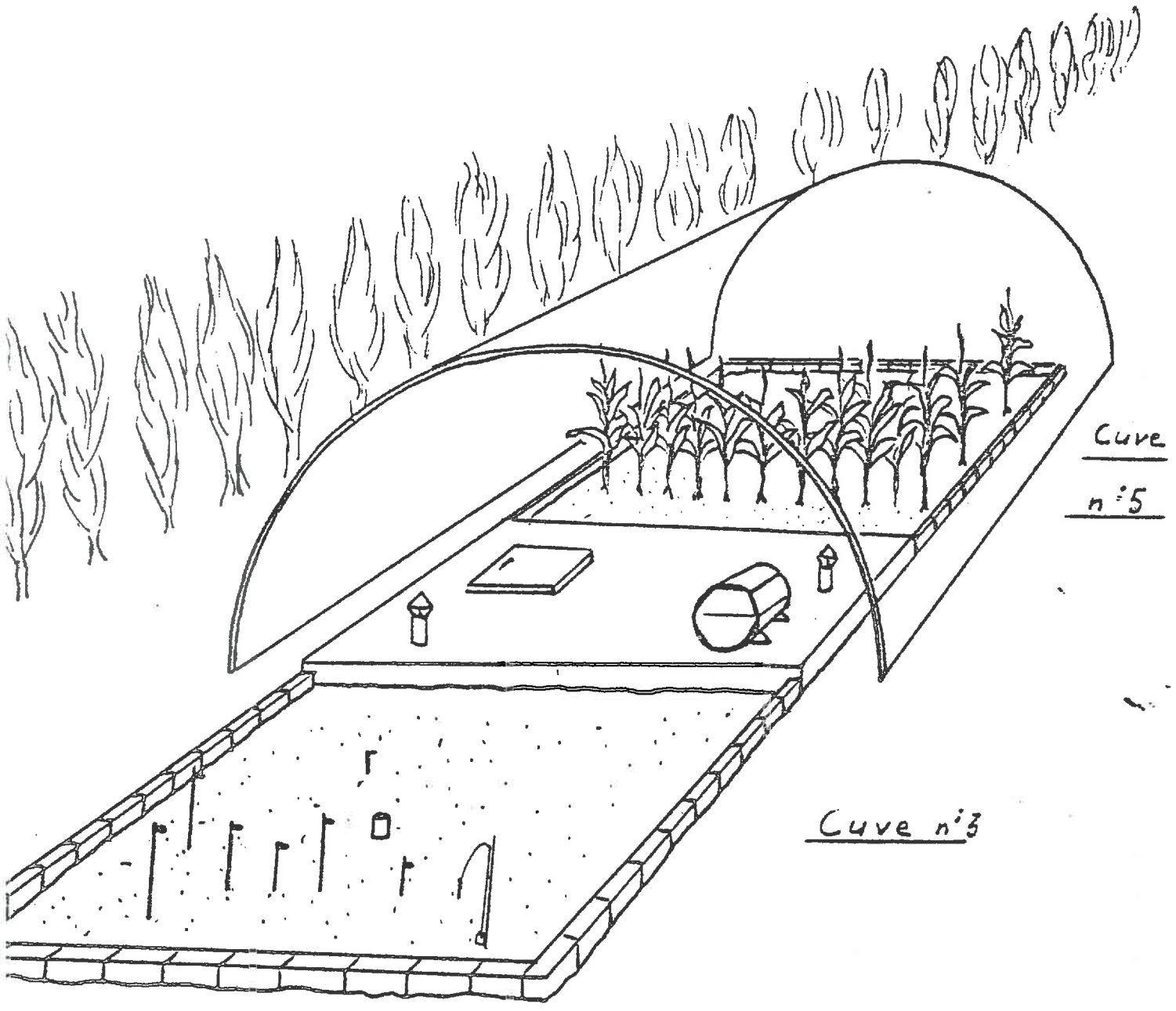
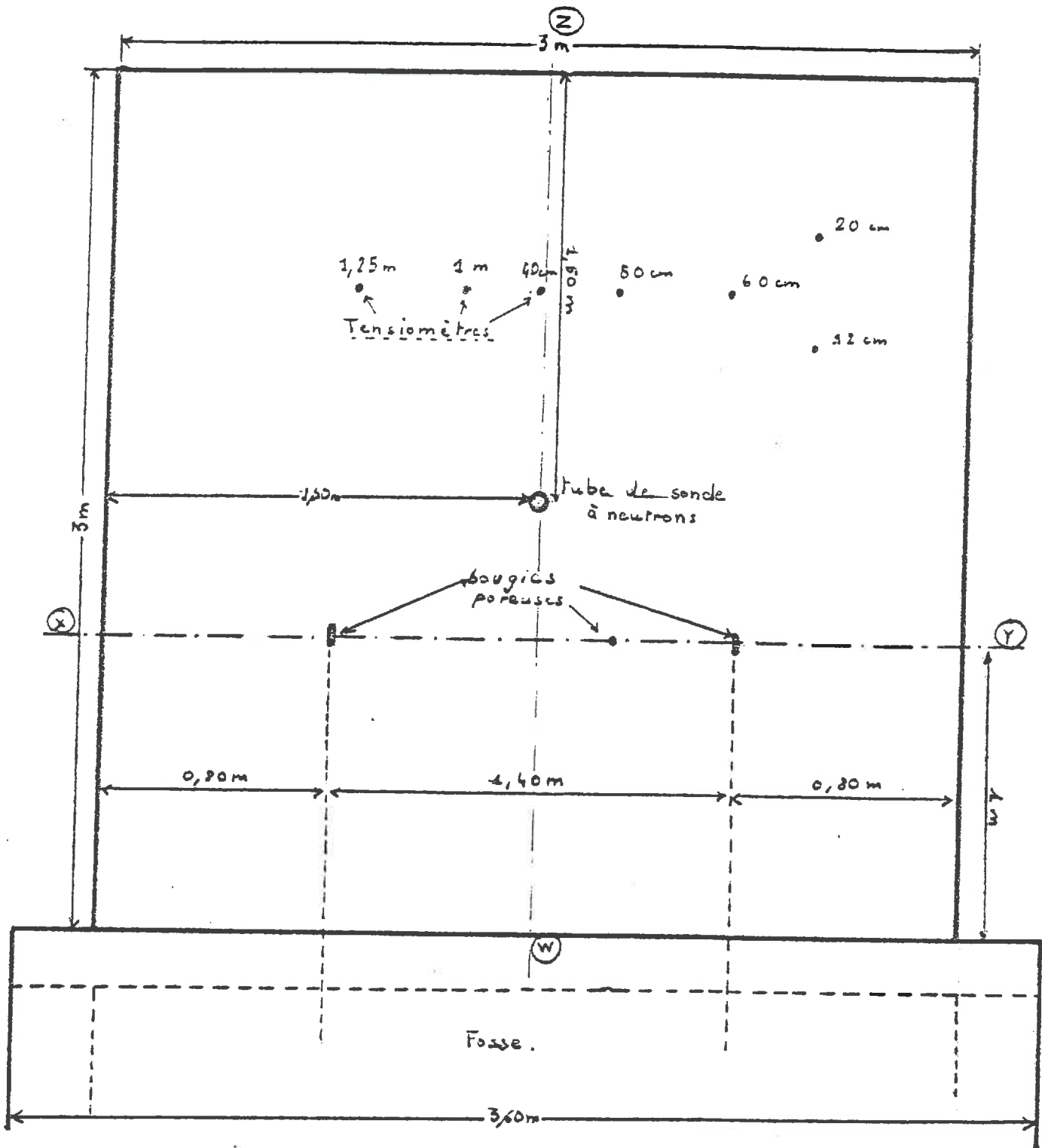


Fig2: Cuve sol nu n° 3

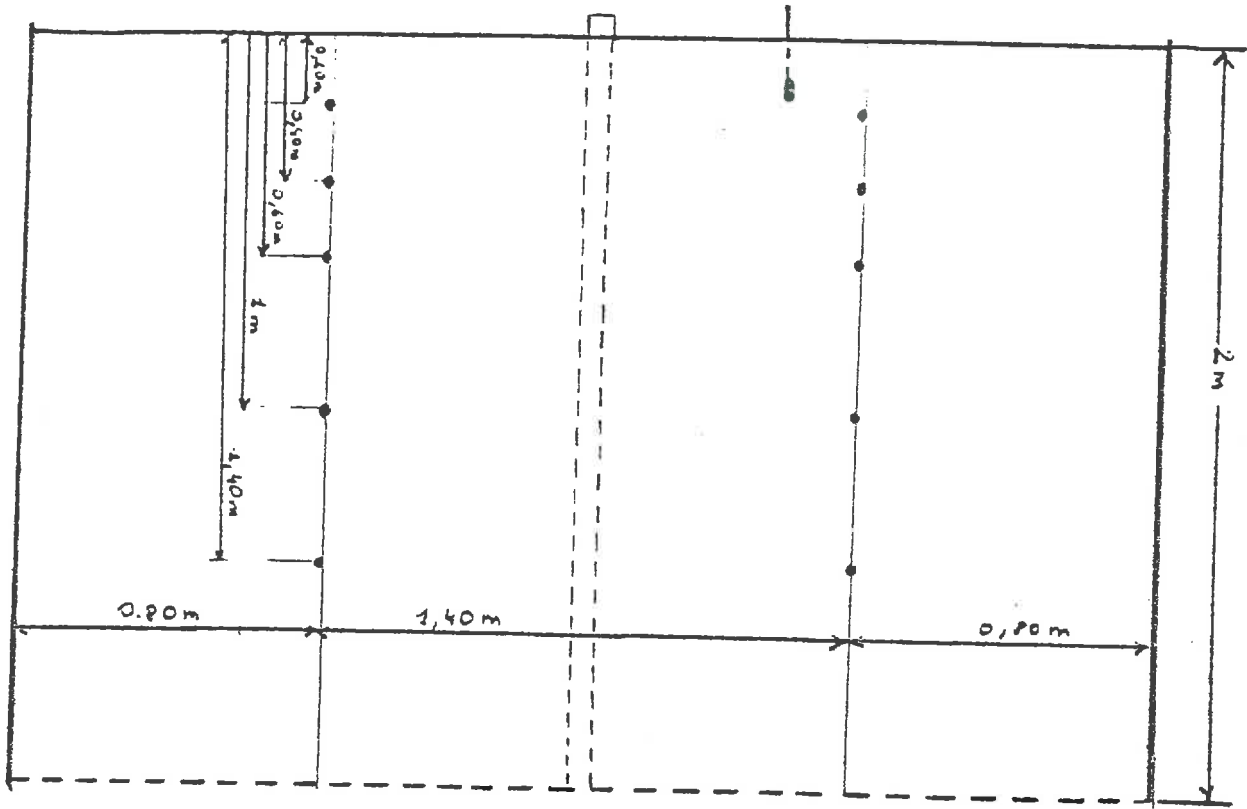
Echelle:  $\frac{1}{20}$



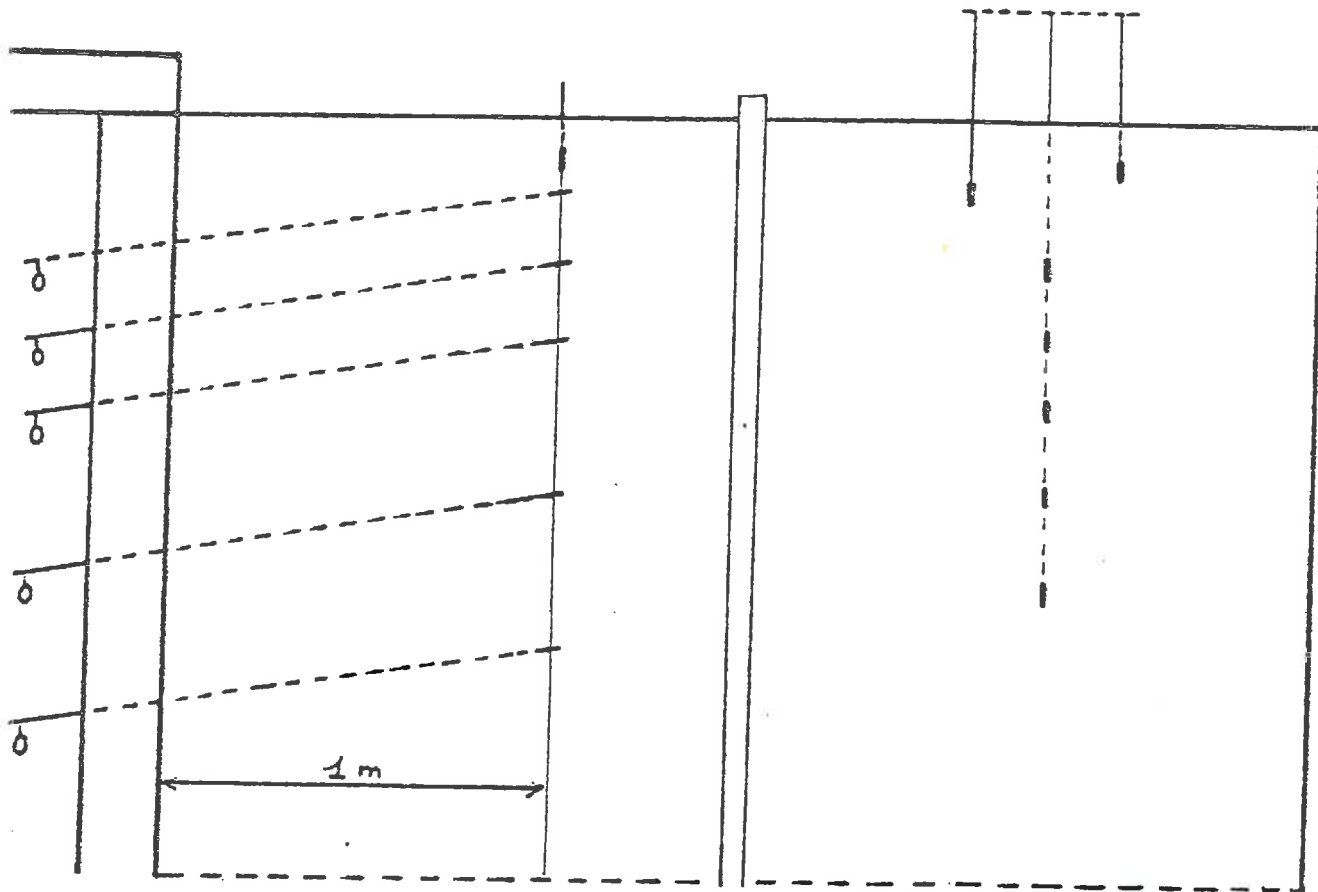
Vue de dessus

Fig 3: Cuve Sol nu n: 3

Echelle: 1/20



Coupe dans le plan (X-Y)



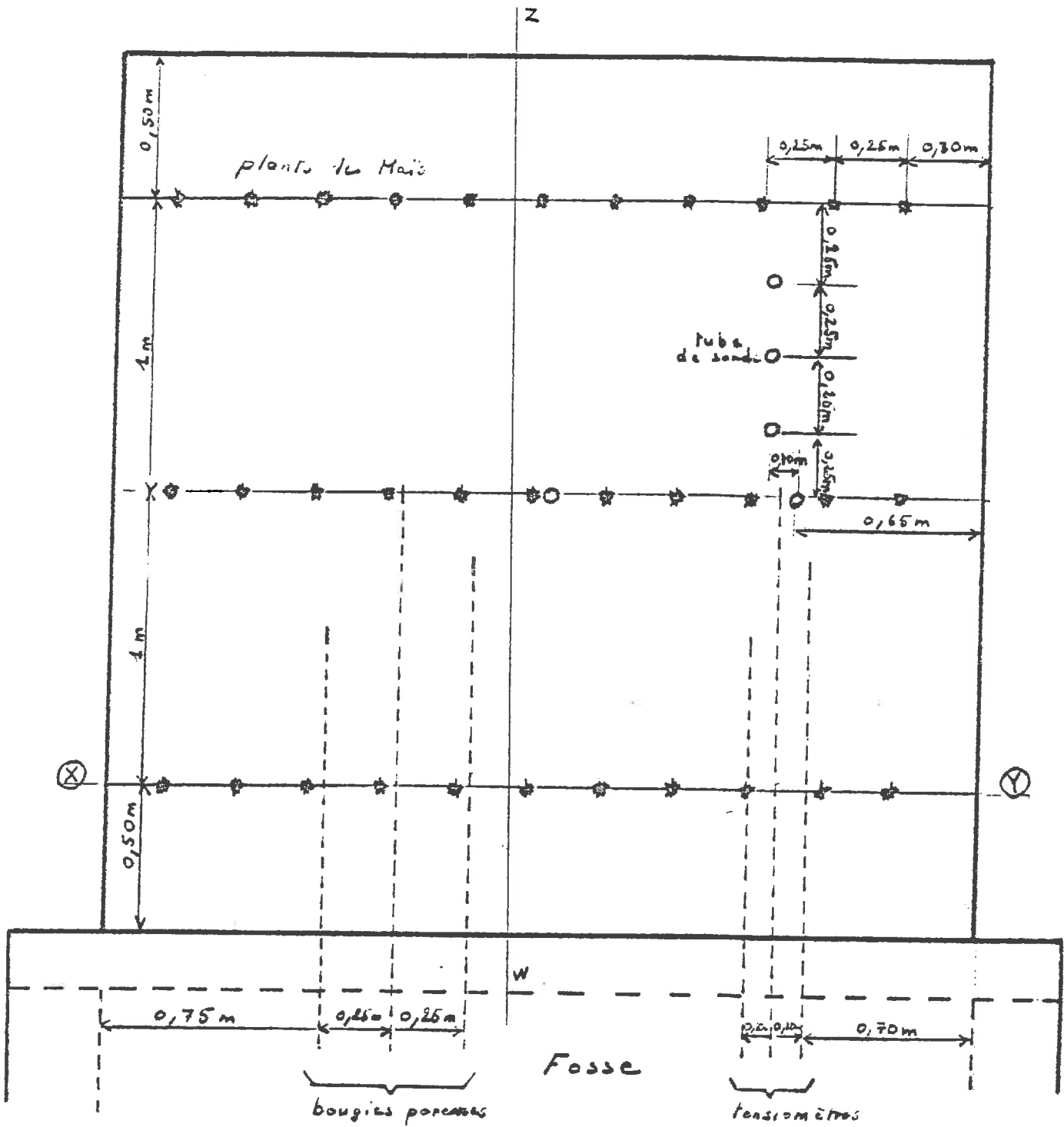
Coupe dans le plan (Z-W)



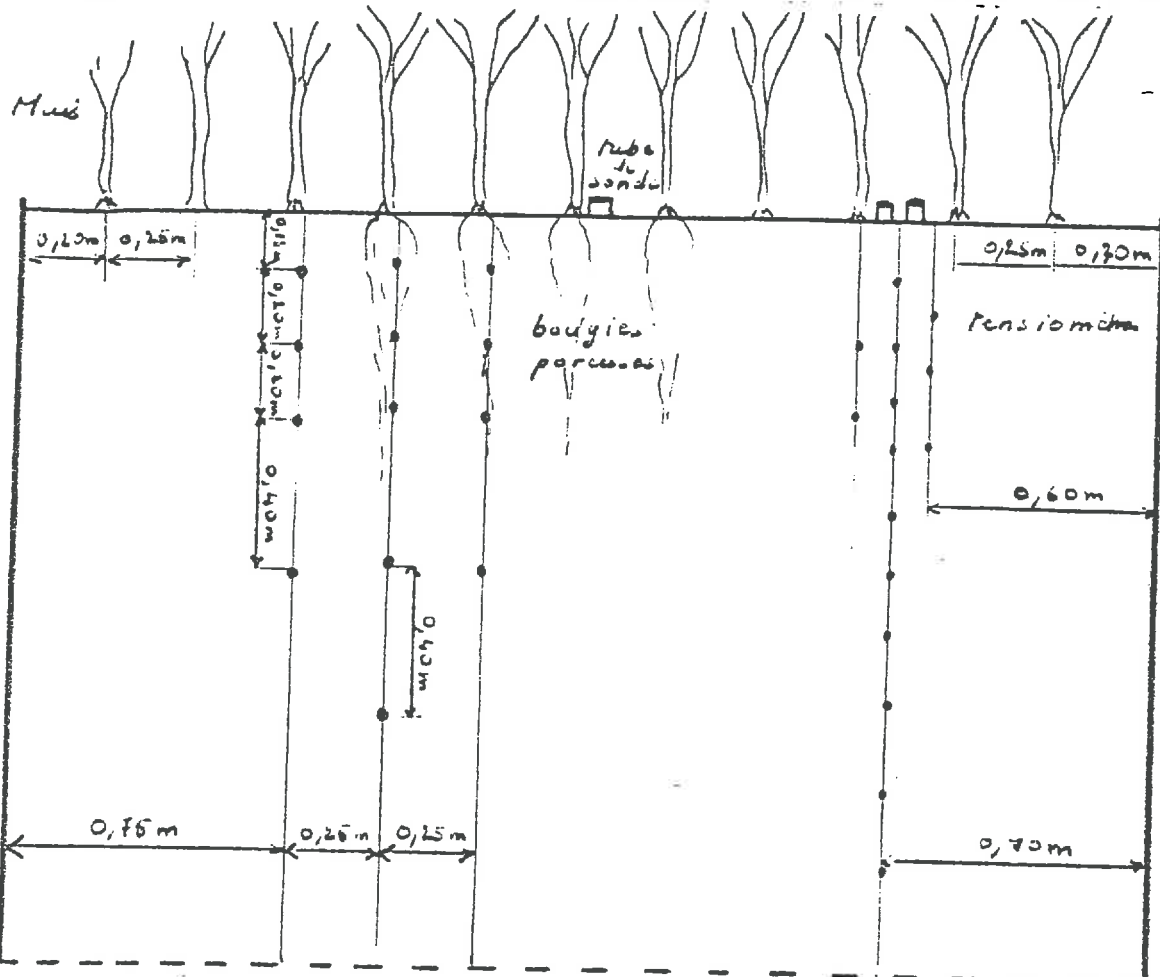
Fig4: Cuve plantée de Maïs n° 5

④

Echelle 1/20

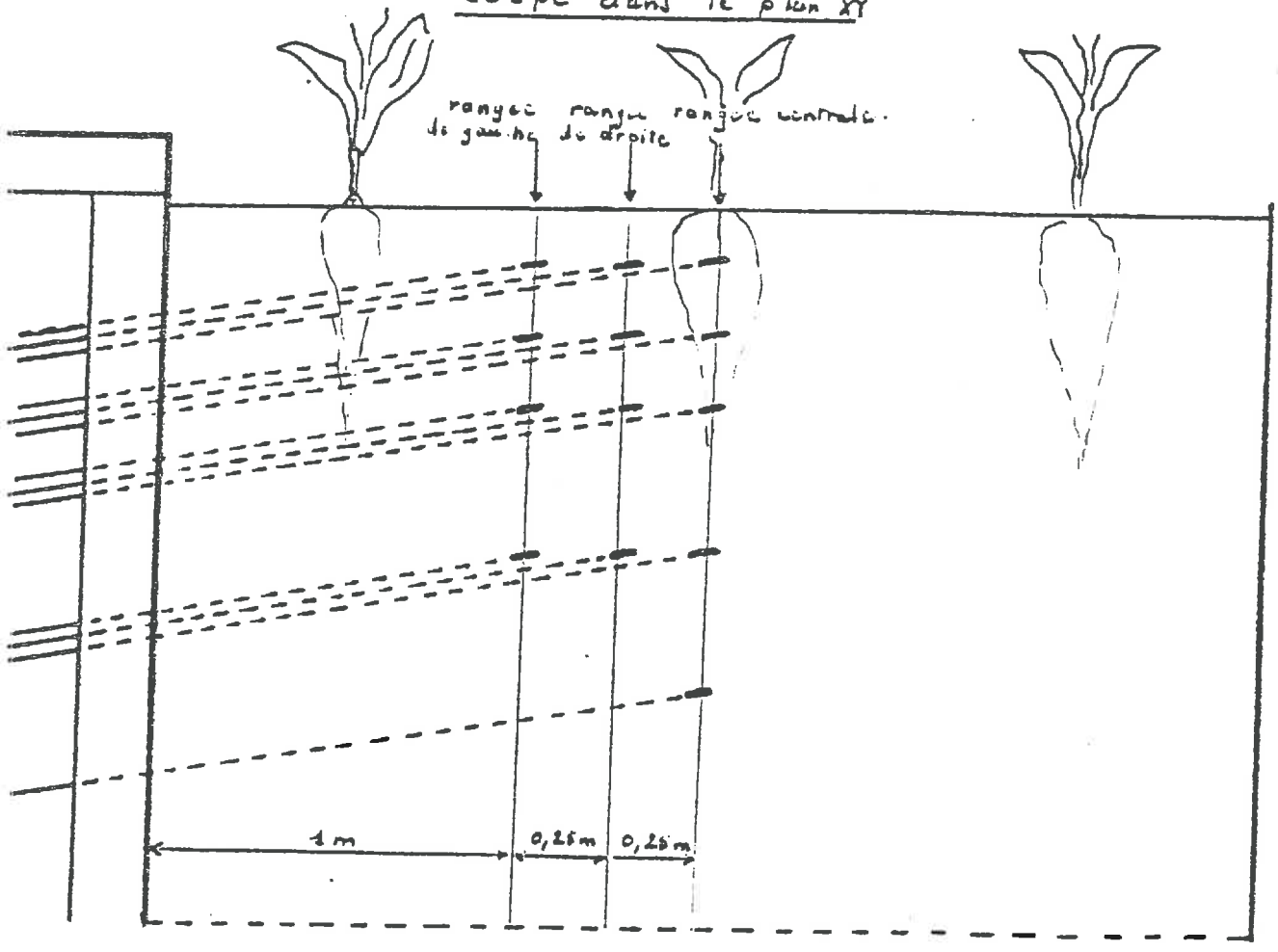


Vue de dessus



⑤  
Echelle 1/2

Coupe dans le plan XY

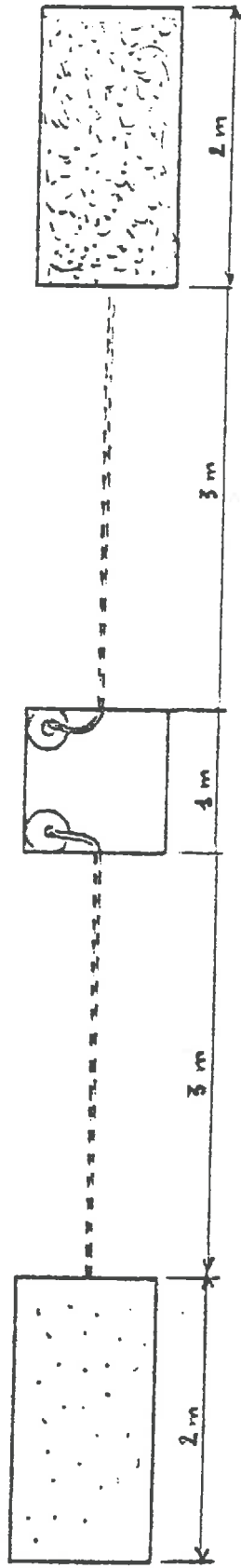


Coupe dans le plan ZW

Fig5 Cuve plantée n°5.

Fig. 6: Emplacement des lysimètres (Échelle 1/50)

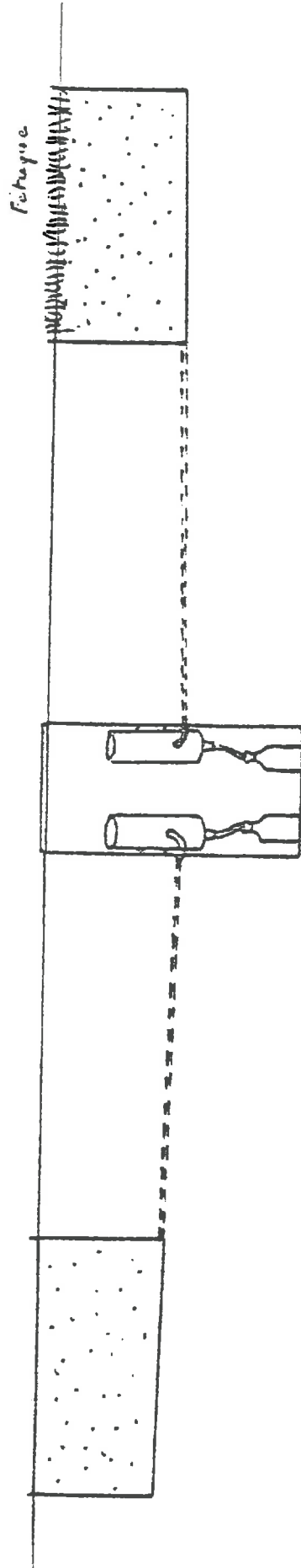
(B)



(A)

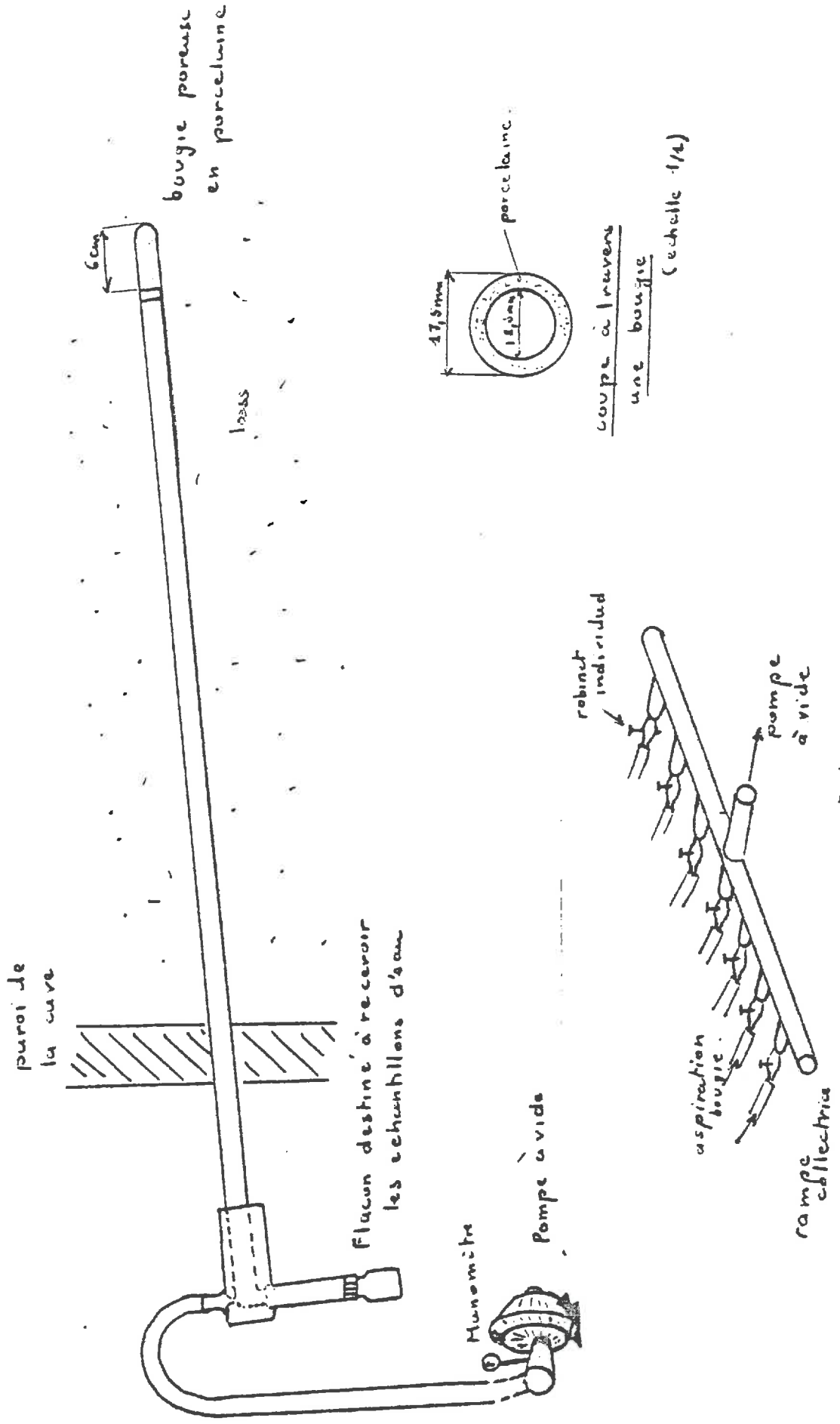
Vue de dessus

Fosse



Coupe dans le plan Médiun.

Fig. 7. Détail d'une canne avec bougie poreuse dans cuve 3 ou 5  
 (échelle 1/5)



Détail du système à dépression

Fig. 8 : CALENDRIER DES EXPERIENCES REALISEES.

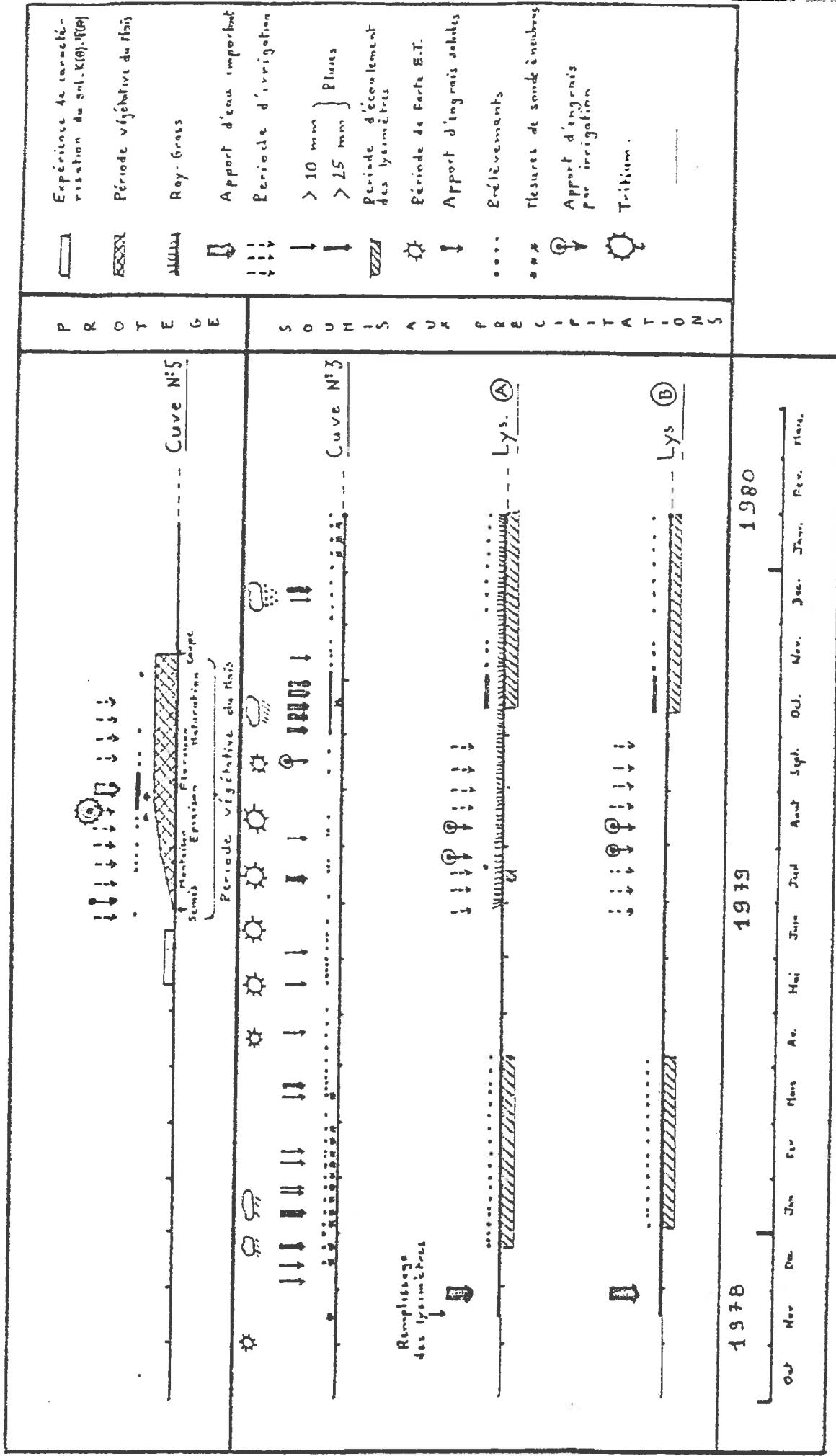
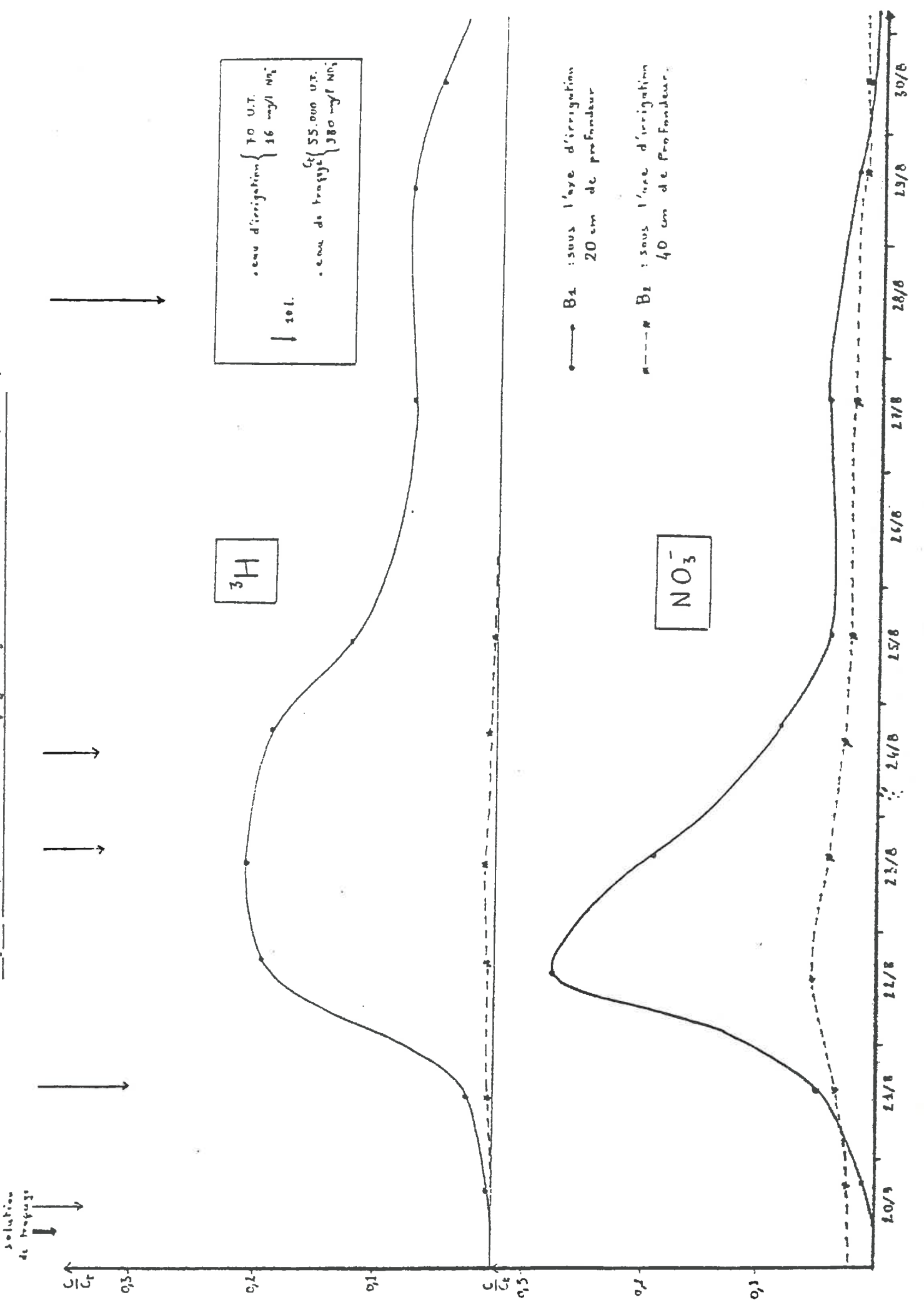


Fig. - : Expérience de traçage  $\text{NO}_3^-$ -H sur la Cuve N°5 Flais (Aout 73)



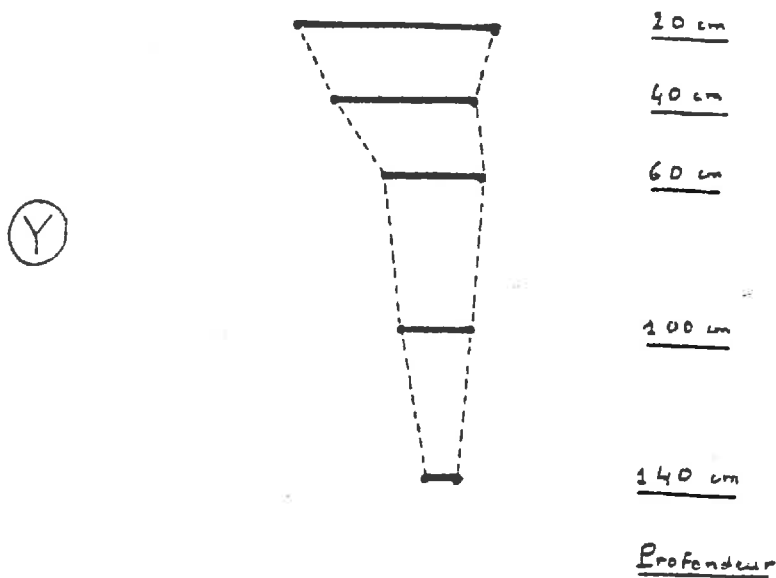
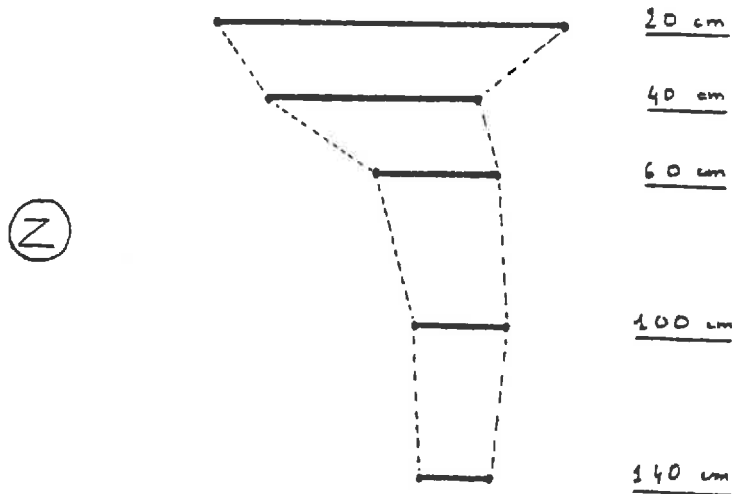
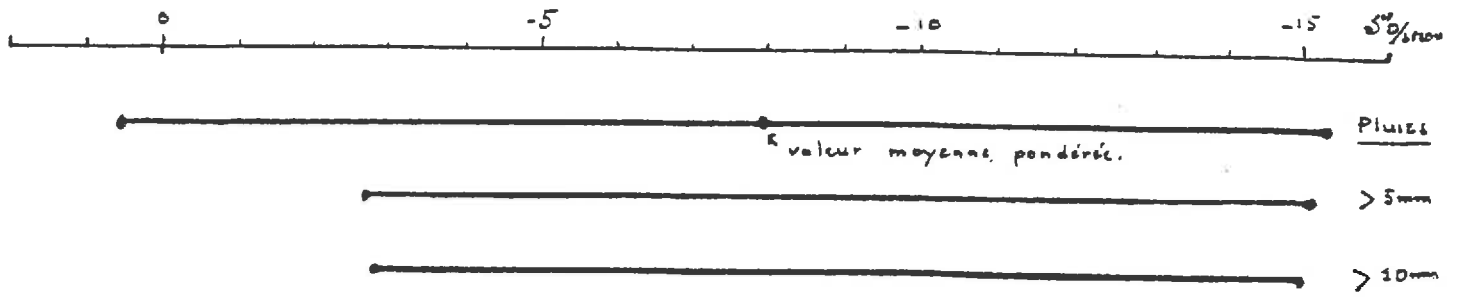


Fig. 10 : Amplitudes du signal "Pluie" et "Infiltration" à différentes profondeurs pour la période du 27/12/78 au 9/1/80

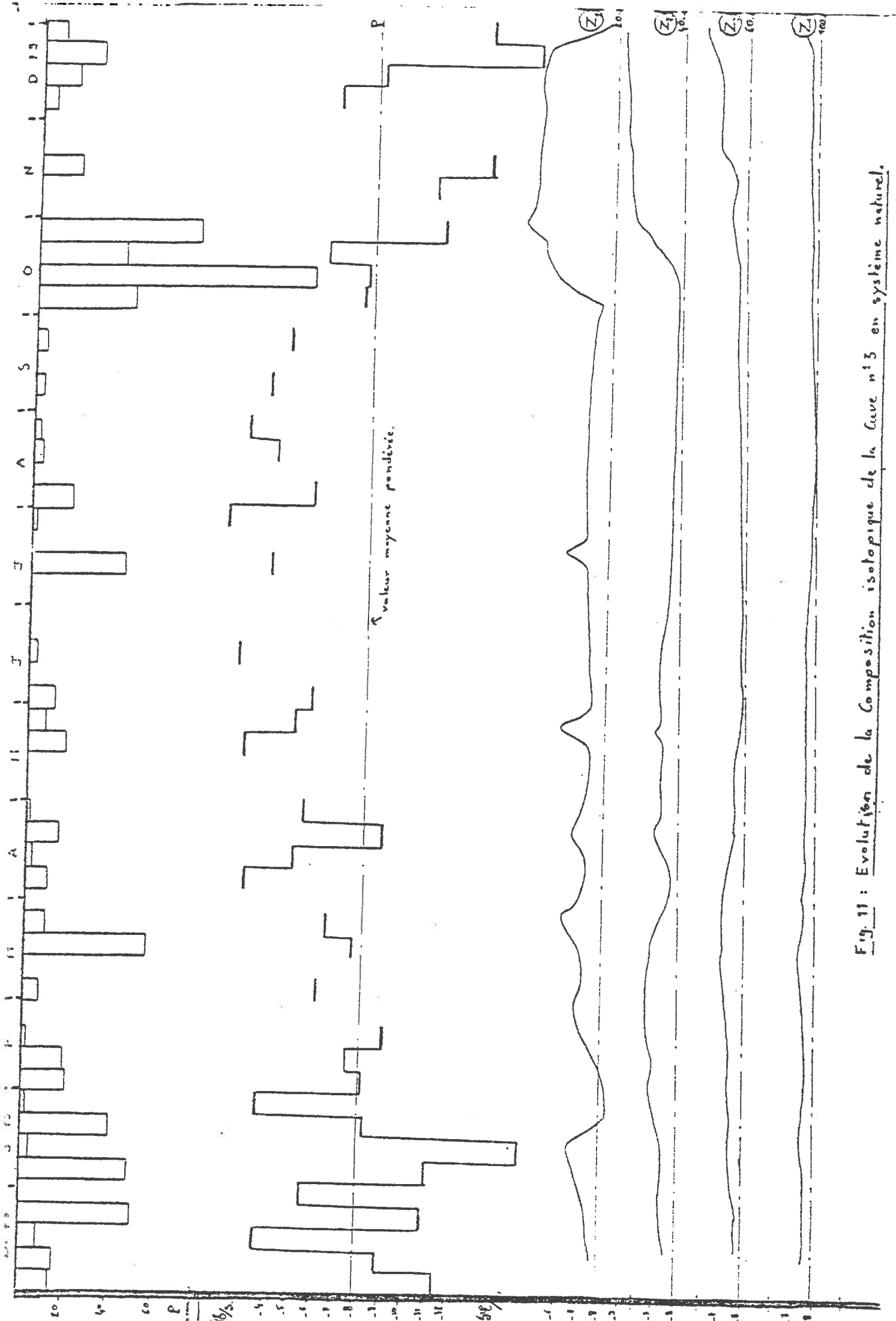
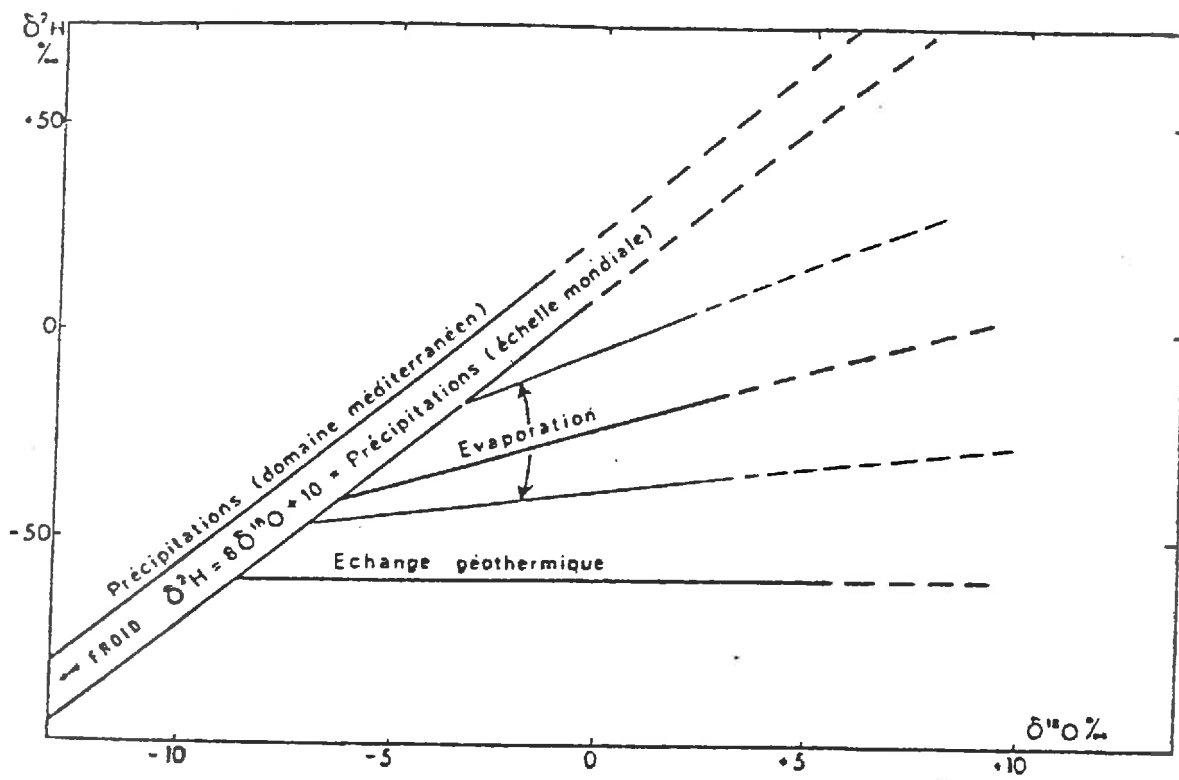


Fig. 11: Evolution de la Composition isotopique de la Cuve n°3 en système naturel.





(d'après FONTES - 1976)

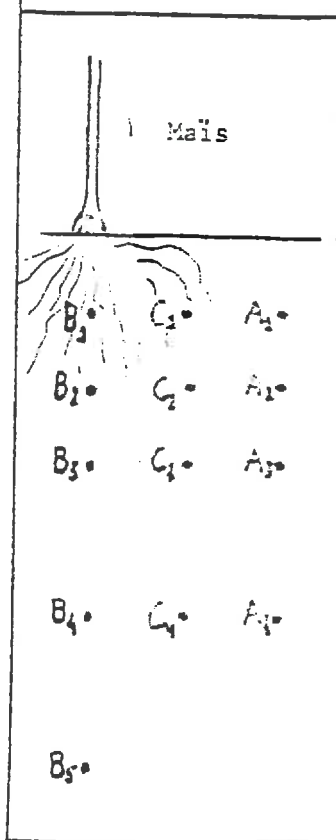
Fig12- Relations oxygène-18 - deutérium dans les eaux naturelles.

Tableau 1 - Résultats de l'expérience (Août 79).

a - Tritium (en U.T.)

	17/8	20/8 20h	21/8	22/8	23/8	24/8	25/8	27/8	29/8	30/8
B1	59 ± 19	109 ± 22	1022 ± 512	10055 ± 563	11263 ± 531	10418 ± 401	7871 ± 196	3712 ± 217	4189 ± 164	3053 ± 51
B2	88 ± 21		58 ± 20	101 ± 21	168 ± 23	115 ± 21	101 ± 21	113 ± 21	109 ± 21	98 ± 21
B3	48 ± 29		137 ± 23	89 ± 20	90 ± 20	71 ± 19	71 ± 19	60 ± 18	44 ± 17	63 ± 19
B4	94 ± 21		132 ± 23							56 ± 22
C1	76 ± 20		51 ± 19	93 ± 20	50 ± 18	71 ± 19	92 ± 20	76 ± 20	85 ± 20	93 ± 20
C2	35 ± 18		85 ± 21							67 ± 23
C3	83 ± 21									106 ± 22
C4	67 ± 20									65 ± 22
A1	94 ± 21		97 ± 21	75 ± 20	82 ± 21	145 ± 24	99 ± 22	84 ± 21	76 ± 20	105 ± 22
A2	90 ± 21		96 ± 21							65 ± 22
A3	70 ± 20									81 ± 20
A4	60 ± 19									99 ± 22

SCHEMA du DISPOSITIF de PRELEVEMENT



b - Nitrates (en mg/l)

	17/8	20/8 20h	21/8	22/8	23/8	24/8	25/8	27/8	29/8	30/8
B1	0,5	7,5	44,9	265	184	80,0	39,5	40,7	19,1	9,3
B2	17,8	18,8	29,1	51,1	43,5	29,8	25,8	19,5	15,9	15,5
B3	47,2	46,6	50,5	57,5	54,2	50,1	46,5	51,4	45,3	41,2
B4	17,5	16,3	22,5	30,2	32,5	27,1	27,9	23,9	24,7	22,8
B5	4,8		6,8		5,7	5,6	5,8	6,9	6,9	4,8

- Les résultats des niveaux A et C qui ont été perturbés par l'apport d'engrais solides (particulièrement C) ne sont pas présentés ici.

## Bibliographie

- ARANYOSSY J.F. (1978)  
Contribution à l'étude des transferts d'eau et de solutés dans la zone non saturée par traçage cationique et isotopique.  
Thèse de 3<sup>e</sup> cycle - PARIS
- BLAVOUX B. (1978)  
Etude du cycle de l'eau au moyen de <sup>18</sup>O et du Tritium.  
Thèse de Doctorat d'Etat (PARIS)
- FEODOROFF (1965)  
Etude expérimentale de l'infiltration de l'eau non saturante.  
Annales Agronomiques, 16, 127-175 - 231-265
- FONTES J.C. (1975)  
Isotopes du milieu et cycle des eaux naturelles - quelques aspects.  
Thèse de Doctorat d'Etat - PARIS
- GAUDET J.P. (1978)  
Transfert d'eau et de solutés dans les sols non saturés - Mesures et simulation.  
Thèse de Doctorat d'Etat, Grenoble.
- GUENNELON R. - CABIBEL B. (1977)  
Applications diverses de la Méthode d'humidimétrie neutronique au contrôle et à l'utilisation des réserves hydriques des sols.  
Annales Agronomiques, 1977, 28, 489-502.
- HANSEN E.A., HARRIS A.R. (1975)  
Validity of Soil-Water samples collected with porous ceramic cup.  
Soil Sc. Soc. of Am. Proc. 1975, vol.39, pp. 528-536.
- HILLEL D. (1973)  
L'eau et le Sol. Principes et Processus Physiques. Vander, Editeur.
- LE LEUCH M., BOURGUET M. (1979)  
Rôle des sols dans le fonctionnement hydrodynamique d'un bassin versant élémentaire schisteux en Bretagne.  
Traçage naturel de l'eau par l'<sup>18</sup>O  
S.D.S. 157  
Ecol. Nat. Sup. Ag. de Rennes  
Inst. Nat. de la Rech. Agro. Centre de Rennes
- PEIROLO Joël (1979)  
Les composantes de l'écoulement d'un bassin versant en fonction de l'humidité d'une toposéquence.  
Thèse de 3<sup>e</sup> cycle, PARIS.

- SCHERMANN D. (1977)

Transfert des Nitrates à travers la zone non saturée,

Travail de fin d'Etude ENPC.

Agence Fin. Bas. Seine-Normandie

- SIWERTZ E. (1973)

Etude expérimentale par le Tritium et l'<sup>18</sup>O de l'infiltration sur les lysimètres et le Bassin de Thonon.

Thèse de 3<sup>e</sup> cycle, PARIS.

CHAPITRE IV

ROLE DE LA PLANTE DANS L'EVAPOTRANSPIRATION

A. BERGER

C.N.R.S.

Centre d'Etudes Phytosociologiques

et Ecologiques Louis Emberger

34033 MONTPELLIER CEDEX

## INTRODUCTION

Dans notre approche nous considérerons la plante comme une mèche conduisant l'eau, du sol vers l'atmosphère, par l'intermédiaire de deux échangeurs : la racine et la feuille. Un certain nombre de caractéristiques morphologiques et physiologiques de la racine, la tige ou la feuille interviennent dans l'évolution journalière et saisonnière de ce transfert.

Par la combinaison d'approches micrométéorologiques et écophysiologiques nous nous proposons d'étudier l'impact de quelques unes de ces caractéristiques intervenant dans l'équilibre hydrique du végétal.

Dans ce but nous avons réalisé sur une culture de Dactylis glomerata L. var. Floréal une série de mesures au niveau de la plante et des échanges entre la plante et le sol et entre la plante et l'atmosphère. L'ensemble des résultats obtenus sont intégrés par un modèle élaboré par ailleurs.

L'état hydrique du végétal dépend des valeurs relatives de ses pertes d'eau (transpiration) et de ses gains (absorption). Transpiration et absorption sont régulées par divers mécanismes de façon à maintenir l'état hydrique du végétal compatible avec un fonctionnement aussi proche que possible de son optimum. Cet état hydrique peut être caractérisé, soit par la teneur en eau et ses dérivés, déficit de saturation hydrique (DSH) ou turgescence relative (TR), soit par l'énergie de liaison de l'eau dans le végétal souvent exprimée en terme de potentiel hydrique ( $\Psi$ ).

On sait que lorsque le potentiel hydrique ( $\Psi_p$ ), au niveau de la plante, s'abaisse, la transpiration (TR), sous conditions d'ETP constantes, reste stable dans une large gamme de potentiel puis à partir d'un certain potentiel ( $\Psi_c$ ) diminue. L'absorption (A), pour sa part, augmente lorsque le potentiel diminue et la relation  $A = f(\Psi_p)$  dans quelques cas peut être assimilée à une droite et caractérisée par une ordonnée à l'origine et une pente. Le point d'équilibre hydrique correspond à l'intersection des courbes de transpiration (TR) et d'absorption (A).

Notre approche consiste à étudier quelques uns des paramètres physiologiques et morphologiques dont dépendent les relations  $TR = f(\psi_p)$  et  $A = f(\psi_p)$ . Les paramètres physiologiques retenus sont :

- 1) Le potentiel critique ( $\psi_c$ ) et son évolution au cours de la saison de croissance.
- 2) L'ordonnée à l'origine de la relation  $A = f(\psi_p)$  représente le potentiel hydrique moyen du sol exploité par le végétal. En effet, il s'agit là de la valeur de potentiel atteinte par le végétal lorsque la transpiration est nulle. Cette assimilation du potentiel d'équilibre de la plante au potentiel moyen du sol n'est pas totalement rigoureuse mais donne, toutefois, une bonne approximation de celui-ci dans les cas très fréquents où il est difficile de mesurer et d'intégrer le potentiel hydrique et la densité d'enracinement de chaque strate de sol.

La pente de cette même relation correspond à la résistance à la circulation de l'eau dans le système sol-plante ( $r_{sp}$ ).

Le point d'équilibre hydrique est obtenu à l'intersection des courbes TR et A.

Le seuil critique ( $\psi_c$ ) correspond à la valeur de potentiel pour laquelle les stomates débutent leur fermeture et pour laquelle la résistance à la diffusion de vapeur d'eau à travers l'épiderme ( $r_{ep}$ ) augmente (fig. 4).

L'ensemble de notre modèle peut donc être résumé par les 2 relations qui en constituent la charpente essentielle.

$$A = \frac{\psi_p - \psi_s}{r_{sp}}$$

$$TR = \frac{C_f - C_a}{r_{ep}}$$

relation dans laquelle  $C_f$  et  $C_a$  sont respectivement la concentration en vapeur d'eau dans la chambre stomatique de la feuille et dans l'air.

## RESULTATS

L'évolution journalière et saisonnière d'un certain nombre de paramètres ont été mesurés sur une culture de Dactyle (Dactylis glomerata L.).

- a) Résistance épidermique à la diffusion de la vapeur d'eau  $r_{ep}$  (fig. 1) ou son inverse la conductance  $k_{ep}$  (fig. 2) (tableau 1).
- b) Potentiel hydrique des feuilles ( $\Psi_p$ ) (fig. 1) (tableau 1).
- c) Transpiration d'un quart de  $m^2$  de végétation soit par pesée de pots, soit par mesure gazométrique (D) (fig. 2) (tableau 1).

De ces résultats bruts nous avons pu tirer les paramètres de modèle soit,  $R_{sp}$  et  $\Psi_s$  (fig. 3),  $\Psi_c$  (fig. 4).

Parallèlement à ces études physiologiques ont été menées des campagnes de mesures portant sur l'évolution de la densité d'enracinement, de bilan hydrique du sol, d'évapotranspiration par une méthode micrométéorologique et par une méthode gazométrique utilisant des enceintes climatisées couvrant  $1 m^2$  de sol.

### Profil de densité racinaire

Trois mesures ont été faites, les 25 avril, 1<sup>er</sup> juin et 27 juillet. Dans chaque cas on a prélevé à la tarière des carottes verticales de 10 cm de hauteur jusqu'à une profondeur de 80 cm.

Les racines sont lavées à l'eau, puis traitées pendant deux heures au pyrophosphate de sodium (dispersant les argiles) et rincées à l'eau sur des tamis, puis placées à l'étude pour déterminer le poids sec.

Pour chaque date on a pris la moyenne de trois mesures. La variation d'une date à l'autre est relativement faible et on retrouve plus de 70 % de la biomasse dans les premiers vingt centimètres (tableau 2).

Nous n'avons pas séparé les racines mortes et vivantes de la biomasse totale. La différenciation par coloration sélective n'est pas suffisante, de plus les racines lignifiées peuvent, semble-t-il, extraire de l'eau du sol. Seuls des profils de densité racinaire par strate, proportionnels à la biomasse de la strate sont pris en compte à ce niveau de modélisation.



Les profils de longueur ( $l_z$ ) et de section des racines fonctionnelles seraient plus adaptés mais de nombreuses incertitudes conceptuelles existent dans la modélisation de l'extraction de l'eau par le système racinaire.

#### Estimation du bilan hydrique du sol

Sur la période test du 2 juin au 27 juillet, choisie pour la vérification du modèle du système SPAC, la mesure des profils hydriques et de potentiel associés a permis le calcul des termes du bilan hydrique. Ces estimations servant de référence aux mesures microclimatiques et par enceintes climatisées. Durant cette période, la méthode du plan de flux PFN seule a été utilisée car le PFN se déplace de la profondeur 112 cm le 2.6 à 158 cm le 27.7, c'est-à-dire qu'il se trouve toujours au-delà de la zone racinaire  $z_r = 80$  cm et au-dessus de la profondeur maximale d'exploitation  $z_{LIM} = 200$  cm. Le tableau 3 montre l'ensemble des résultats obtenus.

#### Mesures microclimatiques

Ces mesures devaient servir au calcul de l'évapotranspiration réelle (ou flux de chaleur latente LE)

$$LE = R_n - H - S$$

$R_n$  rayonnement net est mesuré directement et S flux de chaleur dans le sol est calculé à partir des variations du profil thermique dans le sol du profil d'humidité mesuré à la sonde à neutrons.

H devait être calculé par une méthode aérodynamique à partir du profil de vitesse du vent (mesures à 4 hauteurs) et de la différence de température de l'air ( $\Delta T$ ) entre deux niveaux : 32 et 162 cm. Les faibles dimensions de la culture de dactyle (30x40 m) ne permettent pas au profil de température de se développer jusqu'à 162 cm et le calcul sous-estime les valeurs réelles de H et surestime donc celles de LE. Le sens des variations est correct : on observe une augmentation progressive de H lorsque le sol se dessèche, et une diminution brusque après une pluie. Nous envisagerons par la suite d'"étalonner" la méthode aérodynamique en la calant sur l'ETR estimée par la mesure des variations de stock hydrique dans le sol, et d'utiliser le coefficient ainsi déterminé pendant toute la période de mesures.

Même sans ce traitement un peu empirique, les mesures microclimatiques conservent leur intérêt comme données d'entrée (et pour certaines, de test) du modèle de circulation d'eau dans le système sol-plante-atmosphère.

Les unités ont été moyennées sur une demi-heure à l'aide d'un système à microprocesseur, puis enregistrées sur ruban perforé, retranscrites sur cassette et traitées à l'aide d'un calculateur WANG 2200S.

Ces mesures réalisées du 10 au 26 juillet et du 16 juin au 29 juillet, ont porté sur les facteurs suivants :

- Rayonnement global, réfléchi, total et net
- Température de l'air et température de rosée à 2 m
- Vitesse du vent à 50, 100, 200 et 400 cm
- Différence de température de l'air entre 32 et 162 cm
- Températures du sol à 1, 2, 5, 10, 20, 40, 60, 80 et 100 cm.

Pour chaque journée on a calculé le flux de chaleur dans le sol et l'ETP (chaque demi-heure).

#### Mesure de la transpiration par la méthode des enceintes climatisées (tableau 1)

Ces mesures ont porté sur 1 m<sup>2</sup> de végétation recouvert d'une enceinte climatisée de telle façon que l'humidité relative et la teneur en CO<sub>2</sub> soit les mêmes qu'à l'extérieur. Les résultats obtenus par cette méthode donnent de bons bilans journaliers mais ne permettent pas de suivre aussi finement les variations journalières que la méthode micrométéorologique, qui elle par contre, nous venons de le voir, surestime l'évapotranspiration.

#### CONCLUSION

Au cours de ce travail, la caractérisation d'un certain nombre de paramètres morpho-physiologiques a été réalisée. Simultanément, et c'est là ce qui constitue son originalité, des données concernant les flux évapotranspiratoires et le bilan hydrique du sol ont été obtenues. Les premiers étaient destinés à entrer dans un modèle de simulation numérique dont le fonctionnement devait permettre de générer des flux et des bilans et de les comparer à ceux réellement observés. Le modèle devait également permettre de faire une analyse de sensibilité aux différents

paramètres morphophysiologiques sur le fonctionnement du système. Une analyse préliminaire montre que les valeurs de la résistance épidermique à la diffusion de la vapeur d'eau a un fort impact. Il semble donc qu'il faille à l'avenir améliorer la connaissance de ce paramètre, de ses réponses aux facteurs du milieu et également de sa variabilité spatio-temporelle.

Tableau 1

Date	Transpiration journalière (TR) g.m <sup>-2</sup>	$\Psi_p$ 14h bars	$\Psi_p$ max bars	$\Psi_p$ min bars	$r_{ep}$ min s.cm <sup>-1</sup>	$r_{ep}$ 10h s.cm <sup>-1</sup>	$r_{ep}$ 14h s.cm <sup>-1</sup>	$r_{ep}$ 17h s.cm <sup>-1</sup>
11-06	3300,0							
12-06	2500,0							
.								
.								
17-06	4800							
18-06	1100							
19-06	3700							
20-06	4200							
21-06	4400							
22-06	3160							
23-06	3800	18	19	1	0,5	0,5	2	2,5
24-06	3400							
25-06	3700							
26-06	4800				0,5	0,5	2,2	2,7
27-06	4100							
28-06	3200							
29-06	1600							
30-06		21	21,5	1,5				
.								
.								
6-07	4700	23	24,5	2	0,7	3,5	3,46	4,8
7-07		22	25	2	1,8	1,8	9,56	8,63
x 8-07					4	4,1	14	
.								
.								
11-07	3000							
12-07	2700							
13-07	3000	24	25,5	3	1,6	1,6	1,75	3,7
14-07	2800							
15-07	2700	26	33	8	4,2	12	34	4
16-07	2300							
17-07	2700							
18-07	2700							
19-07								
20-07								
21-07		35,5	35	7	2	16,8	22	10,26
23-07								
24-07								
25-07		25	31	7	4	11,45	5,6	8

x faible luminosité

Tableau 2 (d'après MAHBOUBI, 1978)

Profondeur	25 avril 78	1 juin 78	27 juillet 78
0.10	61.4	50.2	34.8
10.20	13.2	20.0	13.5
20.30	8.3	11.4	22.6
30.40	4.5	7.0	8.8
40.50	4.1	4.2	6.6
50.60	4.0	3.3	7.5
60.70	2.4	2.5	2.5
70.80	2.1	1.4	3.8

Densité d'enracinement en % de la biomasse racinaire totale

Tableau 3

Période	$\Delta t$	P	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	$\Delta S$	PFN <sub>1</sub>	PFN <sub>2</sub>	ETR	D	ETR/ $\Delta t$ (mm j <sup>-1</sup> )	ETP/ $\Delta t$ (mm j <sup>-1</sup> )	ETR/ETP
2.6 au 9.6	7	5,9	705,8	690,3	-15,5	112	115	23,4	-	3,34	4,71	0,71
9.6 au 16.6	7	7,1	690,3	674,7	-15,6	115	117	20,4	2,3	2,91	4,43	0,66
16.6 au 23.6	7	14,5	674,7	664,5	-10,2	117	122	23,4	1,3	3,34	5,2	0,64
23.6 au 30.6	7	22,5	664,5	663,4	-1,1	122	132	22,4	1,2	3,20	5,5	0,58
30.6 au 6.7	6	1,0	663,4	632,7	-30,7	132	139	29,4	1,3	4,90	5,67	0,86
6.7 au 13.7	7	21,0	632,7	637,1	+ 4,4	139	151	17,0	0,4	2,43	5,41	0,45
13.7 au 20.7	7	0,0	637,1	621,2	-15,9	151	154	14,3	1,6	2,04	5,44	0,38
20.7 au 27.7	7	0,0	621,2	609,9	-11,3	154	158	12,0	-	1,71	5,84	0,29

$\Delta t$  : intervalle entre 2 mesures (en jours)

P : précipitations pendant  $\Delta t$  (en mm)

S<sub>1</sub> et S<sub>2</sub> : stock en début et en fin de l'intervalle  $\Delta t$  (mm)

S : variation de stock (mm)

PFN<sub>1</sub> et PFN<sub>2</sub> : profondeur du plan de flux nul en début et fin d'intervalle (cm)

ETR : évapotranspiration réelle pendant  $\Delta t$  (mm)

D : drainage ou remontée capillaire pendant  $\Delta t$  (mm)

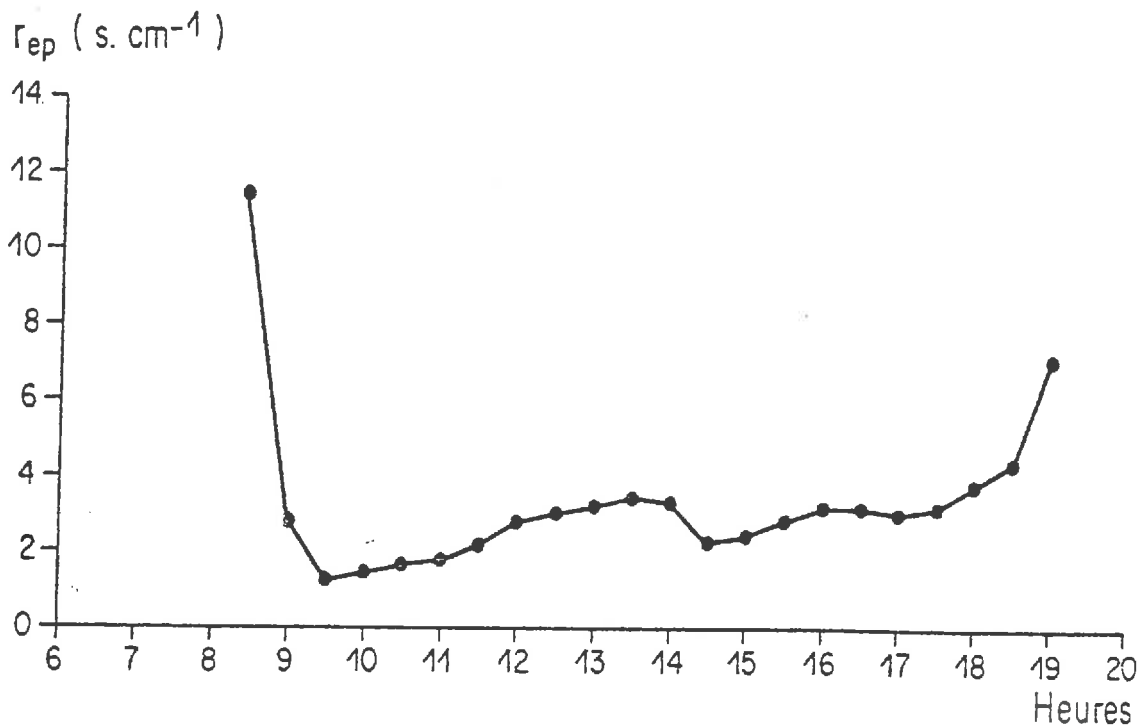
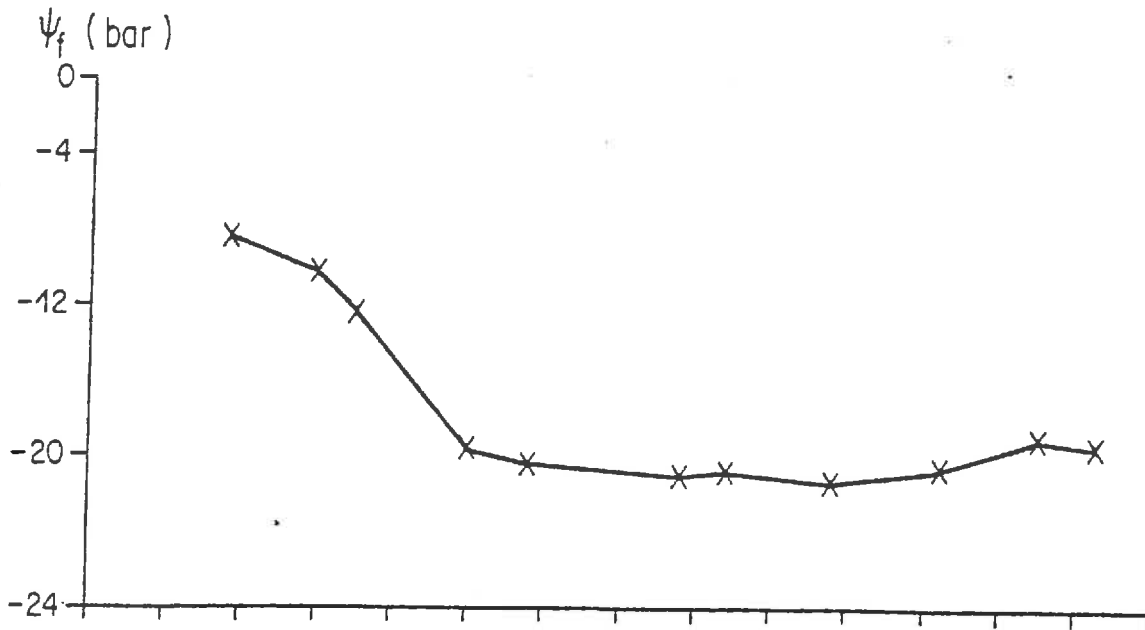


Figure 1 : Evolution journalière de la résistance épidermique ( $r_{ep}$ ) et du potentiel des feuilles ( $\Psi_p$ )

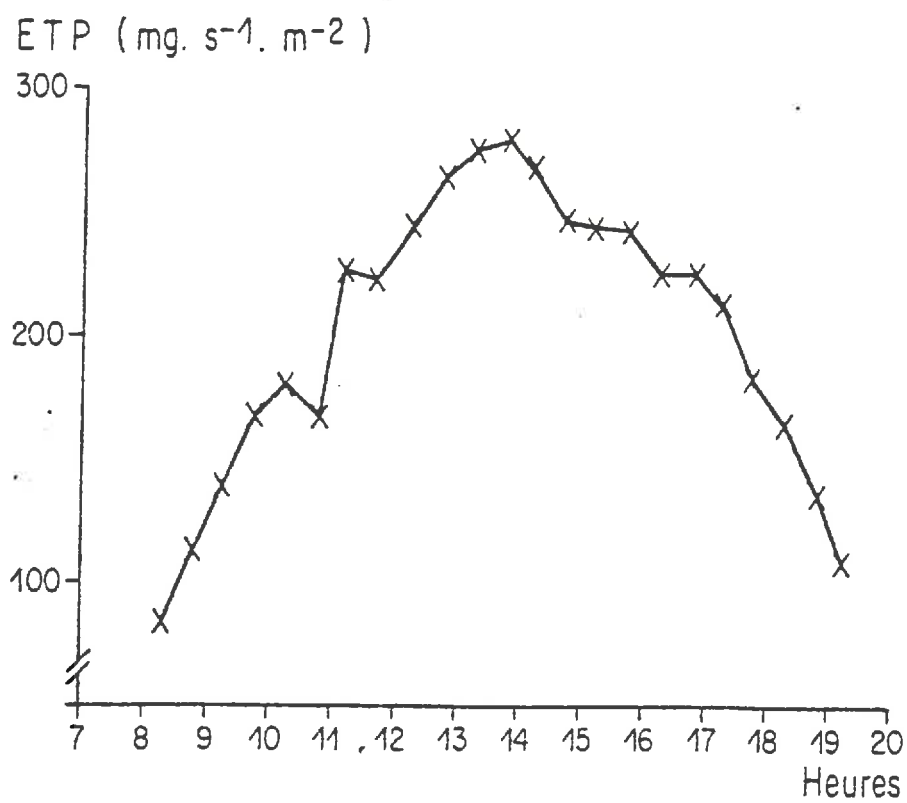
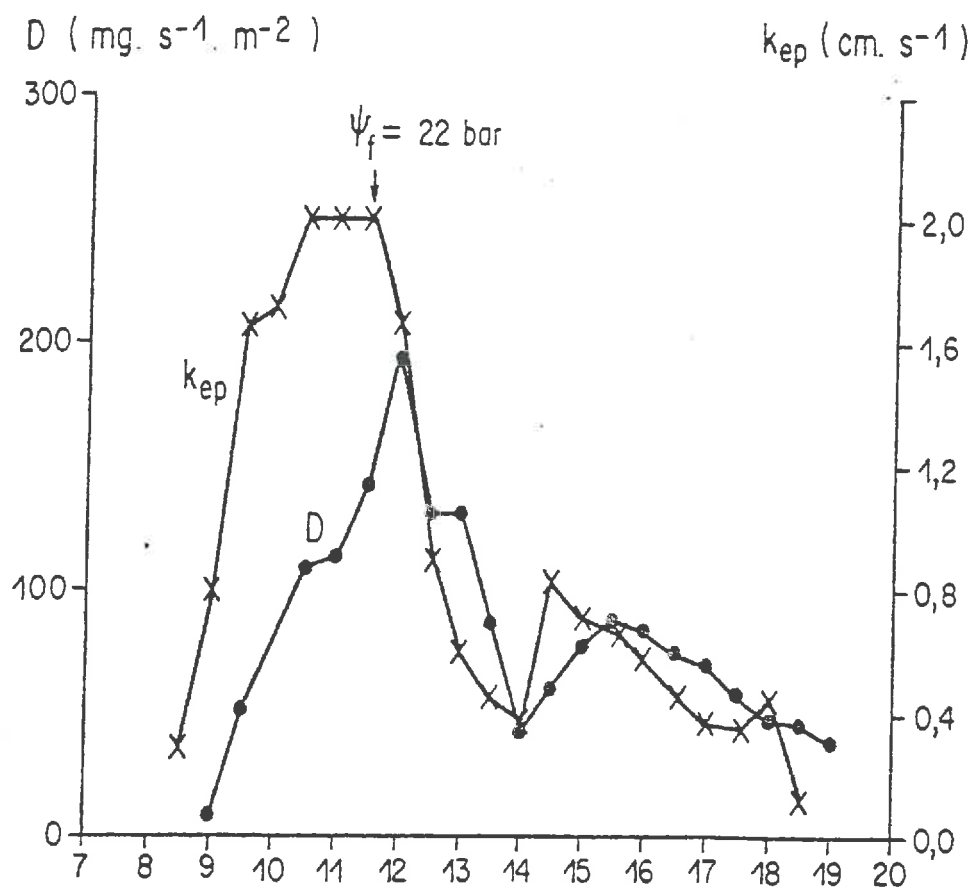


Figure 2 : Evolution journalière du débit d'eau dégagé par la parcelle (D), de la conductance épidermique ( $K_{ep}$ ) et de l'évapotranspiration potentielle (ETP).



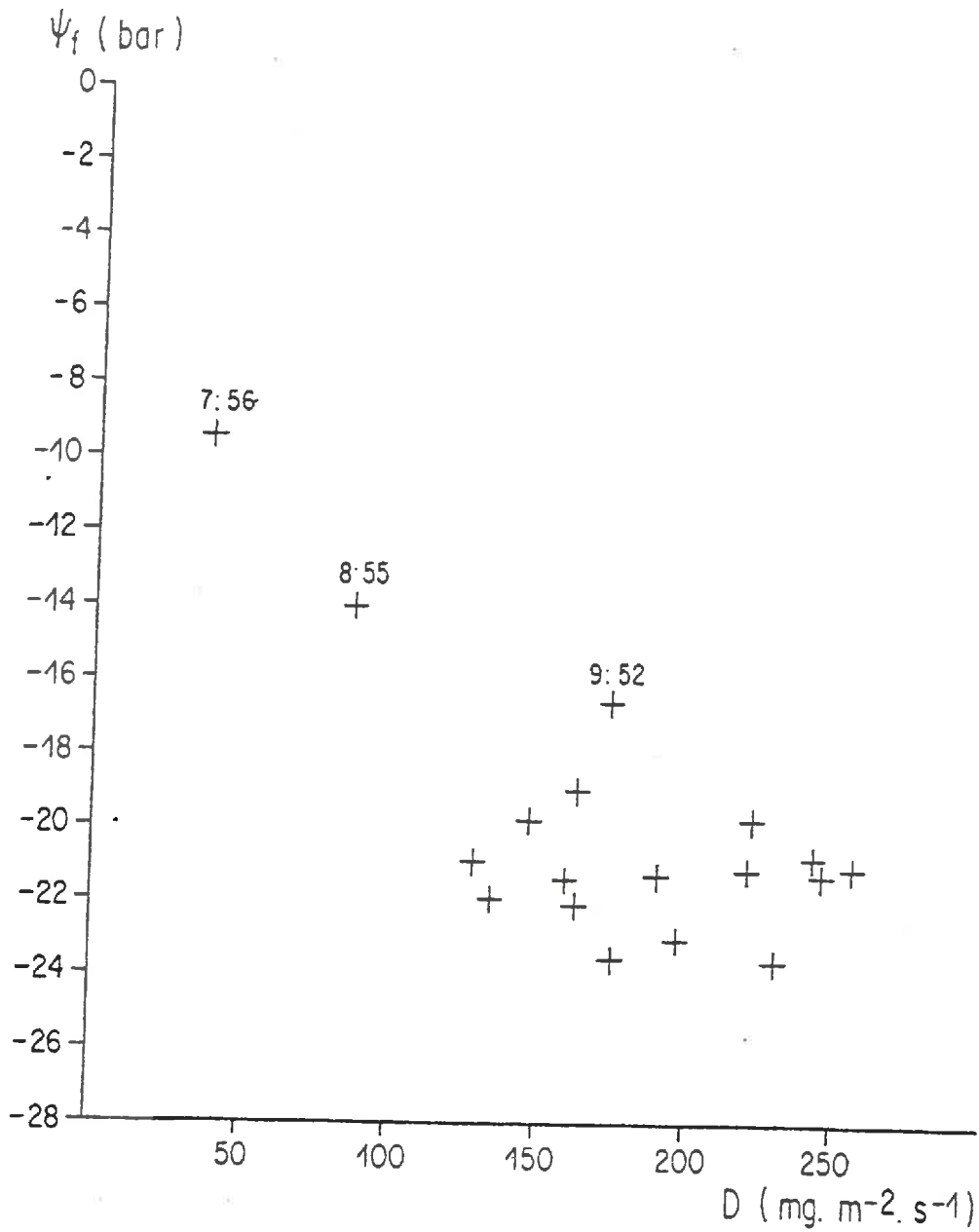


Figure 3 : Relation entre le potentiel hydrique de la plante ( $\Psi_p$ ) et la quantité d'eau absorbée dans le sol (A).

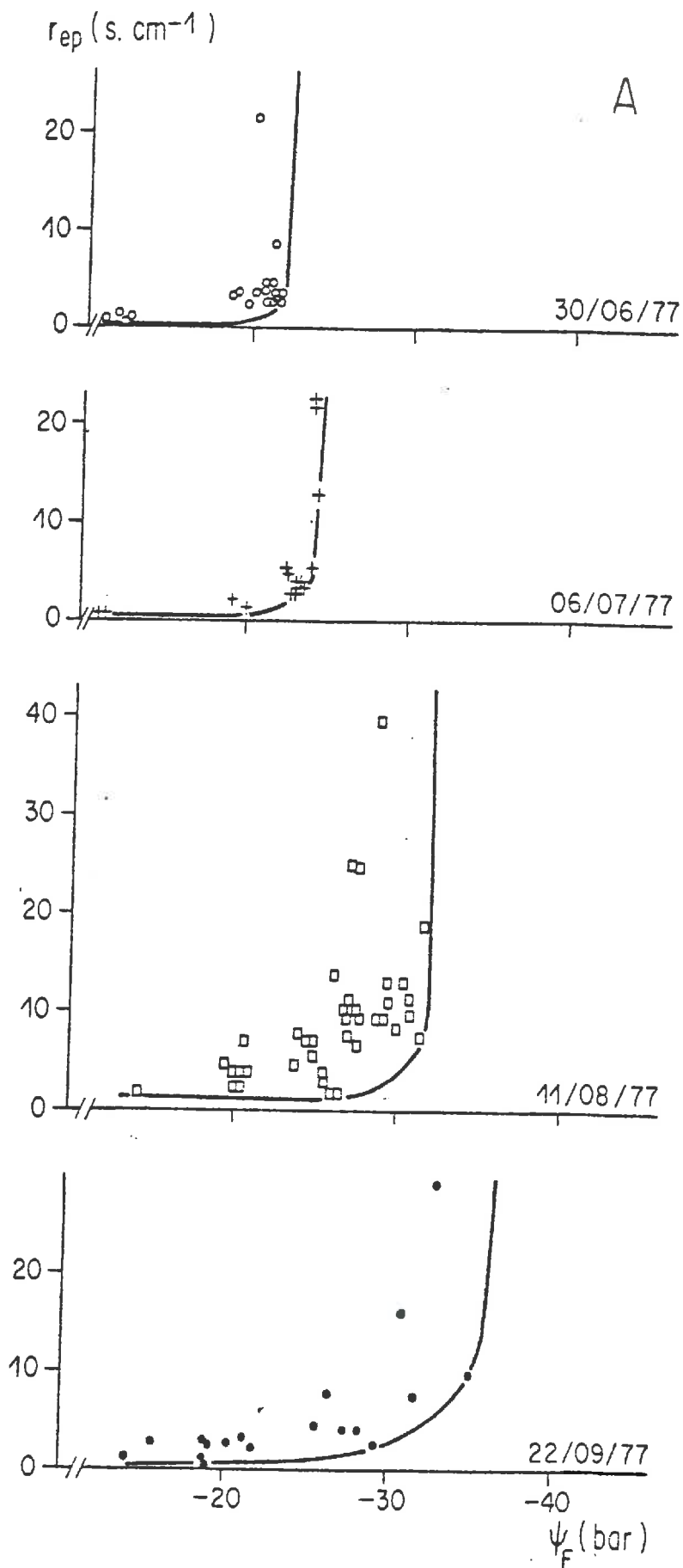


Figure 4 : Relation entre la résistance épidermique ( $r_{ep}$ ) et le potentiel hydrique des feuilles ( $\psi_F$ )<sup>ep</sup> (*Dactylis glomerata* soumis à des conditions de sécheresse progressive du sol).

CONCLUSIONS GENERALES

---

## CONCLUSIONS.

Si l'on rattache aux travaux précédents l'étude expérimentale et la simulation numérique d'un protocole d'irrigation, réalisée <sup>(1)</sup> par P. COUCHAT et al. (Cadarache), on dispose d'un ensemble de résultats réalisés en conditions climatiques méditerranéennes, qui permettent de mieux comprendre le fonctionnement de l'irrigation localisée fertilisante.

Les approches par modélisation sont certes de plus en plus performantes, d'autant plus que leurs auteurs ont maintenant bien conscience des variabilités de milieu qui peuvent en altérer la généralité. En particulier, lors du démarrage d'une phase d'irrigation (comme d'ailleurs après une averse), l'approfondissement du bulbe est plus important que ne le laissent prévoir les simulations. Cela est dû au rôle joué par la porosité structurale que les équations de transfert ne prennent presque jamais en compte, établies qu'elles sont pour un milieu homogène. Par chance, ces équations (et donc les modèles) redeviennent valides après quelque temps de fonctionnement, ce qui permet de prédire assez bien l'extension des bulbes. De plus, à cause de la faible contribution (en volume) de la porosité de structure vis-à-vis de la porosité totale, la teneur en eau à la frontière du bulbe en profondeur est faible, ce qui dans la pratique permet de définir un front "efficace", correspondant à un isohyète de valeur plus élevée, délimitant un volume mouillé plus petit que le volume réel, mais contenant la majeure partie de l'eau apportée.

Il en est de même pour les sels dont une petite quantité peut progresser assez loin par les pores et les fissures du sol, mais dont une grande partie diffuse et est retenue dans la porosité texturale. Dans une fertilisation bien conduite, cette eau et ces engrais présents dans le bulbe devraient être utilisés au fur et à mesure par la plante, c'est-à-dire avoir une efficacité élevée, et ne pas contribuer à la pollution des nappes.

Ces sels stockés dans la porosité fine ne sont remis que lentement en circulation, si l'eau des précipitations circule rapidement, car la diffusion, permettant leur sortie des mottes ou des agrégats est un phénomène très lent.

---

(1) Compte rendu d'A.C.C. Décision d'aide P25 ; Rapport transmis le 7 Juillet 1980 sous la référence DB/SRA 479/80 PhC/MB.

Le pilotage automatique de l'irrigation localisée par des capteurs appropriés est un moyen de limiter l'extension du bulbe à la zone exploitée par les racines, donc de contrôler l'utilisation de l'eau et des engrais.

Les travaux présentés dans ce rapport montrent indubitablement tous les avantages que présente l'irrigation localisée, compte non tenu de ceux qu'on lui reconnaît par ailleurs :

- meilleure traficabilité,
- diminution des pertes d'eau par évaporation,
- contrôle plus facile des adventices,
- réduction possible des coûts de main d'oeuvre.

Des recherches complémentaires doivent être poursuivies sur l'incidence de ce mode d'irrigation sur le développement du système racinaire, sur son fonctionnement, sur la réduction éventuelle des périodes de stress hydrique aux heures les plus chaudes de la journée et sur les techniques de mesures, donc de pilotage, dans les sols argilo-calcaires et argileux très fissurés.