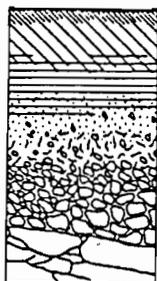


CARACTERISATION
HYDRODYNAMIQUE "IN SITU"
DES SOLS ALLUVIAUX
DE LA VALLEE DE KATOURE
(BASSE CASAMANCE)

1. SOL SABLEUX



J.P. MONTOROI

J. TOUMA

P. ZANTE

JUIN 1989

INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE

POUR LE DEVELOPPEMENT EN COOPERATION

— CENTRE DE DAKAR-HANN —



F 30.765

Institut Français de Recherche Scientifique
pour le Développement en Coopération
(ORSTOM)

CARACTERISATION HYDRODYNAMIQUE "IN SITU"
DES SOLS ALLUVIAUX DE LA VALLEE DE KATOURE
(BASSE CASAMANCE)

1. SOL SABLEUX

J.P. MONTOROI, J. TOUMA, P. ZANTE

UR 2B, Département Eaux Continentales
de l'ORSTOM
BP 1386, Dakar, Sénégal



Juin 1989

29 OCT. 1992

068
PROSOL
MON

F 30.765

Résumé:

Dans le but de quantifier les transferts hydriques au sein d'un sol sableux de terrasse alluviale, situé dans une vallée aménagée de basse Casamance, nous avons réalisé un essai de caractérisation hydrodynamique faisant appel à une méthodologie largement employée, la neutro-tensiométrie.

Les résultats obtenus montrent que le sol, homogène du point de vue textural, présente plusieurs niveaux au comportement hydrodynamique différencié. Plusieurs hypothèses explicatrices sont avancées. Les difficultés opératoires rencontrées dans ce type de milieu sont mentionnées afin de proposer un protocole adéquat.

Mots clés: caractérisation hydrodynamique, neutro-tensiométrie, infiltration, drainage interne, sol sulfaté acide, Casamance, Sénégal.

TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION	1
2. DISPOSITIF EXPERIMENTAL	2
3. CARACTERISATION PEDOLOGIQUE	7
4. ETALONNAGE NEUTRONIQUE	10
5. DETERMINATION DES PROPRIETES HYDRODYNAMIQUES	
5.1. Analyse de l'infiltration	14
5.2. Analyse du ressuyage	20
5.2.1. Détermination des courbes de rétention $h(\theta)$	20
5.2.2. Relation $K(\theta)$	28
6. CONCLUSION	34
BIBLIOGRAPHIE	35
ANNEXES	37

1. INTRODUCTION

Dans le contexte climatique défavorable qui sévit en Casamance depuis une quinzaine d'années, le Gouvernement sénégalais a entrepris de sauvegarder les terres rizicultivées dégradées par la sursalure et l'acidification.

Afin de mieux comprendre les processus qui régissent ces phénomènes, l'ISRA et l'ORSTOM mettent l'accent sur l'étude des transferts hydriques dans les sols d'une vallée aménagée de basse Casamance. Ces travaux s'inscrivent dans le cadre d'un programme conjoint financé par l'ATP-PIREN "Influence des couvertures pédologiques et végétales sur les bilans hydriques et minéraux des sols".

Le présent rapport rassemble l'ensemble des résultats obtenus lors d'un essai de caractérisation hydrodynamique réalisé sur un sol sableux de la vallée de Katouré.

Cet essai vise à obtenir:

* la relation entre la pression effective de l'eau dans le sol (h , cm d'eau) et la teneur en eau volumique (θ , cm³/cm³). La mesure simultanée de ces deux paramètres est requise.

* la relation entre la conductivité hydraulique (K , mm/j) et la teneur en eau volumique. On la déduit de l'équation générale des transferts en milieu non saturé (loi de DARCY généralisée):

$$q = - K(\theta) * \text{grad } H \quad \text{où } q \text{ représente un flux hydrique}$$

H une charge hydraulique.

Nous ne reviendrons pas sur l'aspect théorique qui sous-tend l'obtention de ces relations et qui fait l'objet de nombreuses publications, en particulier celle de G. VACHAUD et al. (1978).

Ces informations seront reprises ultérieurement dans un modèle de simulation numérique afin d'évaluer l'aptitude de ce type de sol au dessalement.

2. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

La vallée de Katouré est située à environ 10 km au sud de Ziguinchor et est parcourue par un marigot affluent du Kamobceul Bolong, lui-même affluent principal du fleuve Casamance (fig. 1). Le bas-fond a été aménagé en 1984 par un barrage anti-sel prolongé d'une digue en terre. Cet ouvrage empêche la remontée des eaux marines en amont du village de Katouré et constitue une véritable retenue des eaux météoriques en hivernage.

Une expérimentation, effectuée en aval de la digue sur un périmètre de 8 ha et ayant pour objectif l'étude de la variabilité spatiale de l'infiltrabilité des sols (BOIVIN et al., 1988), a permis de dégager un emplacement représentatif du point de vue textural pour une étude plus détaillée des paramètres hydrodynamiques (fig. 2).

Après avoir arasé les billons pour des raisons liées à la méthodologie utilisée, le site est équipé (fig. 3):

- * d'un dispositif d'infiltration double anneau (type Müntz), l'anneau interne et externe ayant respectivement pour diamètre 50,5 cm et 117 cm et pour surface d'infiltration 0.2 m² et 0.875 m². Le volume infiltré est contrôlé dans les deux anneaux par un dispositif de Mariotte.
- * d'un tube d'accès pour humidimètre neutronique (sonde SOLO 25 de NARDEUX humisol) jusqu'à une profondeur d'1,5 m. Les mesures neutroniques sont effectuées tous les 10 cm, la cote initiale étant 10 cm.
- * de 10 tensiomètres (modèle NARDEUX) couplés à un manomètre à mercure et installés aux profondeurs suivantes: 10, 20, 30 (2), 40, 50, 60 (2), 80 et 100 cm. Ils sont placés circulairement, pour huit d'entre eux à 20 cm, et pour les deux autres à 50 cm du centre des anneaux. Ces derniers, disposés par conséquent dans l'anneau externe, sont destinés à contrôler les transferts latéraux au cours de l'infiltration.
- * de 6 bougies de prélèvement de la solution du sol (modèle NARDEUX) implantées à 20, 30, 40, 60, 80 et 100 cm.

L'essai débute par une phase d'infiltration sous charge constante (lame d'eau douce de 3 cm). Durant toute l'infiltration nous avons procédé à des mesures neutro-tensiométriques régulières pour suivre l'avancée du front d'humectation.

Succède ensuite la phase de redistribution en drainage interne. La surface du sol est recouverte à l'aide d'un film de plastique sur lequel nous avons déversé des copeaux de polystyrène expansé maintenus par un second film plastique. Au bout d'une semaine, nous introduisons la composante évaporatoire en découvrant le dispositif afin de suivre la redistribution en conditions naturelles.

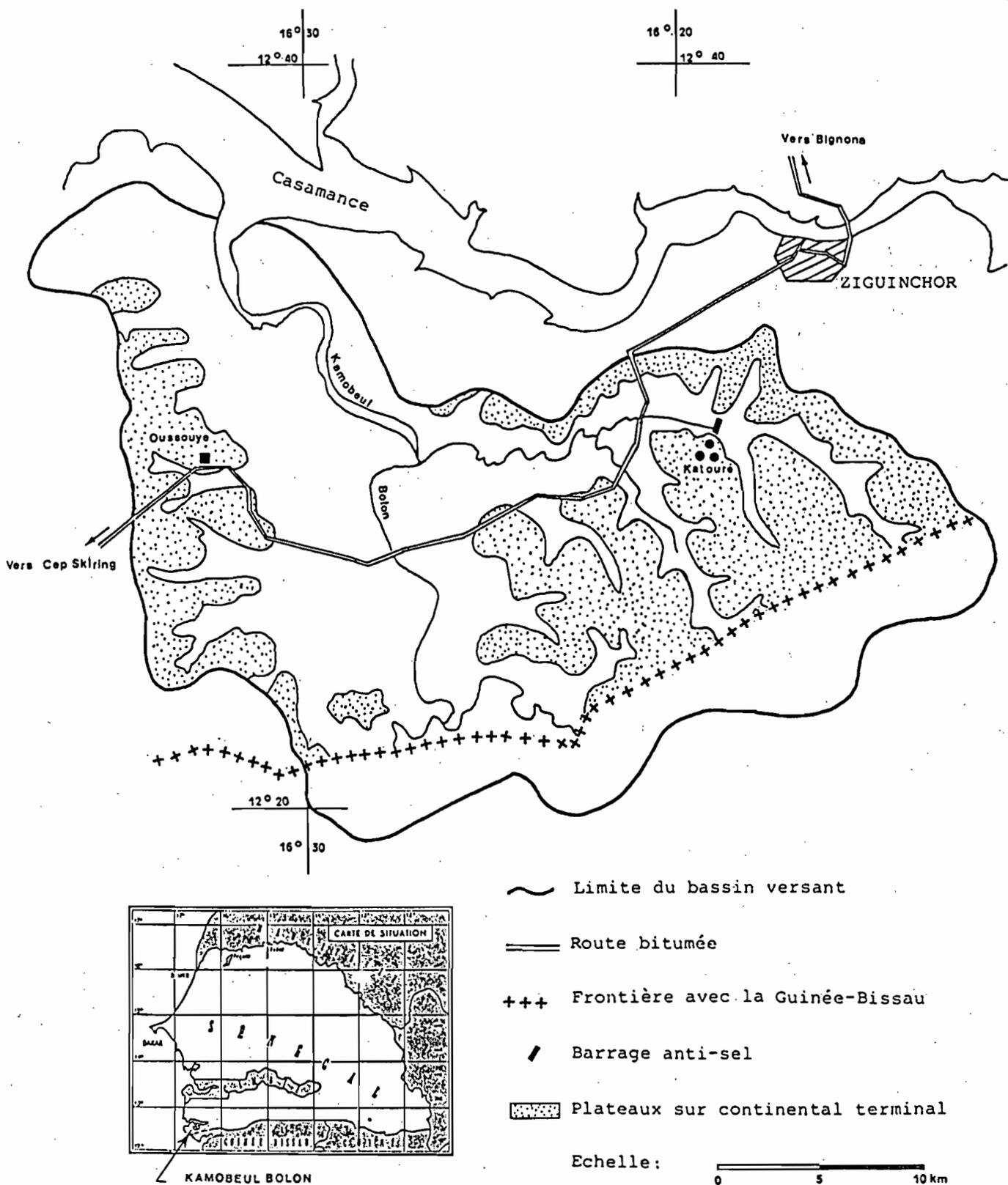


Fig. 1: CARTE DE SITUATION: BASSIN VERSANT DU KAMOBÉUL BOLON

Fig. 2: SITE D'ÉTUDE DU BAS-FOND DE KATOURE

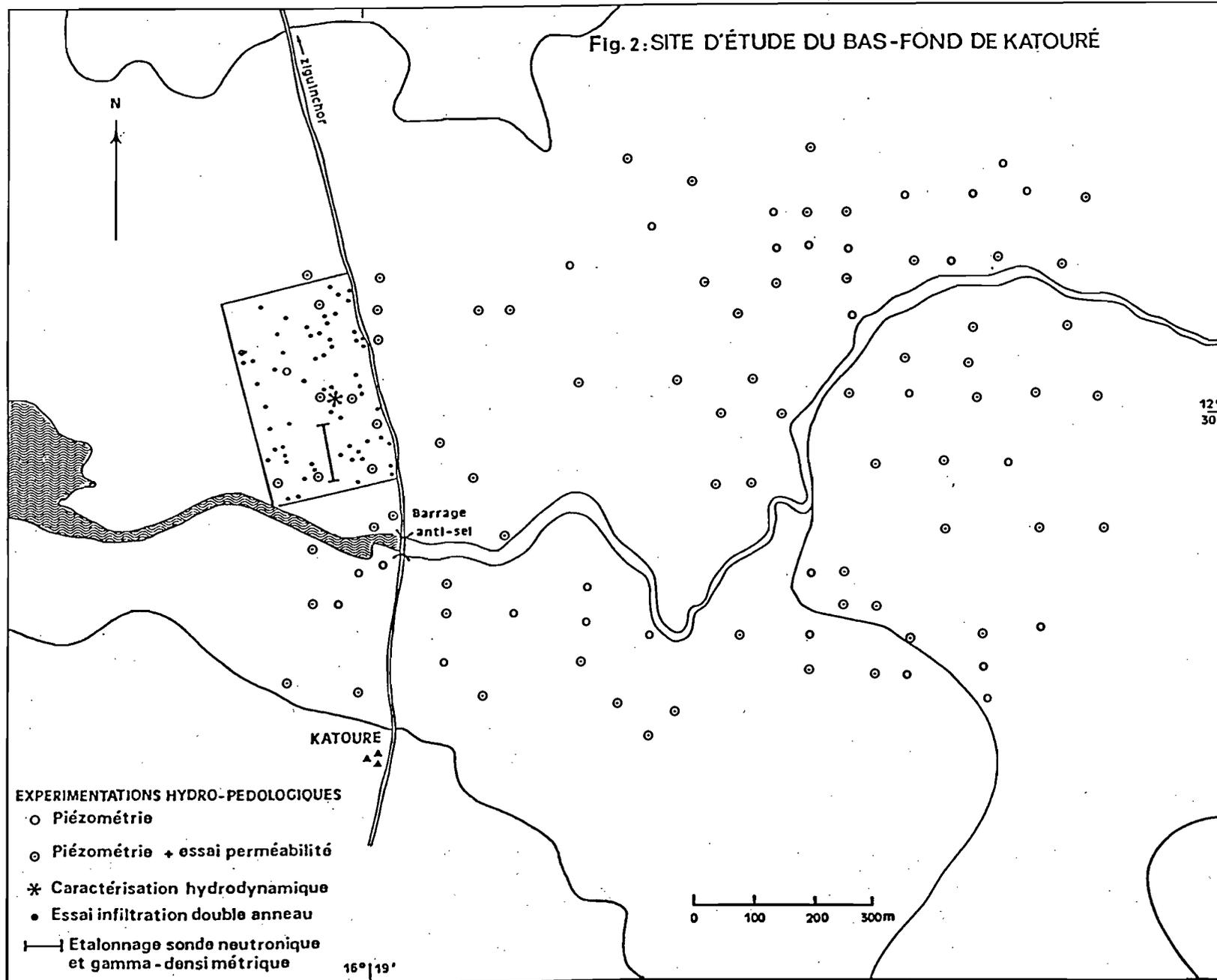
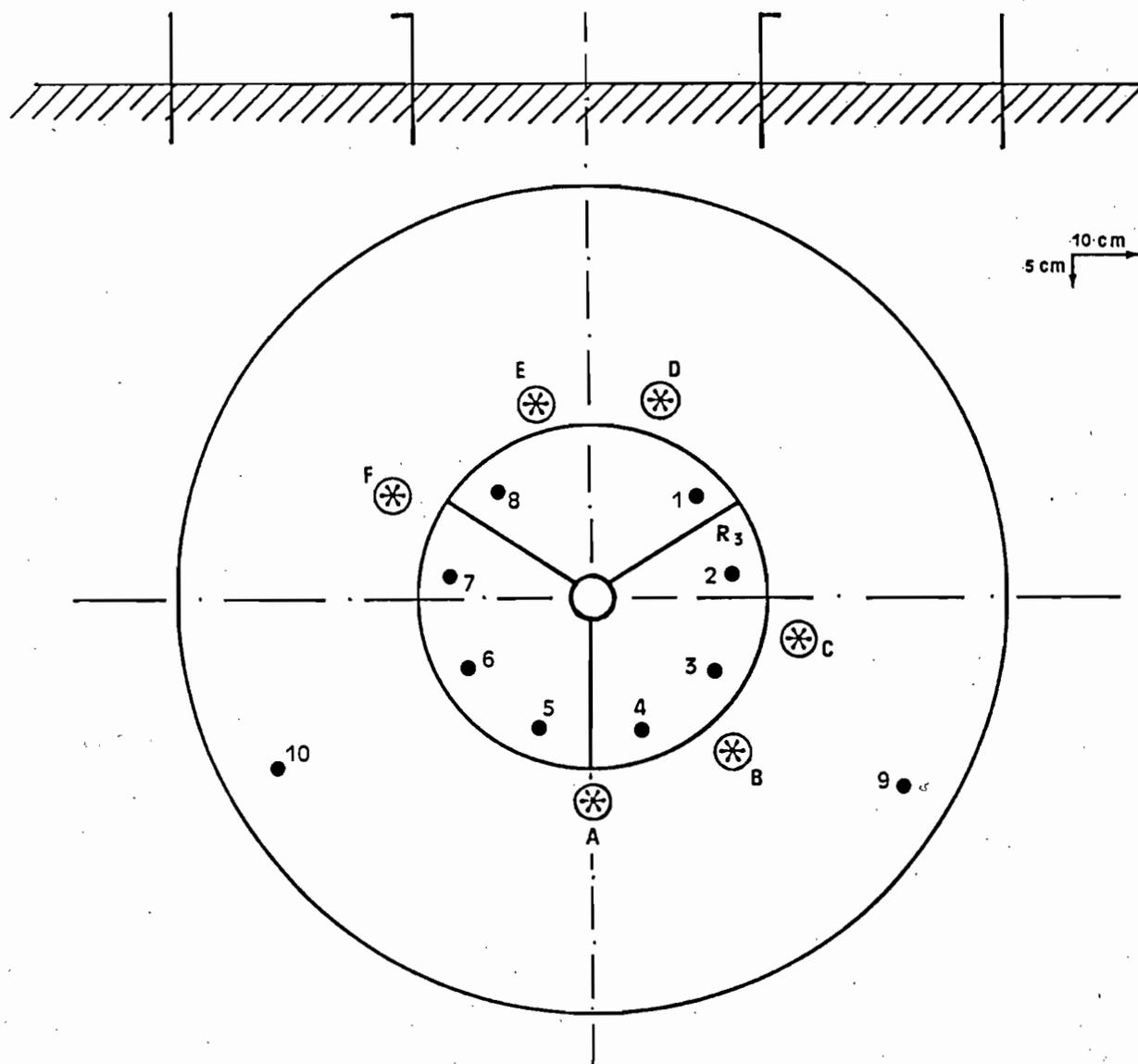


Fig. 3: SCHÉMA DE L'INSTALLATION



TENSIOMÈTRES

N ^o	Prof. totale (cm)	Prof. mesurée (cm)
1	13	10
2	23	20
3	33	30
4	43	40
5	53	50
6	63	60
7	83	80
8	103	100
} $\bar{R}_1 = 20$		
9	33	30
10	63	60
} $\bar{R}_2 = 50$		

BOUGIES DE PRÉLÈVEMENT

N ^o	Prof. totale (cm)	Prof. mesurée (cm)
A	104	100
B	84	80
C	64	60
D	44	40
E	34	30
F	24	20
} $\bar{R}_3 = 30$		



Site expérimental en drainage interne.

Calendrier des mesures:

Un premier essai a débuté le 24 mars 1987, peu de temps après l'expérimentation réalisée par BOIVIN et al (1988). Nous nous sommes inspirés du protocole utilisé pour apporter une lame d'eau équivalente, à savoir environ 25 cm. Cet apport s'est avéré excessif, car une grande partie a servi à alimenter la nappe phréatique. L'hypothèse d'un écoulement vertical durant la phase de ressuyage n'est probablement pas remplie, ce qui rend délicate l'interprétation des résultats.

Un second essai a été réalisé le 8 mars 1989 au même emplacement pour lever l'incertitude relative à l'influence d'une saturation prolongée du sol sur la détermination des paramètres hydrodynamiques. La lame d'eau infiltrée a été ramenée à environ 10 cm.

Nous avons employé, au cours des deux essais, un protocole de mesures identique, à savoir:

- détermination des profils neutroniques et tensiométriques initiaux,
- mesures tensiométriques et neutroniques en continu durant l'infiltration et la première heure suivant la disparition de la lame d'eau,
- mesures bi-horaires et horaires le premier jour,
- mesures bi-journalières ensuite jusqu'à la fin de l'expérimentation.

Les résultats présentés plus loin concerneront le second essai.

3. CARACTERISATION PEDOLOGIQUE

Le dispositif ayant été maintenu en place durant deux années, nous avons procédé, sur un profil situé à proximité du site, à une description pédologique, à des prélèvements d'échantillons et à des mesures de densité apparente. Des observations à la tarière autour de l'essai ne montrent pas de différenciations latérales notables. L'ouverture d'un second profil, lors de l'enlèvement de l'instrumentation, a permis de confirmer les premières observations.

Cette description ainsi que les analyses physico-chimiques sont données en annexes 1 et 2. Le sol est sableux sur l'ensemble du profil (fig. 4). Nous observons la présence de nombreux "iron-pipes" à l'emplacement d'anciens chenaux racinaires. Ceux-ci se situent dans le prolongement d'anciennes racines de palétuviers (Rhizophora) qui se sont conservées en milieu réduit. Les valeurs

Fig. 4: Granulométrie - Site KATOURE

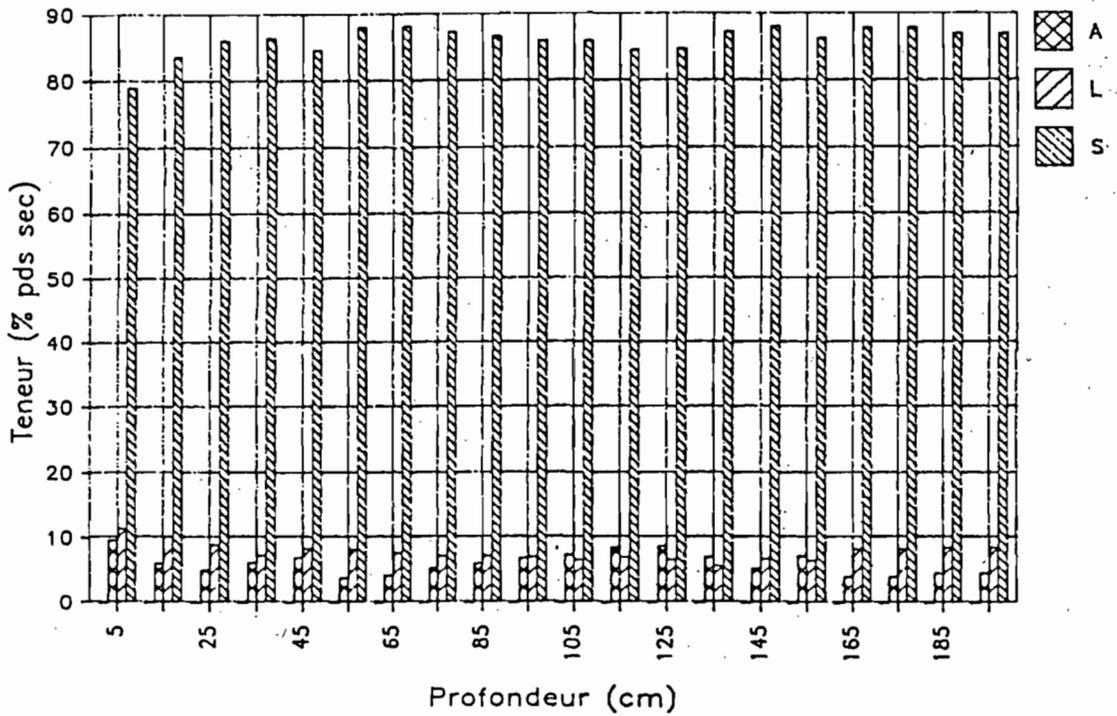
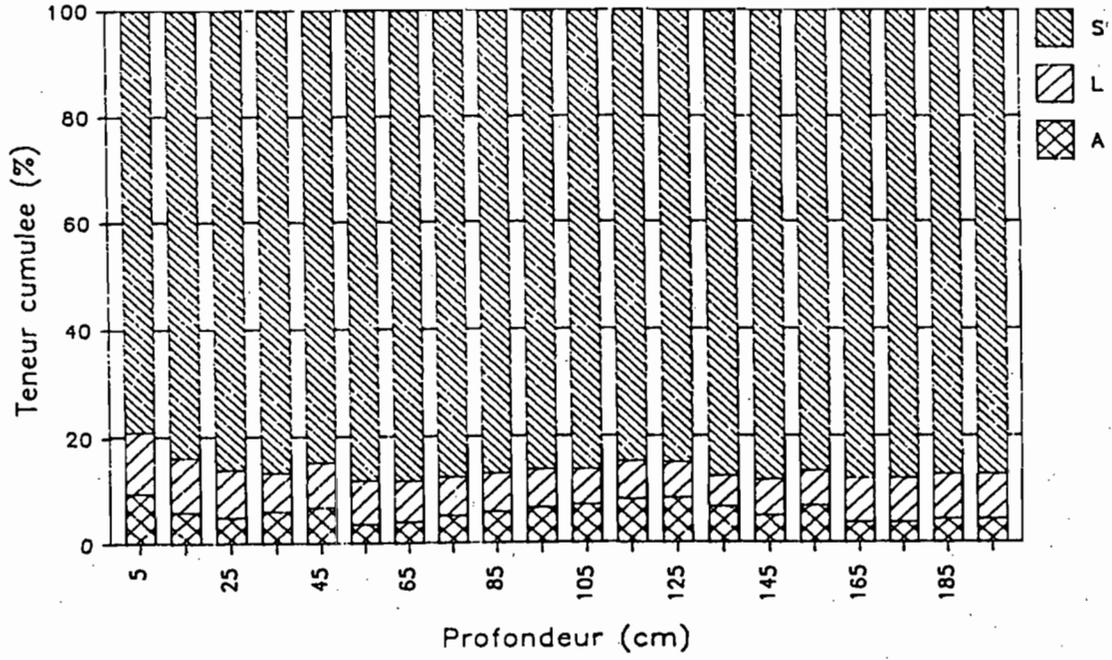
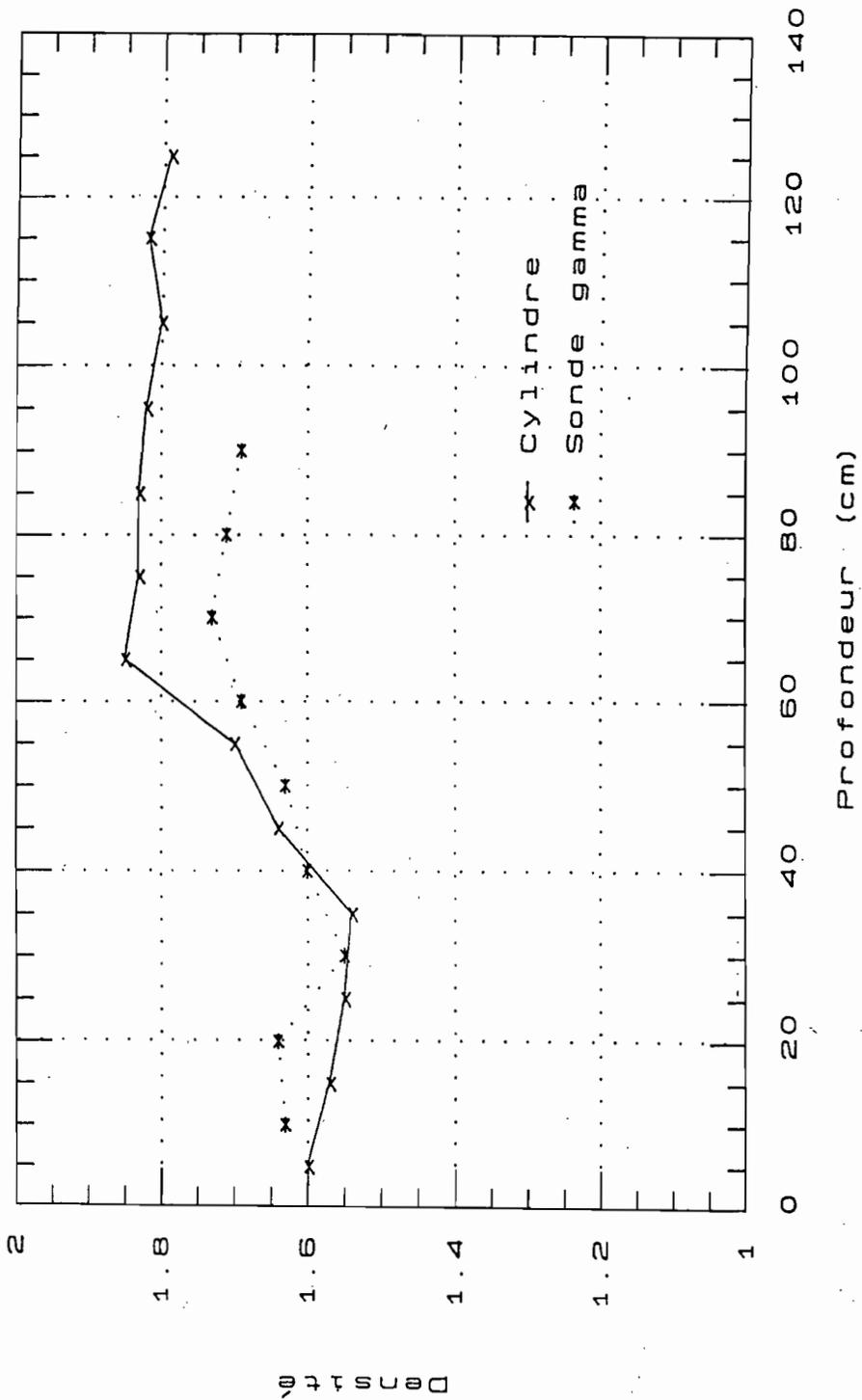


Fig. 5: Profils de densité apparente
Site KATOURE - Sol sableux



de la salinité sur extrait 1/5 sont faibles jusqu'à 1 m, environ 0.1 mS/cm tandis qu'elles augmentent dans l'horizon réduit pour atteindre 0.4 mS/cm. Le pH de l'extrait suit une évolution inverse: il passe de 7.5 à 4. La nappe phréatique, située à environ 1.40 m au moment de l'essai, présente un ph in situ de 6.5 et une conductivité électrique de 1.75 mS/cm.

Des mesures de densité apparente au cylindre ont été faites tous les 10 cm jusqu'à 120 cm (fig. 5). Au cours d'une expérimentation sur cette même vallée (MONTOROI, 1989), nous avons utilisé une sonde gamma-densimétrique (CAMPBELL PROBE NEUTRON 501A) à proximité de l'essai. Les résultats, obtenus par cette méthode non destructrice, confirment les mesures au cylindre jusqu'à 60 cm. La masse volumique est voisine de 1.6 g/cm³. En profondeur, cette dernière méthode surestime légèrement la masse volumique, d'environ 0.1 g/cm³, l'ordre de grandeur étant de 1.7 g/cm³ (fig. 5). La porosité totale passe donc de 38.5 % en surface à 34.6 % en profondeur.

4. ETALONNAGE NEUTRONIQUE

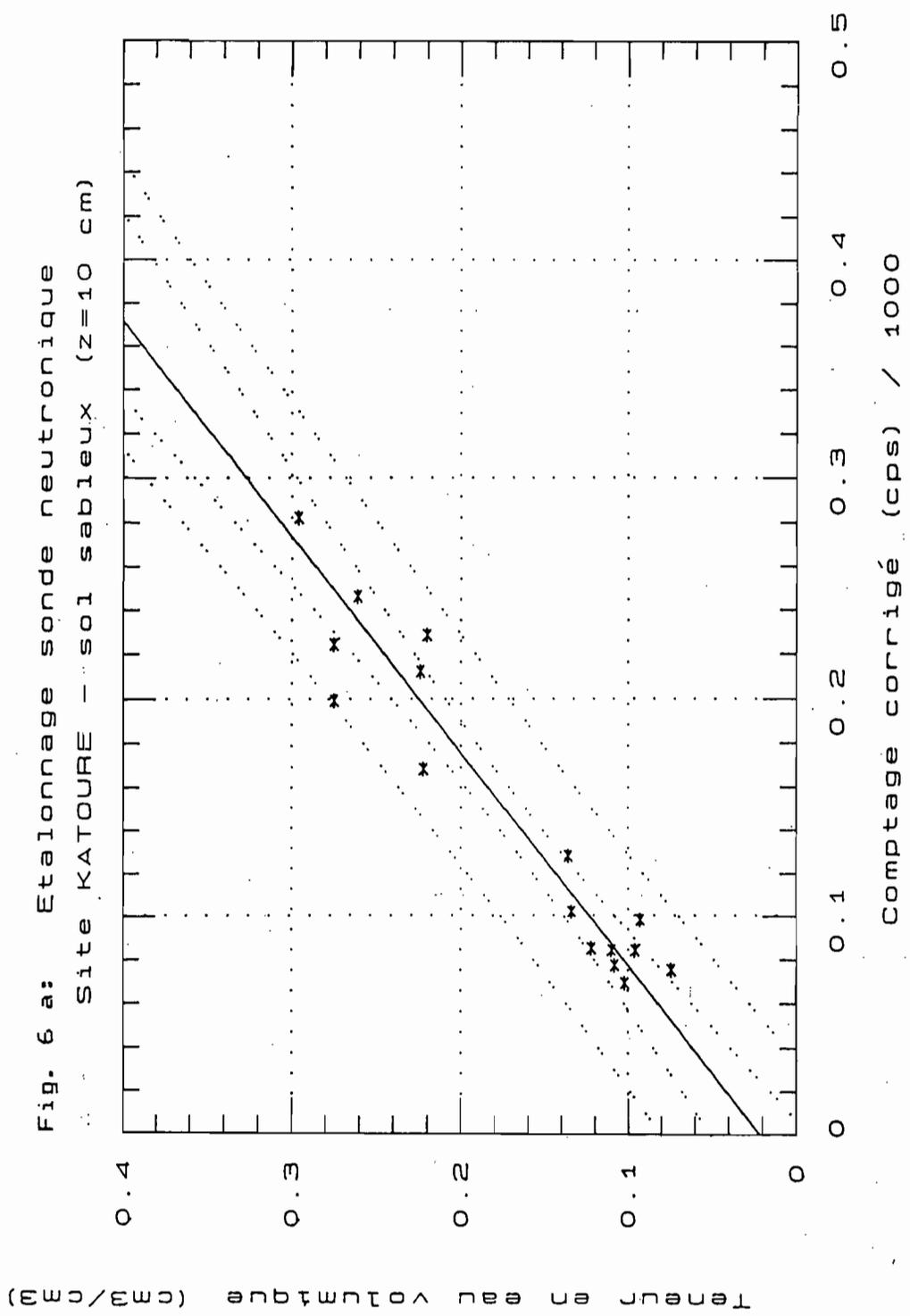
Nous avons procédé à un étalonnage gravitaire en effectuant, au même endroit, deux séries de prélèvements, l'une en conditions sèches, l'autre après saturation par infiltration dans un anneau de Müntz. Après chaque prise d'échantillons, nous introduisons un tube de sonde pour avoir les comptages correspondant. Les profils, ainsi prélevés (9 en sec, 7 en humide), sont situés tout autour du site expérimental sur un cercle ayant environ 3 m de rayon.

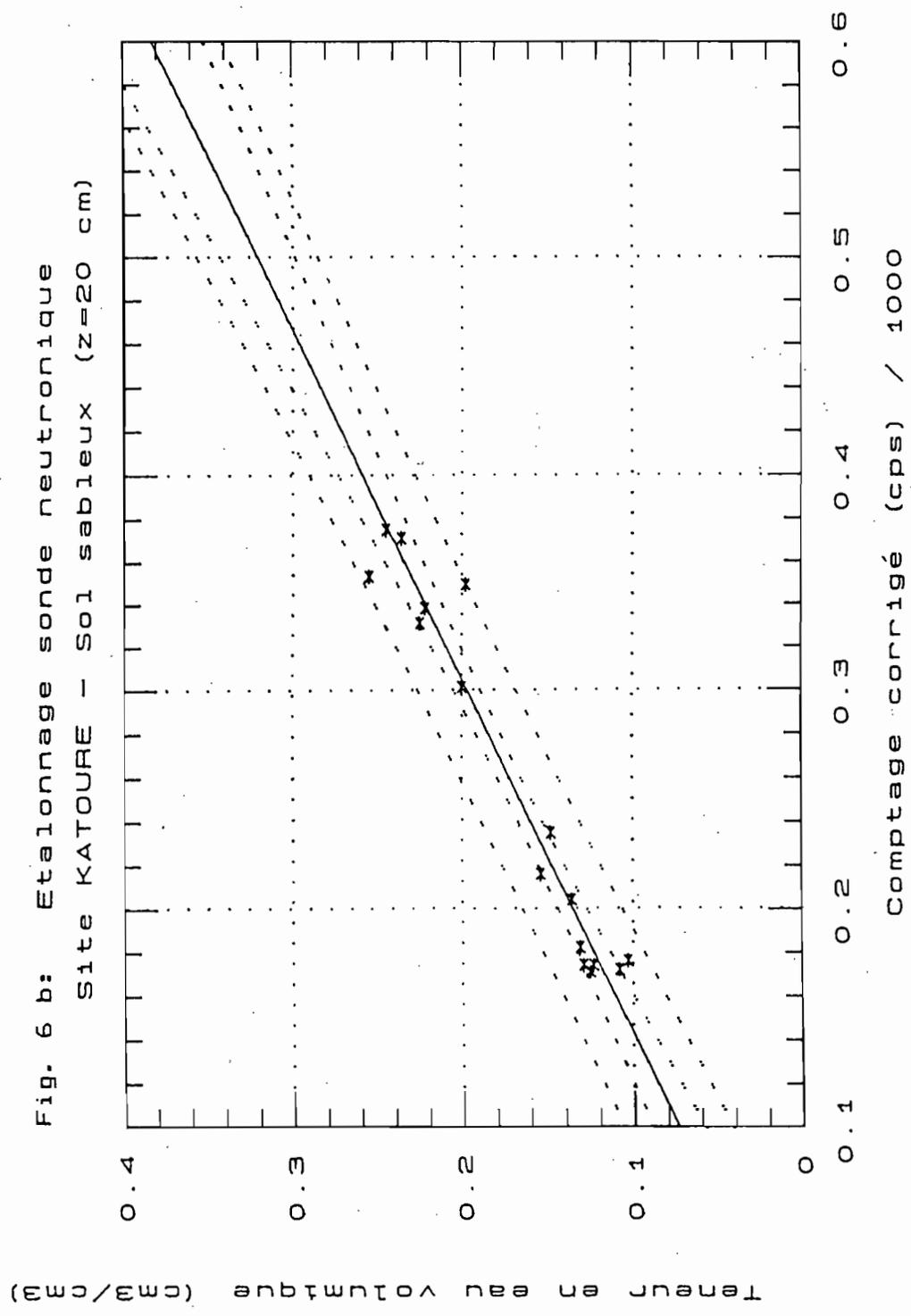
Les courbes d'étalonnage sont calculées en prenant les valeurs de densité obtenues à la sonde gamma-densimétrique. Elles sont présentées sur les figures 6 a, b, c et sont de la forme:

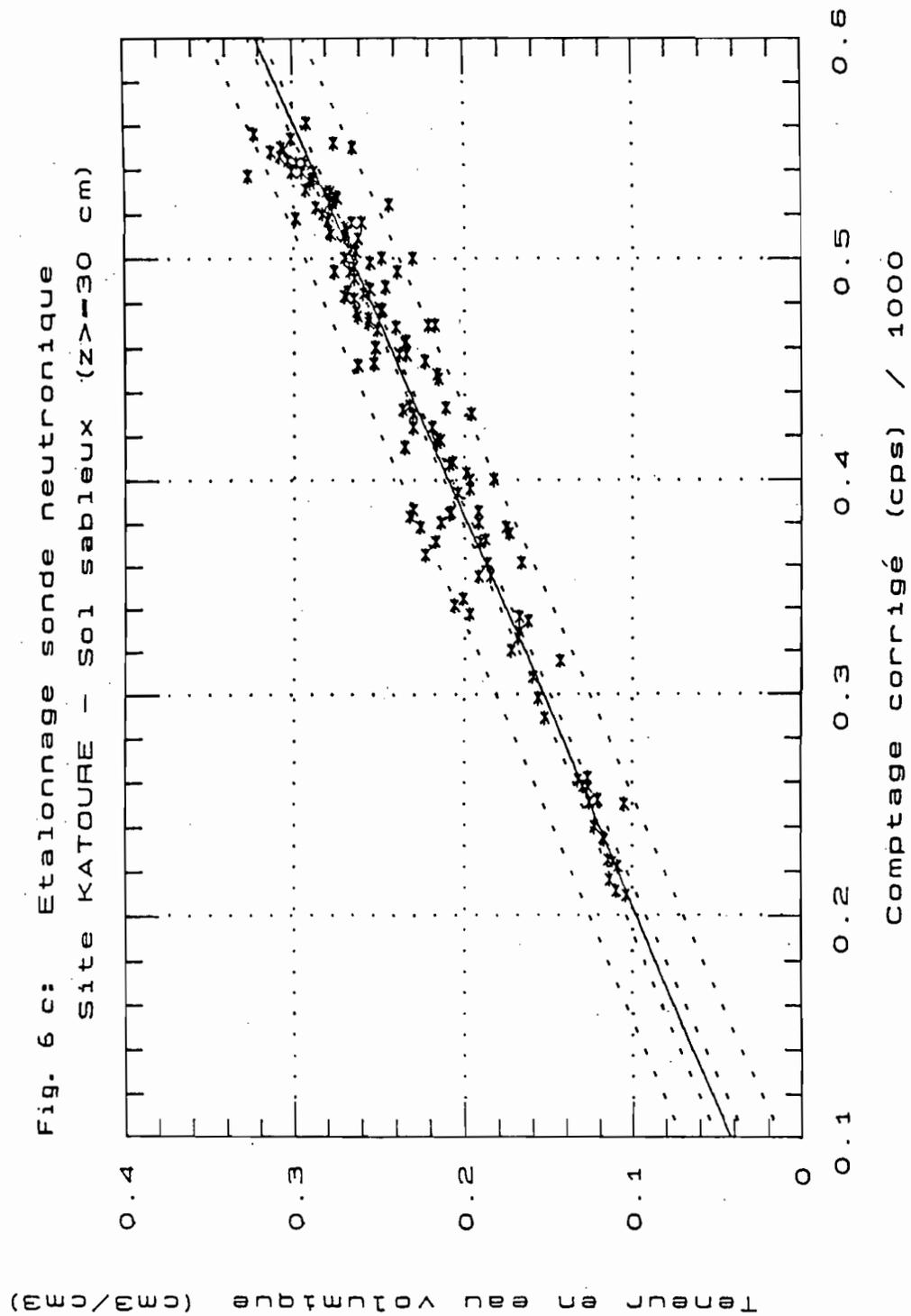
$$\theta = A * (N/N_{ref}) + B$$

où θ est l'humidité volumique
et N/N_{ref} le comptage rapporté
au comptage de référence.

A partir de 30 cm, nous pouvons considérer une droite unique, en regroupant l'ensemble des couples (θ , N/N_{ref}). Les coefficients de corrélation sont supérieurs à 0.90 et les nuages de points s'étalent sur une gamme d'humidité suffisamment large. Les paramètres d'ajustement linéaire A et B sont donnés dans le tableau 1.







z, cm	A	B	r	n couples
10	1.0198	0.0213	0.914	16
20	0.6189	0.0117	0.944	16
30 - 130	0.5600	-0.01415	0.938	158

Tableau 1: Coefficients des droites $\theta = A*(N/N_{ref}) + B$.

5. DETERMINATION DES PROPRIETES HYDRODYNAMIQUES

Le traitement des données a été effectué directement à partir des mesures brutes et à l'aide du logiciel CARHYD (LATY et VACHAUD, 1987).

5.1. ANALYSE DE L'INFILTRATION

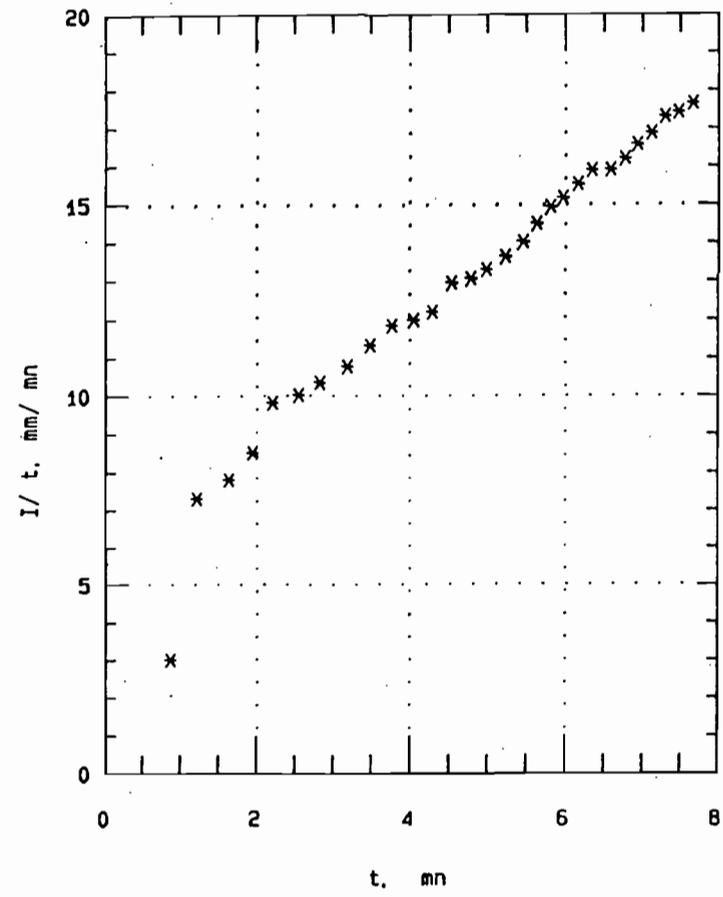
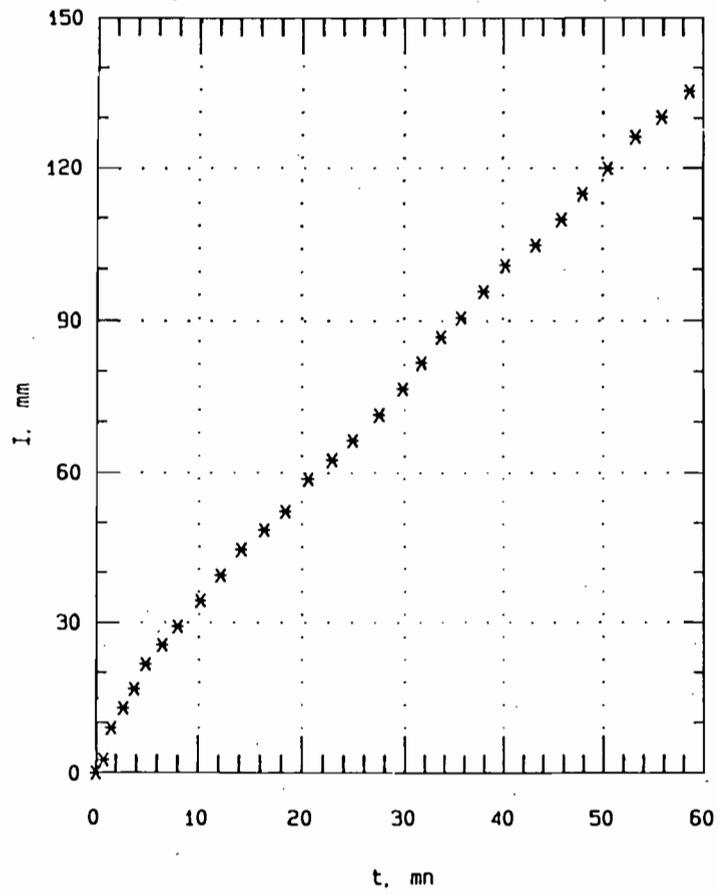
Durant le second essai, l'infiltration a duré 30 mn pour un apport de 110 mm. Cependant, cette période est trop courte pour atteindre le régime permanent et estimer la vitesse d'infiltration et la conductivité hydraulique. Par conséquent, nous nous référons aux données obtenues lors du premier essai en ne considérant que la première heure d'infiltration. Au delà, la prépondérance des transferts latéraux empêchent toute interprétation sérieuse.

L'évolution de la lame d'eau cumulée infiltrée $I(t)$ dans l'anneau intérieur est présentée sur la figure 7. Lorsque le régime permanent est établi (à partir de 10 mn), la vitesse d'infiltration est évaluée par la valeur de la pente de la droite de régression, qui est de 2.08 mm/mn, soit également 124.8 mm/h ($r^2 = 0.99$, $n=21$ couples).

Le profil initial non uniforme, dû à la présence d'une nappe phréatique (voir plus loin la figure 10), ne nous permet en principe pas d'appliquer la relation de PHILIP (1957) pour estimer la valeur de la conductivité hydraulique à saturation:

$$I = S\sqrt{t} + At \quad \text{où } S \text{ représente la sorptivité du matériau et } A \text{ est dimensionné à une vitesse.}$$

Fig. 7: Courbe d'infiltration cumulee
 site KATOURE - Sol sableux



Cependant, TOUMA ET BOIVIN (1988) montrent par simulation numérique que nous pouvons nous affranchir de cette hypothèse. La détermination des paramètres S et A se fait classiquement par une corrélation linéaire entre I/\sqrt{t} et \sqrt{t} , lorsqu'on écrit la relation précédente sous la forme $I/\sqrt{t} = S + A\sqrt{t}$ (fig. 7).

Nous obtenons, pour 10 mn < t < 60 mn, les valeurs suivantes:

$$S = 5.63 \text{ mm}/\sqrt{\text{mn}} ; A = 1.58 \text{ mm}/\text{mn} \text{ avec } r^2 = 0.99 \\ n=21 \text{ couples.}$$

La conductivité hydraulique à saturation K_s peut être estimée à partir de la relation de YOUNGS (1968):

$$2/3 K_s < A < 1/3 K_s$$

La valeur du K_s se situe donc entre 140 et 285 mm/h

Durant toute la période d'infiltration, nous avons suivi l'évolution de la teneur en eau et de la charge hydraulique (fig. 8 et 9). La réponse franche du tensiomètre permet de bien localiser le front d'humectation et de bien suivre son avancée au sein du profil. La charge initiale à 10 cm est sous-estimée, car le tensiomètre ne se trouve pas en équilibre.

L'évolution des profils hydriques durant la réhumectation demeure indicative par rapport à celle des profils de charge hydraulique (fig. 10). En effet, la précision des mesures neutroniques est moins bonne en présence d'un fort gradient d'humidité situé dans la zone d'influence de la sonde.

L'évolution du stock hydrique montre clairement que le sol a en grande partie rechargé sa réserve hydrique à l'issue de l'infiltration. La variation du stock est de 100.4 et 103.5 mm respectivement aux cotes 60 et 130 cm (cf annexe 3). Cette recharge se fait donc uniquement dans les 60 premiers centimètres, la teneur en eau restant inchangée à une cote inférieure.

Durant le premier essai, nous avons procédé à des prélèvements réguliers de la solution du sol au cours de l'infiltration et en début de ressuyage. Les valeurs relativement faibles de la conductivité électrique n'ont pas permis de suivre un réel dessalement du sol, surtout que la connaissance du profil salin initial est difficile à acquérir avec cette méthode, en raison de l'état de dessèchement du sol. Pendant l'infiltration, le profil salin est resté relativement uniforme avec des valeurs comprises entre 1 et 2 mS/cm. Le ph a très peu varié entre 6.5 et 7.5. L'eau d'apport a un ph de 7 et une CE de 0.03 mS/cm.

Fig. 8: Evolution de la teneur en eau - Phase d'infiltration

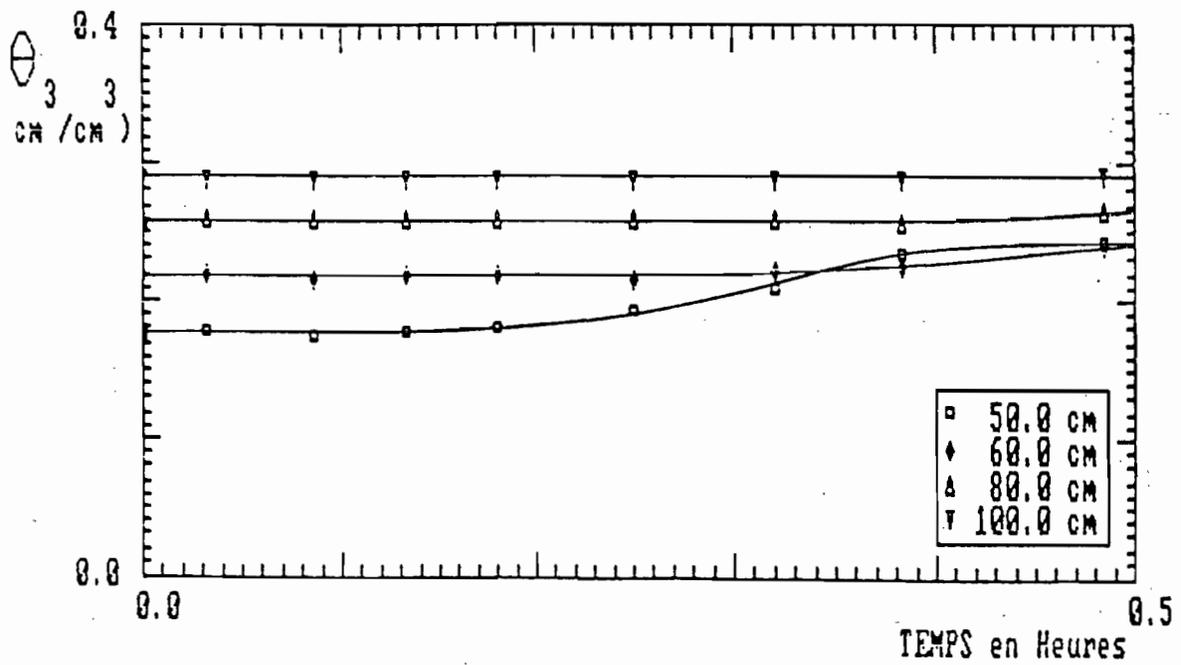
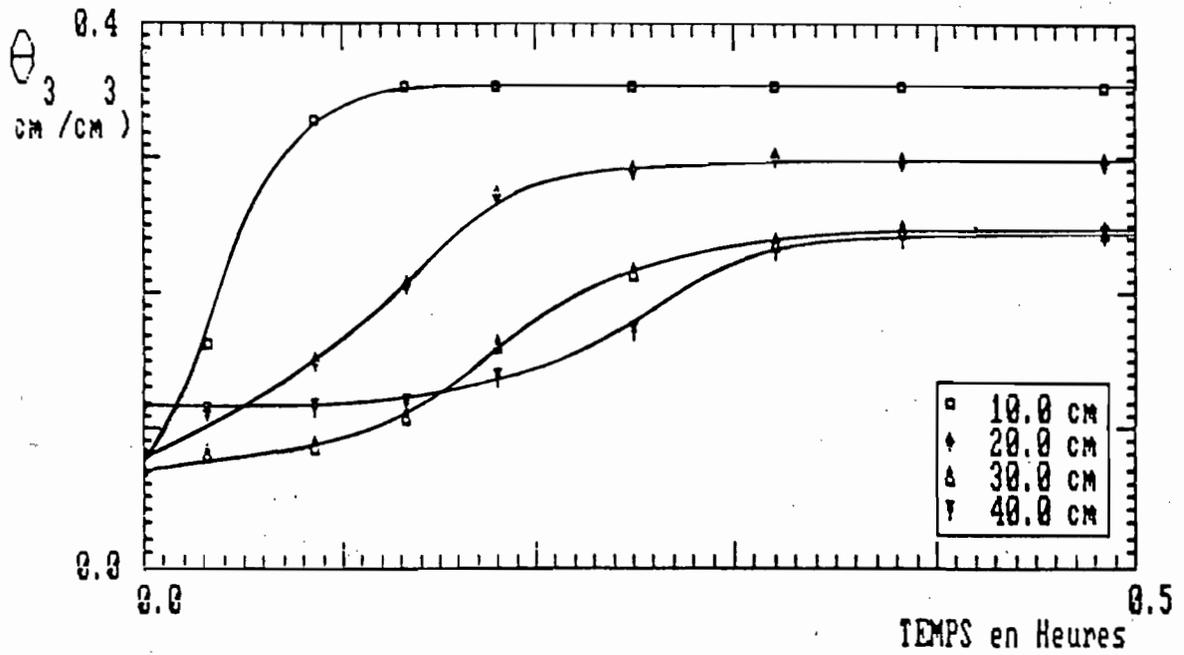


Fig. 9: Evolution de la charge hydraulique
Phase d'infiltration

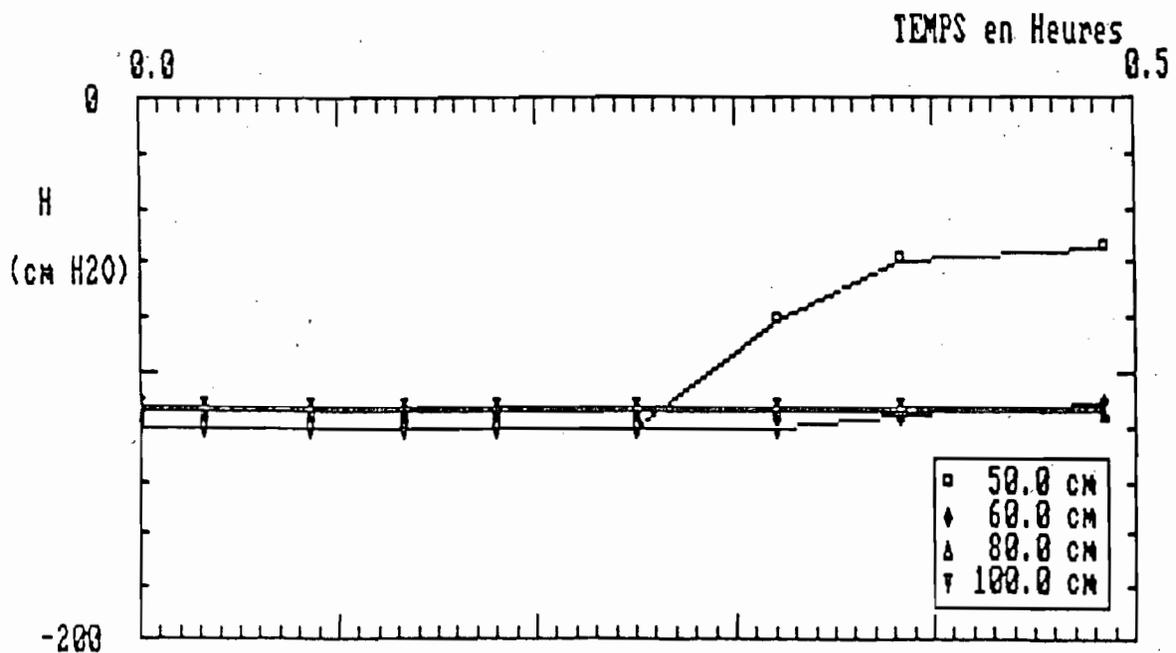
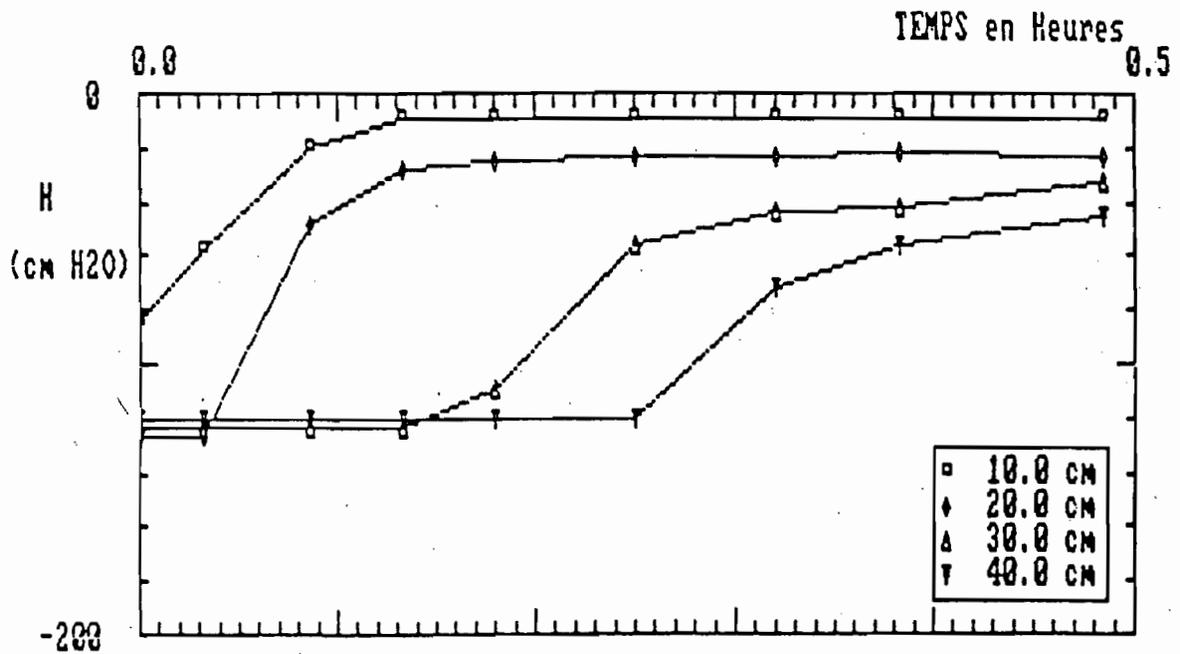
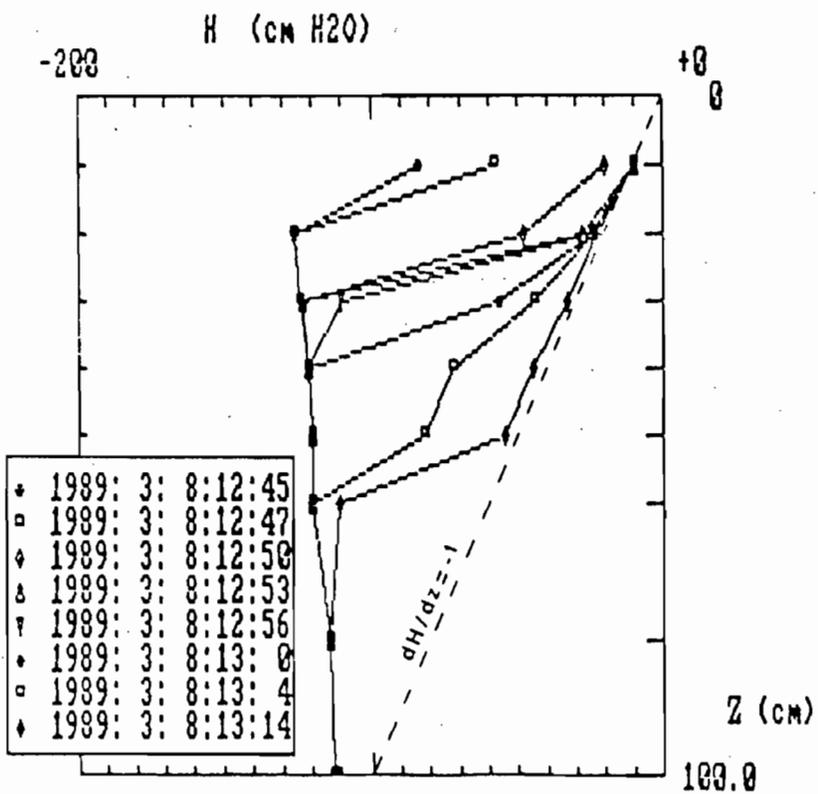
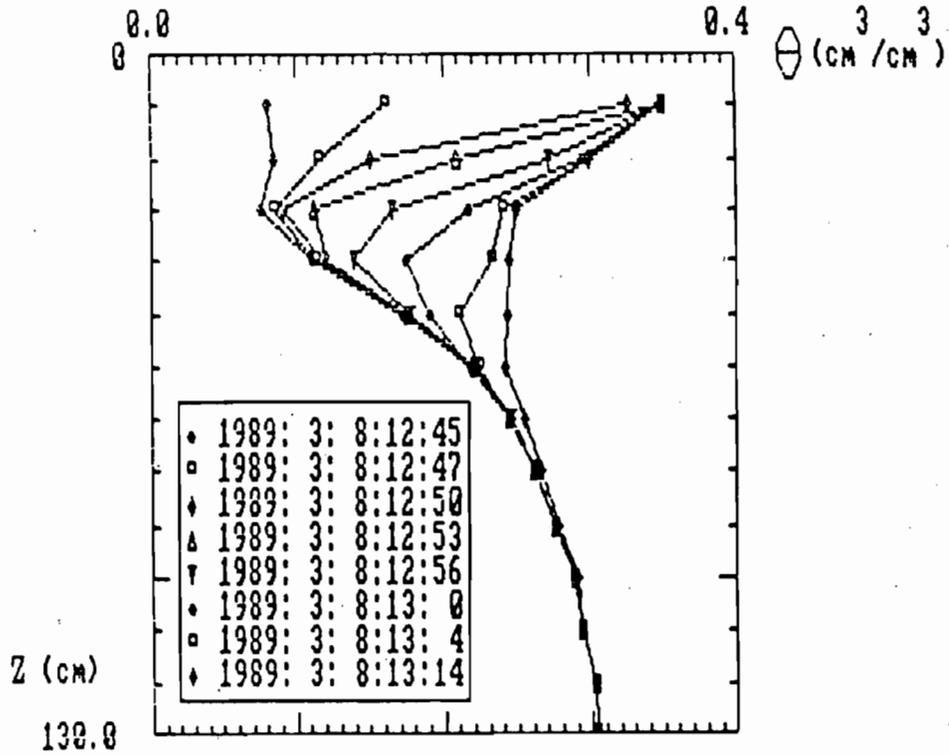


Fig. 10: Profils hydriques et profils de charge hydraulique
Phase d'infiltration



5.2. ANALYSE DU RESSUYAGE

5.2.1. Détermination des courbes de rétention $h(\theta)$

Durant toute la période de ressuyage (drainage interne et conditions naturelles), l'évolution de la teneur en eau, de la charge hydraulique et du stock hydrique ainsi que les profils hydriques et de charge sont présentés respectivement sur les figures 11, 12, 13, 14 ainsi qu'en annexes 4 et 5.

La variation du stock hydrique au cours de la phase de redistribution est de 104.3 et 116.3 mm respectivement à 60 et 130 cm de profondeur (annexe 6).

La capacité de rétention de ce sol peut être estimée entre 10 et 15 cm³/cm³ dans les horizons supérieurs (fig. 11), ce qui correspond à des humidités pondérales comprises entre 6 et 9 %.

La densité de mesures dans le temps est suffisante pour prendre en compte 32 profils de teneur en eau et de charge hydraulique déterminés aux mêmes instants (24 en drainage interne, 8 en conditions naturelles). Les valeurs de la pression de l'eau au niveau de chaque tensiomètre (exprimée en cm) se déduisent de la charge hydraulique mesurée en retranchant la cote de mesure (par rapport à la surface du sol).

Un ajustement numérique des points expérimentaux est effectué à l'aide du logiciel OPTIM (TOUMA et CHEVILLOTTE, 1988), en utilisant l'équation de la forme:

$$\theta = \frac{\theta_s - \theta_r}{1 + (\alpha h)^\beta} + \theta_r \quad \text{où } \theta_s \text{ est la teneur en eau à saturation}$$

α, β et θ_r sont des paramètres d'ajustement (GARDNER, 1958).

Pour les cotes inférieures, seuls les couples correspondant à une variation significative de h et θ ont été retenus. Les paramètres d'ajustement obtenus sont rassemblés dans le tableau 2. Les couples expérimentaux (h, θ) sont reportés sur les figures 15 a (drainage interne) et 15 b (drainage interne et conditions naturelles).

Nous mettons en évidence plusieurs courbes caractéristiques pour les niveaux 10, 20, 30-40, 50-60 cm. Au dessous de 60 cm, le matériau marque seulement un début de désaturation que l'on ne peut pas matérialiser numériquement. L'ajustement à 60 cm n'est d'ailleurs possible qu'en prenant l'équation de VAN GENUCHTEN (1980), qui est de la forme:

Fig. 11: Evolution de la teneur en eau
Phase de redistribution

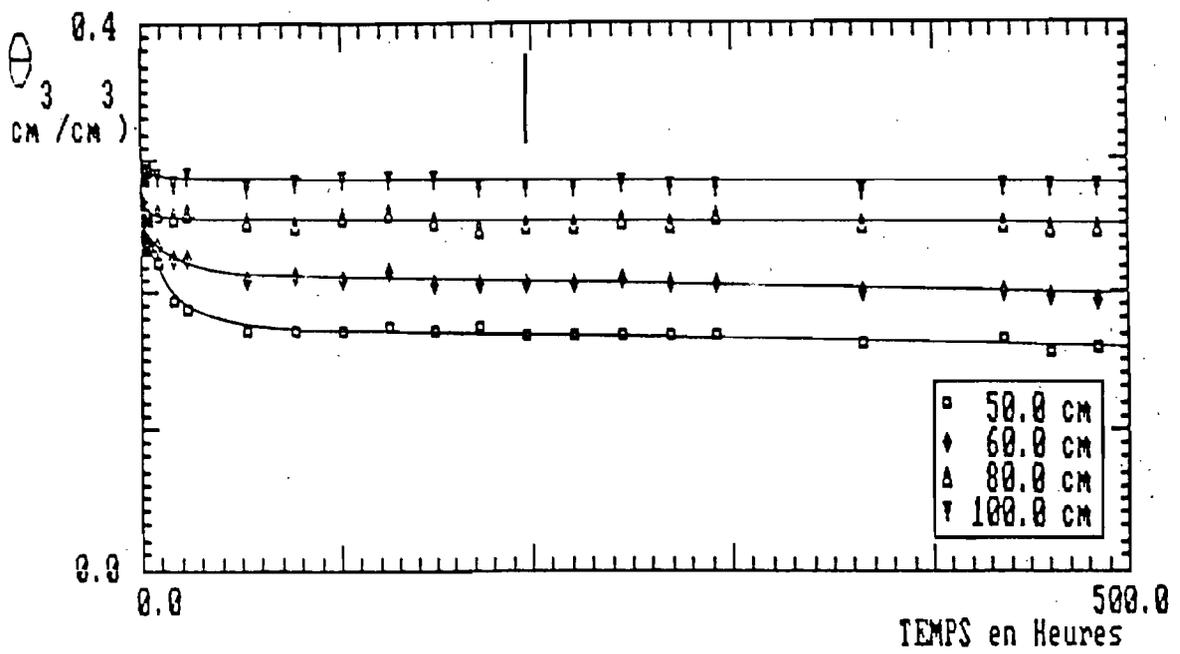
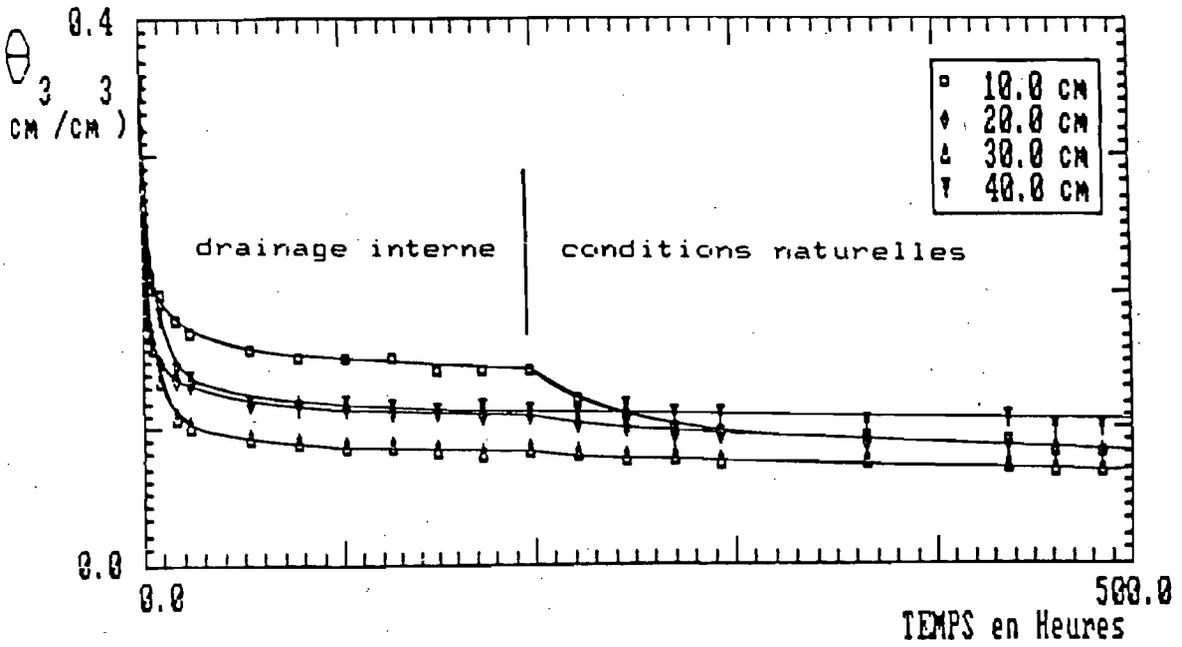


Fig. 12: Evolution de la charge hydraulique
Phase de redistribution

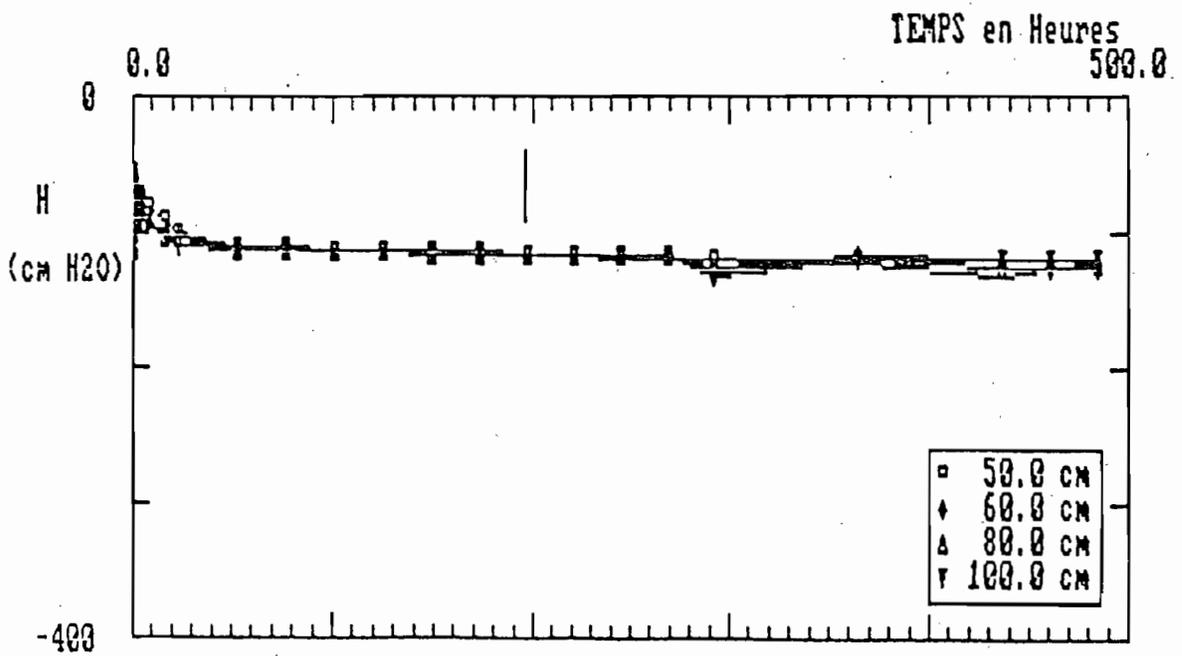
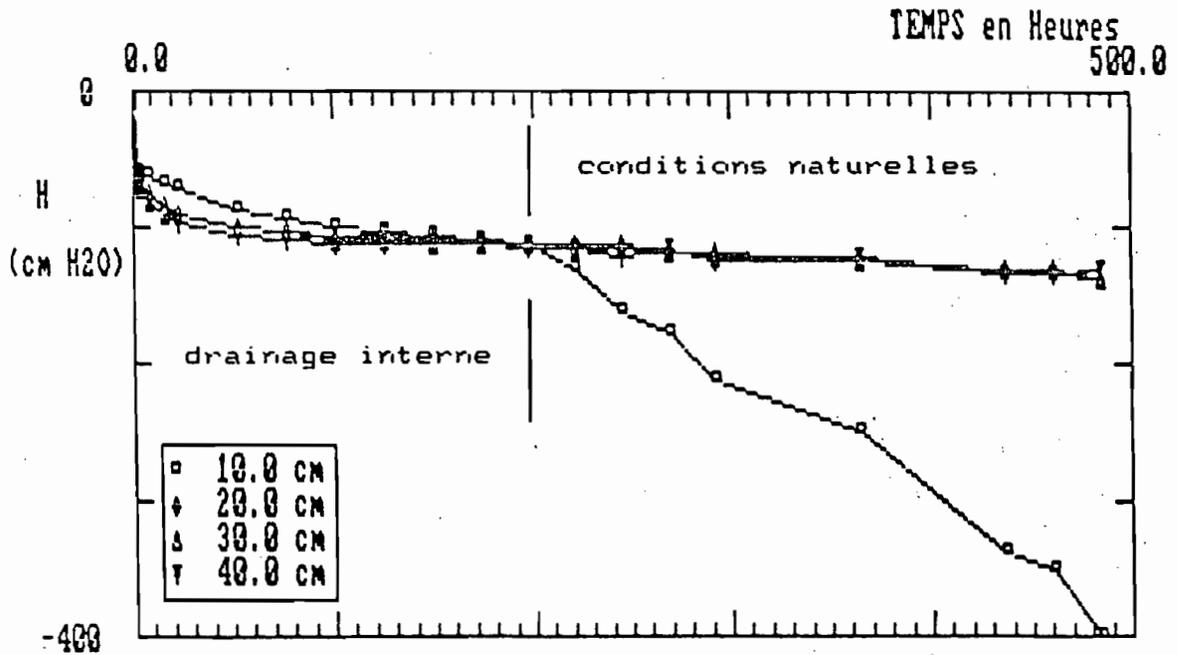
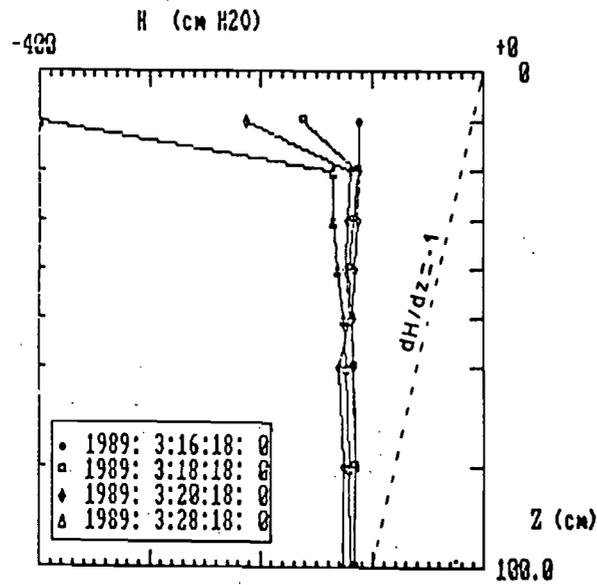
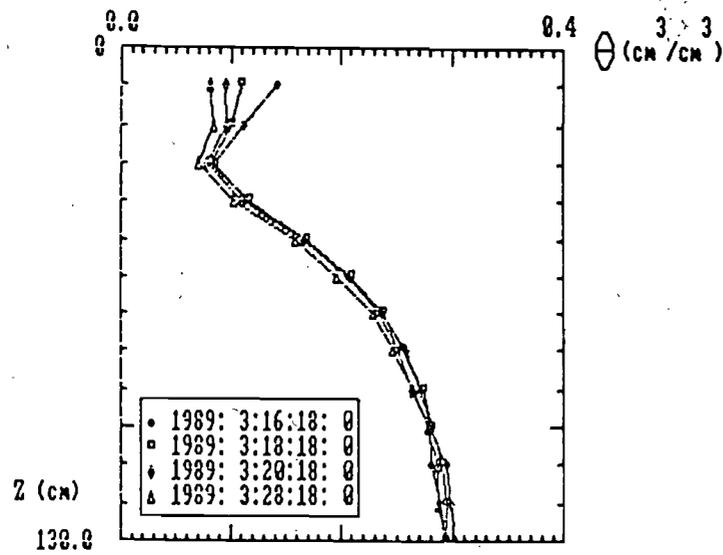
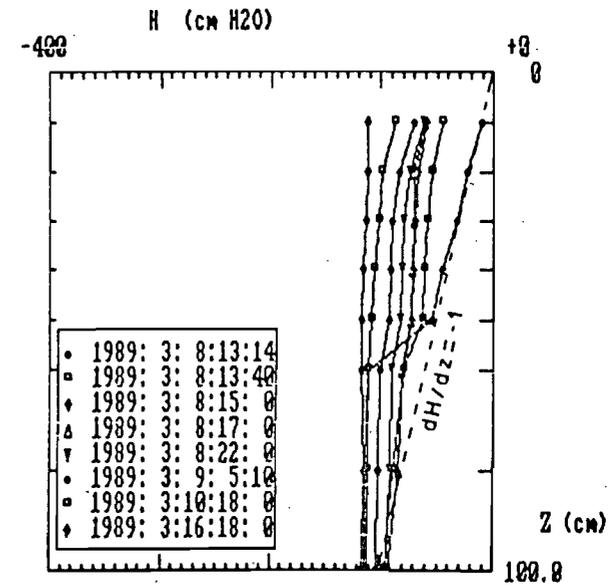
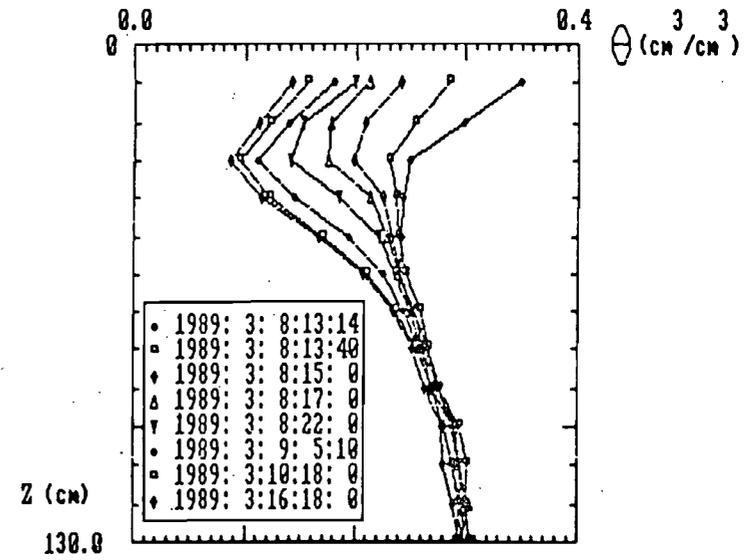


Fig. 13: Profils hydriques et profils de charge hydraulique
Phase de redistribution

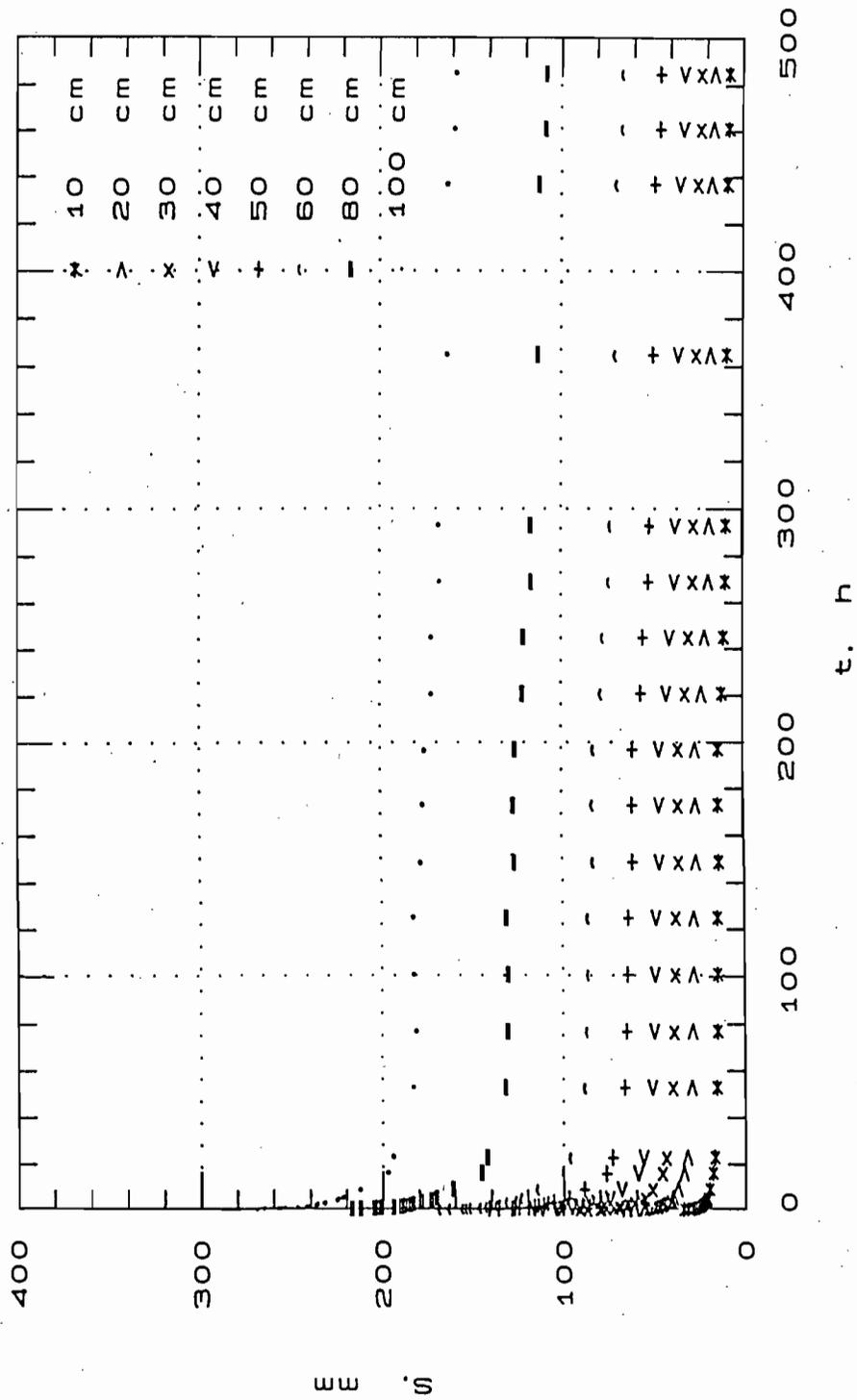


b. Conditions naturelles



a. Drainage interne

Fig. 14: Evolution du stock hydrique
Site KATOURE - Sol sableux



$$\theta = \frac{\theta_s - \theta_r}{\beta (1 - 1/\beta)} + \theta_r$$

(1 + (ah))

Ces 4 niveaux semblent correspondre à des horizons décrits morphologiquement: horizon humifère plus ou moins structuré; horizon induré avec "iron-pipes"; horizon à sable blanc à taches d'oxydation diffuse. Si on peut difficilement attribuer les différences de comportement hydrique à des variations texturales franches, il y aurait lieu de considérer l'organisation structurale du matériau pour apporter des éléments de réponse plus tangibles.

Tableau 2: Coefficients d'ajustement de la relation $h(\theta)$ à différentes cotes.

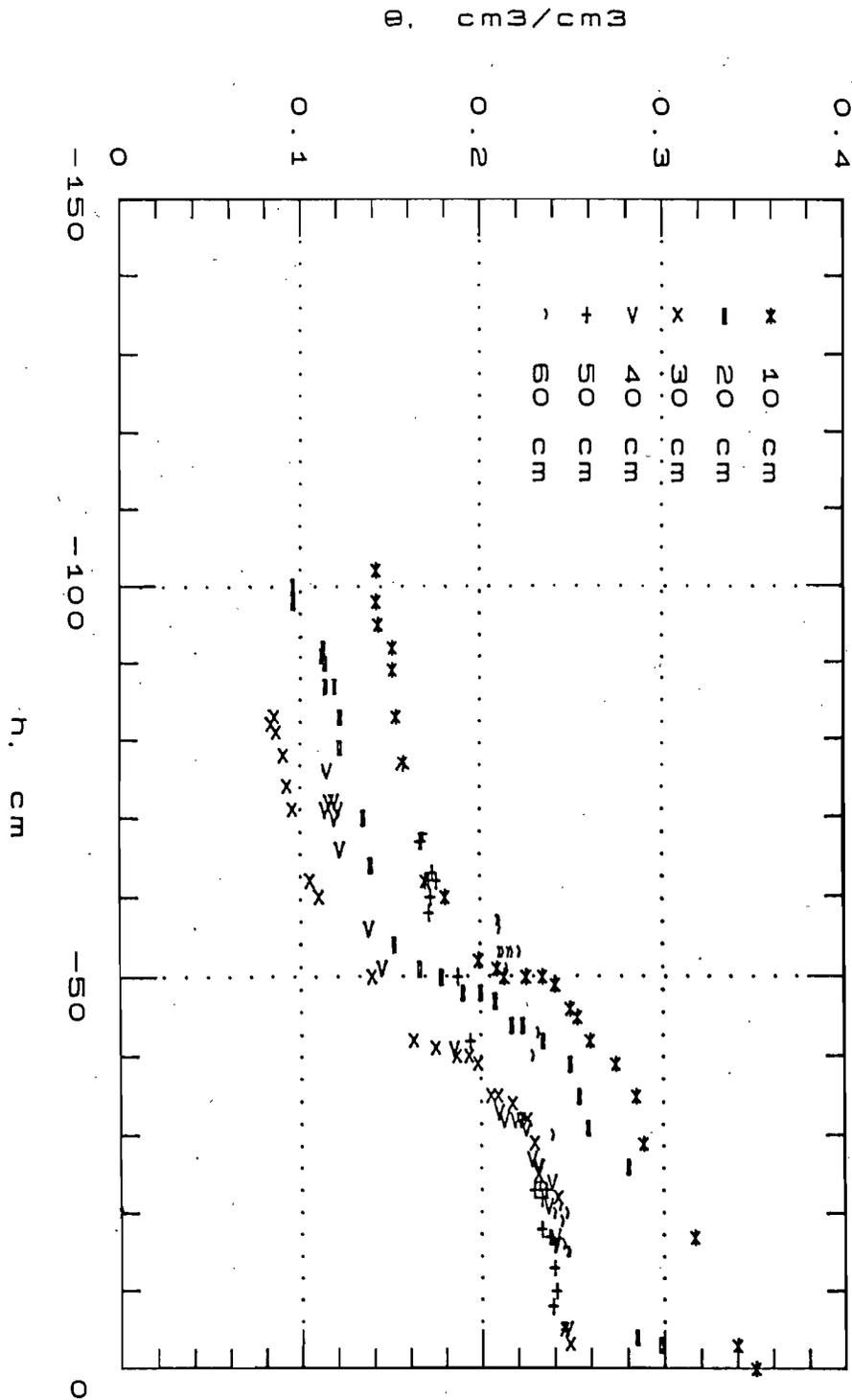
z (cm)	θ_s (cm ³ /cm ³)	α (cm ⁻¹)	β	θ_r (cm ³ /cm ³)	Σ (n couples)
10	0.350	-0.0187	2.094	0.079	0.44 E-2 (32)
20	0.300	-0.0205	3.757	0.086	0.26 E-2 (32)
30	0.250	-0.0220	4.521	0.073	0.66 E-3 (32)
40	0.250	-0.0230	4.011	0.099	0.39 E-3 (31)
50	0.250	-0.0212	2.227	0.131	0.47 E-3 (31)
60	0.245	-0.0136	2.454	0.078	0.22 E-3 (26)

Remarque:

Lors de l'enlèvement de tout l'appareillage, nous avons contrôlé la profondeur des tensiomètres et leur position relative au sein du profil. Le tensiomètre situé à 50 cm se trouvait en fait pratiquement au même niveau que celui à 40cm (erreur d'installation...?). La figure 9 confirme ce fait, puisqu'ils réagissent quasiment au même instant, lors de la réhumectation. Quoiqu'il en soit, leurs courbes de succion respectives sont notablement différentes, sans doute à cause de leur position particulière dans le matériau. Le premier se situe dans la zone indurée à "iron-pipes", le second dans le sable beige clair.

Fig. 15: Relations $h(\theta)$ - Site KATOURE
Phase de redistribution

a. Drainage interne



5.2.2. Relation $K(\theta)$

La conductivité hydraulique K , relative à l'humidité volumique θ mesurée à la profondeur z et à l'instant t , est donnée par la relation suivante, qui est l'application de la loi de DARCY aux milieux non saturés:

$$K = - q / dH/dz$$

L'hypothèse d'un écoulement monodimensionnel vertical est requise. La détermination du flux hydrique q et du gradient de charge hydraulique dH/dz au même instant est nécessaire pour tracer point par point la courbe $K(\theta)$ à une cote donnée.

Le calcul de la relation $K(\theta)$ est exposé en détail dans l'article de VACHAUD et al, 1978. Nous rappellerons qu'il est fondé sur la loi de conservation de la masse $d\theta/dt + dq/dz = 0$. En intégrant cette relation entre deux cotes z_0 et z , nous obtenons:

$$\int_{z_0}^z d\theta/dt dz = - \frac{d}{dt} \int_{z_0}^z \theta dz$$

ou en termes de densité de flux et de stock hydrique:

$$q_z - q_{z_0} = - [dS/dt]_{z_0}^z$$

La méthode du drainage interne (HILLEL et al, 1972), qui consiste à bloquer l'évaporation en recouvrant le sol, implique que le flux hydrique à la surface du sol q_{z_0} est nul. D'où, le flux hydrique traversant la cote z entre deux instants t et $t+dt$ est égal à la variation de stock d'eau entre la surface du sol et cette cote.

La méthode du plan de flux nul (ARYA et al, 1975) reprend ce principe en conditions naturelles. Un écoulement ascendant (évaporation) et un écoulement descendant (drainage) interviennent lors du ressuyage. La séparation entre ces deux zones, où le gradient de charge s'annule, définit le plan de flux nul et donc la cote z_0 .

Le ressuyage en conditions naturelles étant peu important (fig. 13.b), nous emploierons uniquement la première méthode lors de l'exploitation des données. Pour connaître à chaque instant t et à une cote z le flux hydrique q , nous calculons les paramètres d'ajustement linéaire de la relation:

$$S(z,t) = a + b \ln t \quad (\text{VACHAUD et al, 1981})$$

qui, en dérivant, donne:

$$q(z,t) = - dS/dt = - b/t$$

Lorsqu'on exprime le stock hydrique en mm et le temps en heures, les paramètres a et b de la loi logarithmique obtenue à chaque cote (fig. 16) sont les suivants:

z, cm	a	b	r ²	n couples
10	25.64	-2.397	0.985	23
20	49.55	-4.788	0.982	23
30	70.66	-7.152	0.980	23
40	91.73	-9.364	0.979	23
50	114.4	-10.98	0.977	23
60	138.1	-11.88	0.976	23
80	188.7	-12.59	0.975	23
100	244.0	-12.91	0.973	23

Tableau 3: Ajustement de l'évolution temporelle du stock hydrique à différentes cotes selon la loi $S = a + b \ln t$.

Le calcul du gradient de charge hydraulique dH/dz à un instant t et à une cote z donnée a été effectué graphiquement à l'aide d'un dérivimètre (modèle OTT).

Les valeurs des différents paramètres, permettant le calcul de la conductivité hydraulique à différentes cotes, sont mentionnées en annexe 7. Le calcul à 60 cm ne peut se faire qu'à partir de $t = 0.27$ h, car la teneur en eau continue à augmenter du fait de la progression du front d'humectation après l'arrêt de l'infiltration.

Nous avons ajusté les courbes $K(\theta)$ (fig. 17) selon une loi en puissance ou exponentielle respectivement de type

$$K = a \theta^b \quad \text{ou} \quad K = \exp(A + B\theta)$$

Fig. 16: Evolution du stock hydrique
Site KATOURE - Sol sableux

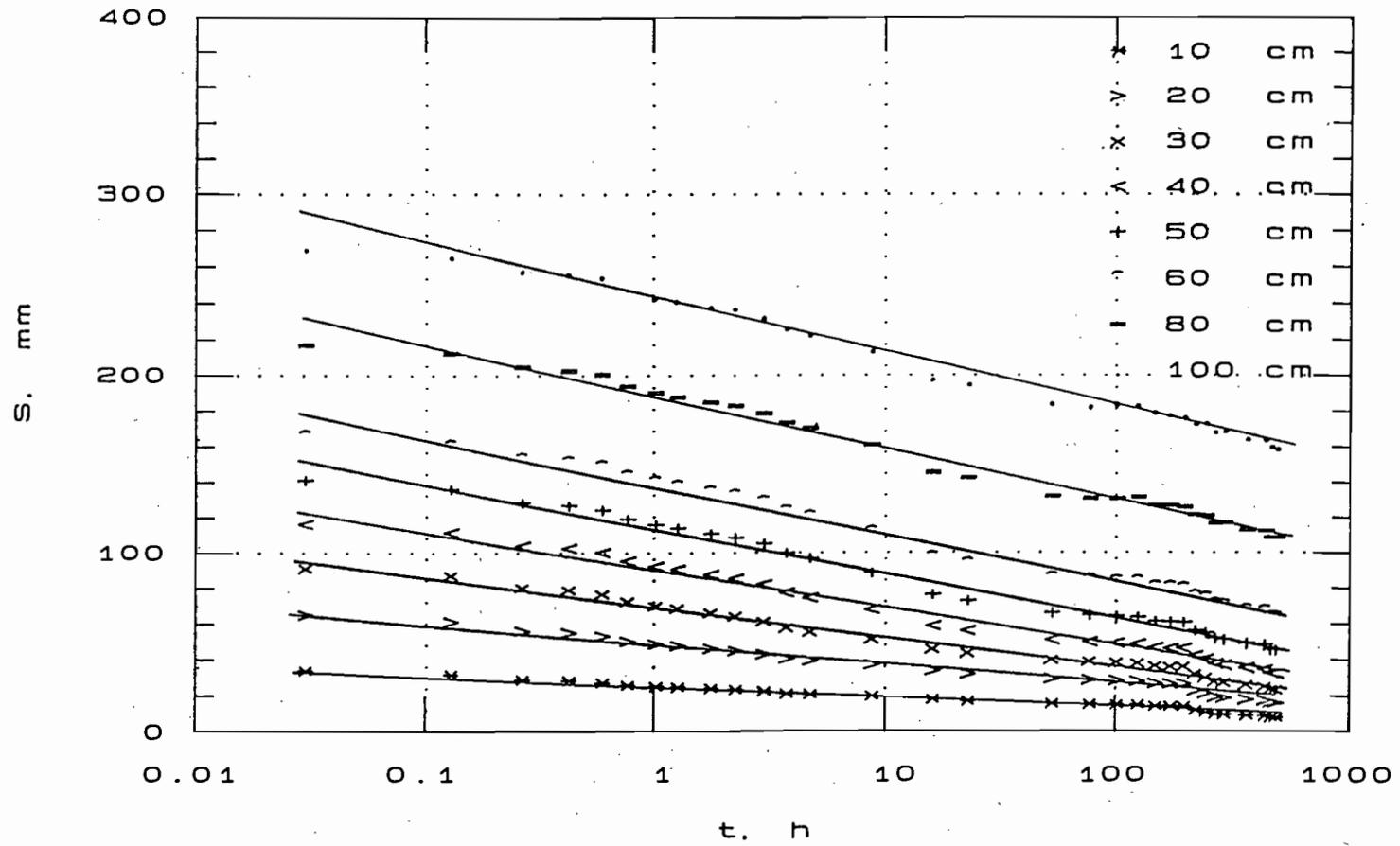
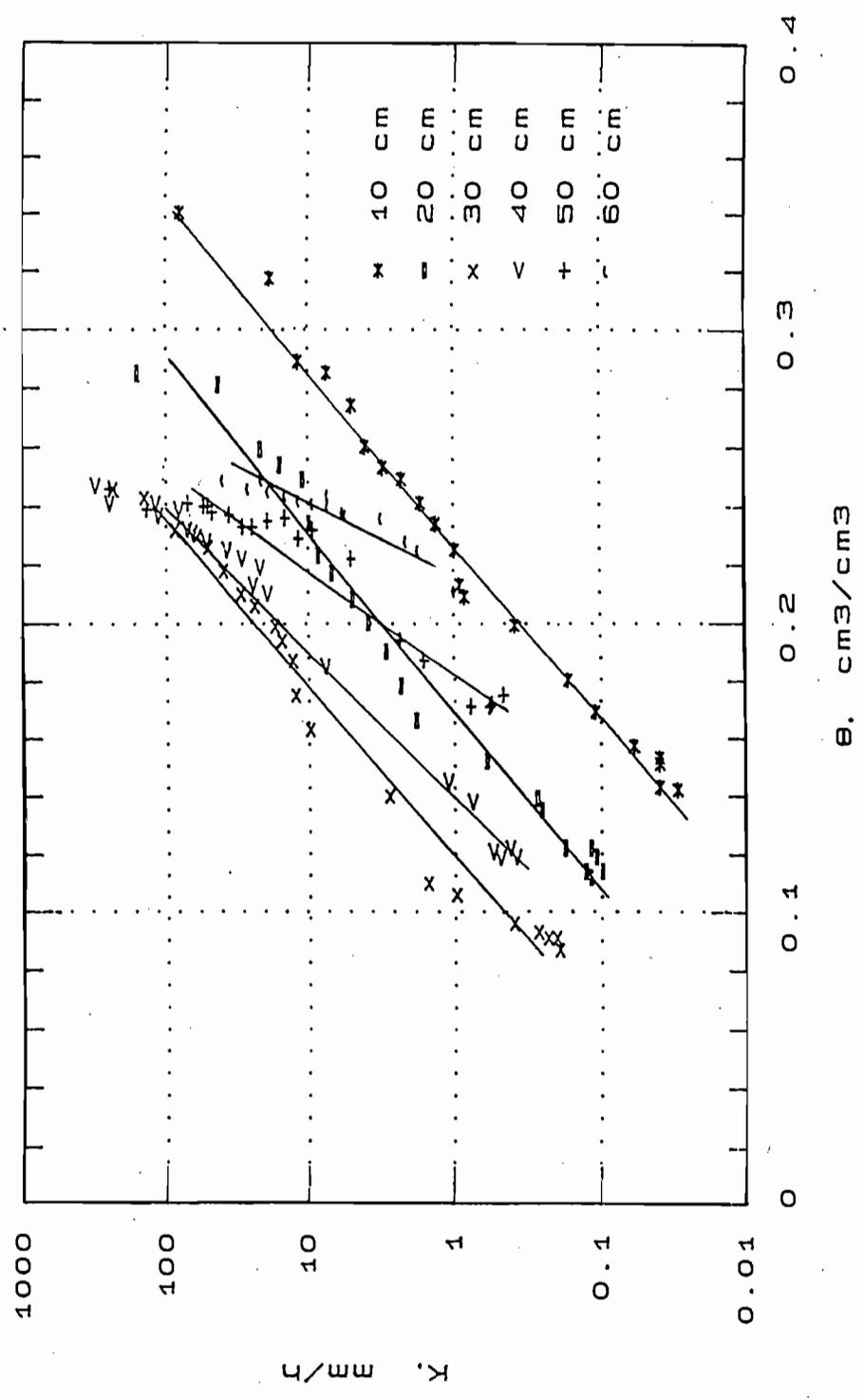


Fig. 17: Relation $K(\theta)$ - Site KATOURE
Sol sableux



avec les paramètres suivants:

z (cm)	a	b	r ²	A	B	r ²	n couples
10	3.22 E+5	8.380	0.989	-8.804	38.63	0.989	22
20	2.27 E+5	6.755	0.975	-6.325	37.42	0.975	22
30	4.01 E+5	5.930	0.977	-4.677	39.31	0.977	21
40	8.39 E+6	8.012	0.959	-6.529	46.60	0.977	20
50	8.26 E+9	13.37	0.886	-11.98	65.71	0.898	20
60	4.6 E+14	22.18	0.848	-21.16	96.88	0.862	15

Tableau 4: Coefficients d'ajustement de la relation $K(\theta)$ à différentes cotes.

Comme pour les courbes de succion $h(\theta)$, les courbes obtenues $K(\theta)$ définissent plusieurs niveaux bien distincts d'un point de vue hydrodynamique.

Compte tenu des valeurs de la teneur en eau à saturation données dans le tableau 2 et en extrapolant graphiquement les courbes $K(\theta)$, la conductivité hydraulique à saturation est estimée à environ 100 mm/h dans la couche de sol 0-50 cm. La fourchette d'estimation obtenue avec la courbe d'infiltration cumulée (§ 5.1.) surestime donc la valeur du K_s , d'environ 1.5 à 3 fois plus.

Remarque:

L'annexe 7 et la figure 17 montre de fortes valeurs de K pour les teneurs en eau les plus élevées. Cela provient de la méthode analytique employée pour déterminer les flux hydriques. En effet, la relation linéaire $S(z,t) = a + b \ln t$ semble mal s'adapter pour les temps inférieurs à 1 heure, et ce malgré un bon coefficient de corrélation. Une faible variation sur la pente b entraîne une erreur sur la valeur du flux d'autant plus grande que le temps considéré est petit. Dans notre cas, la pente est ainsi notablement surestimée (fig. 16). Par voie de conséquence, cette surestimation se répercute sur la détermination du flux et de la conductivité hydraulique pour une cote, un instant et un gradient de charge hydraulique donnés.

En procédant par un lissage manuel des premiers points expérimentaux (S,t) portés en coordonnées semi-logarithmiques, nous avons recalculé, à différentes cotes, la pente en chacun de ces points. Celle-ci est donnée à un instant $t = t_0$ par la relation:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{S(10^{n+1}) - S(10^n)}{\ln 10} * \frac{1}{t_0}$$

où $S(10^n)$ et $S(10^{n+1})$ représente les valeurs du stock lues aux instants 10^n et 10^{n+1} .

Les nouvelles valeurs de K (mm/h) seraient donc les suivantes:

z, cm	0.03 h	0.13 h	0.27 h	0.43 h
10	72.33	(voir valeurs en annexe 7)		
20	86.83	35.29	(idem)	
30	101.3	96.56	85.80	(idem)
40	101.3	103.4	88.76	101.9
50	78.15	59.18	55.49	53.74
60	-	-	32.43	

L'ajustement analytique des courbes $K(\theta)$ devrait donc se faire en compte de ces nouvelles valeurs. A $t = 0.03$ h, K est estimé selon la loi exponentielle (tableau 4) à 76.0, 76.7, 147.4, 145.6 et 65.7 mm/h entre 10 et 50 cm, valeurs relativement voisines de celles obtenues par lissage.

6. CONCLUSION

Ce type d'essai reste très délicat à mettre en oeuvre dans un sol présentant une nappe phréatique peu profonde. Il s'agit, avant tout, de bien contrôler l'apport initial, afin d'éviter une saturation excessive du profil qui favorise les écoulements latéraux. Une lame infiltrée, permettant l'humidification sur une profondeur située à mi-chemin entre la surface du sol et le plan de la nappe, est recommandée.

Le protocole d'étalonnage neutronique, que nous avons employé, s'est révélé fiable. En introduisant une composante spatiale, il permet de contrôler la représentativité du site, de pratiquer et de multiplier les prélèvements de sol aux mêmes niveaux que les mesures sonde, que ce soit en conditions sèches ou humides.

La détermination de la relation $K(\theta)$ est très liée à la méthode de calcul employée. Un bon ajustement linéaire de la relation $S = f(\ln t)$ peut néanmoins entraîner des différences notables entre la pente ainsi calculée et celle réellement lue sur la courbe à un instant donné. Il s'ensuit que, pour des temps très courts (inférieurs à l'unité), le flux peut être amplement surestimé ou sous-estimé. Dans notre cas, en début de drainage interne, nous surestimons les flux et par conséquent la conductivité hydraulique, en procédant de la sorte.

Les résultats obtenus montrent clairement que nous pouvons difficilement caractériser l'ensemble du profil par une seule relation $h(\theta)$ ou $K(\theta)$. Il s'agit de savoir quel est la signification physique d'une telle différenciation hydrodynamique. Une étude détaillée de l'organisation structurale du matériau est une voie possible pour tenter d'expliquer un tel phénomène.

REMERCIEMENTS

Nous remercions B. BARRY, chercheur hydraulicien à l'Institut Sénégalais de Recherche Agricole, et H. COLLEUILLE, étudiant du DEA de pédologie à l'Université Paris VI et à l'Institut National Agronomique de Paris Grignon, en stage à l'ORSTOM, pour leur participation aux expérimentations sur le terrain. Le Centre de Recherche Agricole de l'ISRA à Ziguinchor-Djibelor est également associé pour le soutien logistique apporté à ce travail.

BIBLIOGRAPHIE

- ARYA (L. M.), FARREL (D.A.), BLAKE (G.R.), 1975.- A field study of soil water depletion patterns in presence of growing soybean roots: I. Determination of hydraulic properties of the soil. Soil Sci. Am. Proc., 39, 424-430.
- BOIVIN (P.), TOUMA (J.), ZANTE (P.), 1988.- Mesure de l'infiltrabilité du sol par la méthode du double anneau. 1. Résultats expérimentaux. Cah. Orstom, sér. Pédol., vol XXIV, n°1, 17-25.
- GARDNER (W.R.), 1958.- Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. Soil Sci., 85, 228-232.
- HILLEL (D.), KRENTOS (V.D.), STILIANOU (Y.), 1972.- Procedure and test of an internal drainage method for measuring soil hydraulic characteristics in-situ. Soil Sci. 114, 395-400.
- LATY (R.), VACHAUD (G.).- CARHYD, logiciel de dépouillement d'essais de CARactérisation HYDrodynamique, notice d'utilisation. Multigr., I.M.Grenoble.
- MONTOROI (J.P.), ZANTE (P.), 1988.- Etalonnage d'une sonde neutronique en milieu chloruré. Multigr., ORSTOM/Dakar.
- PHILIP (J.R.), 1957.- The theory of infiltration: 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations. Soil Sci., 84, 257-264.
- TOUMA (J.), BOIVIN (P.), 1988.- Mesure de l'infiltrabilité du sol par la méthode du double anneau. 2. Résultats numériques. Cah. Orstom, sér. Pédol., vol XXIV, n°1, 27-37.
- TOUMA (J.), CHEVILLOTTE (H.), 1988.- OPTIM, logiciel d'optimisation de paramètres non linéaires. Multigr., ORSTOM/Dakar.
- VACHAUD (G.), DANCETTE (C.), SONKO (M.), THONY (J.L.), 1978.- Méthodes de caractérisation hydrodynamique in situ d'un sol non saturé. Application à deux types de sol du Sénégal en vue de la détermination des termes du bilan hydrique. Ann. Agr., 29, 1-36.

- VACHAUD (G.), VAUCLIN (M.), COLOMBANI (J.), 1981.- Bilan hydrique dans le Sud Tunisien. 1. Caractérisation expérimentale des transferts dans la zone non saturée. J. of Hydrology, 49, 31-52.
- VAN GENUCHTEN (M. T.), 1980.- A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 44, 892-898.
- YOUNGS (E.G.), 1968.- An estimation of sorptivity for infiltration studies from moisture moment considerations. Soil Sci., 106, 157-163.

ANNEXES

1. Description pédologique.

- 0 - 10 cm Horizon organique sec, couleur marron foncé (10YR3/2 en sec), structure grumeleuse, texture sableuse, porosité horizontale litée importante, nombreuses racines anciennes de riz.
Transition progressive.
- 10 - 20 cm Horizon moins organique sec, couleur marron clair (10YR 4/3 en sec), structure prismatique de taille décimétrique à sous-structure polyédrique subanguleuse de taille centimétriques, texture sableuse.
Transition assez nette.
- 20 - 110 cm Horizon beige (10YR 7/2) présentant des taches ocre (10YR 7/8) qui diffusent, sur quelques centimètres, autour d'anciens conduits racinaires légèrement indurés. Ces taches deviennent rosâtres (5YR 5/3) à partir de 85 cm. Entre 40 et 50 cm, elles tendent à se généraliser et s'indurent en présence de nombreux "iron-pipes" (anciennes racines de palétuviers ferrifiées). La texture est sableuse. L'horizon devient de plus en plus humide en profondeur. La structure est massive à débit polyédrique subanguleux. Forte porosité tubulaire.
Transition nette.
- 110 - 140 cm Horizon gris (2.5Y 5/0), saturé, sableux, présentant des racines de palétuviers (Rhizophora) non décomposées, parfois remplies de sable blanc. Ces racines se situent dans le prolongement des racines supérieures oxydées. Quelques autres racines très fines.

Nappe phréatique à 1.40 cm.

2. Caractéristiques analytiques.

* Granulométrie

z, cm	Argile (A)	Limon fin	Limon grossier	Total Limon (L)	Sable fin	Sable grossier	Total Sable (S)
0-10	9.6	4.8	6.6	11.4	58.1	20.9	79
10-20	6.1	3.3	6.9	10.2	60.6	23	83.6
20-30	5.1	2.1	6.8	8.9	62.5	23.5	86
30-40	6.2	1.9	5.4	7.3	61.6	24.8	86.4
40-50	7	2.6	5.8	8.4	59.5	25.1	84.6
50-60	3.8	2.4	5.8	8.2	60.5	27.5	88
60-70	4.2	2.3	5.4	7.7	59.2	28.9	88.1
70-80	5.4	2.1	5.1	7.2	59.5	27.8	87.3
80-90	6.1	1.9	5.3	7.2	60.2	26.4	86.6
90-100	6.9	1.9	5.2	7.1	59.2	26.7	85.9
100-110	7.4	2.1	4.5	6.6	58.4	27.5	85.9
110-120	8.5	2.7	4.3	7	57	27.5	84.5
120-130	8.7	2.7	3.9	6.6	54.4	30.3	84.7
130-140	7	2	3.7	5.7	57.3	29.9	87.2
140-150	5.3	3.2	3.6	6.8	60.4	27.6	88
150-160	7.2	2.4	4.1	6.5	57.8	28.5	86.3
160-180	4	4.9	3.4	8.3	60.5	27.3	87.8
180-200	4.6	4.6	3.9	8.5	62.2	24.7	86.9

* Solution du sol (extrait 1/5):

z, cm	pH	CE mS/cm
5-15	5.6	0.1
15-25	6.7	0.09
25-35	7.2	0.12
35-45	7.5	0.11
45-55	7.9	0.11
55-65	7.9	0.09
65-75	7.8	0.07
75-85	7.9	0.05
85-95	7.8	0.05
95-105	7.7	0.06
105-115	4.4	0.25
115-125	4.0	0.32
125-135	4.0	0.32
135-145	3.8	0.40
145-155	3.9	0.33

* Analyses diverses:

z, cm	0-10	30-40	60-70	100-110	130-140	160-170
Carbone (o/cc)	5.2	1.4	0.5			
Azote (o/cc)	0.49	0.12	0.04			
C/N	10.7	11.8	12.3			
Fer libre (%)	0.3	traces	traces	0.59	0.50	0.65
Fer total (%)	0.95	0.70	0.88	1.12	1.16	1.27
Fer l./Fer t.	3	-	-	0.5	0.4	0.5
Aluminium échangeable (méq/100 g)				1.0	4.7	4.9
Cations échangeables:						
Ca ⁺⁺	2.45	1.05	0.42			
Mg ⁺⁺	1.31	0.66	0.38			
K ⁺	0.19	0.07	0.04			
Na ⁺	0.3	0.10	0.02			
S	4.0	1.88	0.86			
T (capacité d'échange)	4.20	1.55	0.90			
S/T (%)	>100	>100	95.6			
pF:						
4.2			1.7	2.9	3.0	2.9
3.0			3.8	5.4	4.8	4.9
2.5			5.0	6.7	7.5	6.9
Densité réelle			2.61		2.61	
pH eau 1/2.5	4.7	7.0	7.3	3.5	2.7	2.5
KCl, N	4.3	6.2	6.3	3.3	2.7	2.5

3. Stock hydrique entre la surface du sol et une cote donnée au début et à la fin de la phase d'infiltration.

K1BINF	12.45/ 8/ 3/1989
--------	------------------

Z (cm)	TETA	STOCK	Z (cm)
10.0	.080	8.0	10.0
		12.1	15.0
20.0	.084	16.3	20.0
		20.5	25.0
30.0	.075	24.2	30.0
		28.0	35.0
40.0	.111	33.6	40.0
		39.1	45.0
50.0	.172	47.7	50.0
		56.3	55.0
60.0	.221	67.4	60.0
		78.4	65.0
70.0	.243	90.6	70.0
		102.8	75.0
80.0	.260	115.8	80.0
		128.8	85.0
90.0	.275	142.6	90.0
		156.3	95.0
100.0	.288	170.7	100.0
		185.1	105.0
110.0	.293	199.8	110.0
		214.5	115.0
120.0	.302	229.6	120.0
		244.7	125.0
130.0	.304	259.9	130.0

K1BINF	13.14/ 8/ 3/1989
--------	------------------

Z (cm)	TETA	STOCK	Z (cm)
10.0	.350	35.0	10.0
		52.4	15.0
20.0	.298	67.4	20.0
		82.3	25.0
30.0	.249	94.7	30.0
		107.2	35.0
40.0	.243	119.3	40.0
		131.5	45.0
50.0	.242	143.6	50.0
		155.7	55.0
60.0	.241	167.8	60.0
		179.9	65.0
70.0	.255	192.6	70.0
		205.3	75.0
80.0	.266	218.6	80.0
		231.9	85.0
90.0	.277	245.8	90.0
		259.6	95.0
100.0	.290	274.1	100.0
		288.7	105.0
110.0	.293	303.3	110.0
		318.0	115.0
120.0	.302	333.1	120.0
		348.2	125.0
130.0	.304	363.4	130.0

4. Evolution de la teneur en eau à différentes cotes durant la phase de redistribution.

▲ Z= 10 cm

HEURE :	0.00	0.03	0.13	0.27	0.43	0.60
TETA :	.350	.340	.317	.289	.285	.274
HEURE :	0.77	1.02	1.27	1.77	2.27	3.02
TETA :	.260	.253	.249	.241	.234	.225
HEURE :	3.77	4.77	8.77	15.93	22.77	52.77
TETA :	.213	.209	.199	.180	.169	.157
HEURE :	76.77	100.77	124.77	148.77	172.77	196.77
TETA :	.153	.151	.151	.143	.142	.142
HEURE :	220.77	244.77	268.77	292.77	364.77	436.77
TETA :	.120	.110	.098	.096	.092	.089
HEURE :	460.77	484.77				
TETA :	.081	.080				

▲ Z= 20 cm

HEURE :	0.00	0.03	0.13	0.27	0.43	0.60
TETA :	.298	.285	.281	.259	.254	.249
HEURE :	0.77	1.02	1.27	1.77	2.27	3.02
TETA :	.234	.223	.217	.208	.200	.190
HEURE :	3.77	4.77	8.77	15.93	22.77	52.77
TETA :	.178	.166	.152	.139	.135	.122
HEURE :	76.77	100.77	124.77	148.77	172.77	196.77
TETA :	.122	.119	.114	.114	.112	.113
HEURE :	220.77	244.77	268.77	292.77	364.77	436.77
TETA :	.104	.102	.096	.096	.090	.088
HEURE :	460.77	484.77				
TETA :	.085	.084				

▲ Z= 30 cm

HEURE :	0.00	0.03	0.13	0.27	0.43	0.60
TETA :	.249	.246	.243	.232	.230	.226
HEURE :	0.77	1.02	1.27	1.77	2.27	3.02
TETA :	.218	.210	.206	.199	.194	.187
HEURE :	3.77	4.77	8.77	15.93	22.77	52.77
TETA :	.175	.163	.140	.111	.106	.096
HEURE :	76.77	100.77	124.77	148.77	172.77	196.77
TETA :	.093	.091	.091	.087	.084	.086
HEURE :	220.77	244.77	268.77	292.77	364.77	436.77
TETA :	.084	.082	.082	.079	.079	.074
HEURE :	460.77	484.77				
TETA :	.071	.071				

▲ Z= 40 cm

HEURE :	0.00	0.03	0.13	0.27	0.43	0.60
TETA :	.243	.247	.241	.241	.237	.239
HEURE :	0.77	1.02	1.27	1.77	2.27	3.02
TETA :	.232	.231	.228	.225	.222	.219
HEURE :	3.77	4.77	8.77	15.93	22.77	52.77
TETA :	.213	.210	.185	.145	.138	.122
HEURE :	76.77	100.77	124.77	148.77	172.77	196.77
TETA :	.119	.121	.119	.114	.116	.115
HEURE :	220.77	244.77	268.77	292.77	364.77	436.77
TETA :	.112	.117	.112	.111	.107	.108
HEURE :	460.77	484.77				
TETA :	.102	.102				

Δ Z= 50 cm

HEURE :	0.00	0.03	0.13	0.27	0.43	0.60
TETA :	.242	.246	.239	.241	.240	.240
HEURE :	0.77	1.02	1.27	1.77	2.27	3.02
TETA :	.238	.237	.233	.233	.235	.236
HEURE :	3.77	4.77	8.77	15.93	22.77	52.77
TETA :	.229	.232	.222	.194	.187	.171
HEURE :	76.77	100.77	124.77	148.77	172.77	196.77
TETA :	.172	.171	.175	.171	.173	.166
HEURE :	220.77	244.77	268.77	292.77	364.77	436.77
TETA :	.167	.169	.168	.168	.162	.165
HEURE :	460.77	484.77				
TETA :	.156	.158				

Δ Z= 60 cm

HEURE :	0.00	0.03	0.13	0.27	0.43	0.60
TETA :	.241	.249	.250	.249	.246	.249
HEURE :	0.77	1.02	1.27	1.77	2.27	3.02
TETA :	.245	.244	.242	.241	.244	.237
HEURE :	3.77	4.77	8.77	15.93	22.77	52.77
TETA :	.240	.238	.236	.225	.228	.211
HEURE :	76.77	100.77	124.77	148.77	172.77	196.77
TETA :	.214	.212	.218	.207	.209	.207
HEURE :	220.77	244.77	268.77	292.77	364.77	436.77
TETA :	.206	.210	.207	.209	.203	.202
HEURE :	460.77	484.77				
TETA :	.198	.196				

Δ Z= 80 cm

HEURE :	0.00	0.03	0.13	0.27	0.43	0.60
TETA :	.266	.264	.269	.268	.268	.269
HEURE :	0.77	1.02	1.27	1.77	2.27	3.02
TETA :	.266	.261	.265	.261	.262	.261
HEURE :	3.77	4.77	8.77	15.93	22.77	52.77
TETA :	.259	.258	.261	.258	.262	.255
HEURE :	76.77	100.77	124.77	148.77	172.77	196.77
TETA :	.252	.257	.260	.255	.250	.251
HEURE :	220.77	244.77	268.77	292.77	364.77	436.77
TETA :	.252	.255	.251	.258	.252	.251
HEURE :	460.77	484.77				
TETA :	.250	.247				

Δ Z= 100 cm

HEURE :	0.00	0.03	0.13	0.27	0.43	0.60
TETA :	.290	.289	.288	.289	.296	.293
HEURE :	0.77	1.02	1.27	1.77	2.27	3.02
TETA :	.292	.290	.293	.288	.293	.292
HEURE :	3.77	4.77	8.77	15.93	22.77	52.77
TETA :	.292	.287	.288	.283	.289	.280
HEURE :	76.77	100.77	124.77	148.77	172.77	196.77
TETA :	.282	.285	.286	.284	.279	.279
HEURE :	220.77	244.77	268.77	292.77	364.77	436.77
TETA :	.280	.282	.279	.280	.277	.279
HEURE :	460.77	484.77				
TETA :	.279	.278				

5. Evolution de la charge hydraulique à différentes cotes durant la phase de redistribution.

Δ Z = 10 cm						
HEURES :	0.00	0.03	0.13	0.27	0.43	0.60
CHARGE :	-10.0	-13.0	-27.0	-39.0	-45.0	-49.0
HEURES :	0.77	1.02	1.27	1.77	2.27	3.02
CHARGE :	-52.0	-55.0	-56.0	-59.0	-60.0	-60.0
HEURES :	3.77	4.77	8.77	15.93	22.77	52.77
CHARGE :	-60.0	-61.0	-62.0	-70.0	-72.0	-87.0
HEURES :	76.77	100.77	124.77	148.77	172.77	196.77
CHARGE :	-93.0	-99.0	-102.0	-105.0	-108.0	-112.0
HEURES :	220.77	244.77	268.77	292.77	364.77	436.77
CHARGE :	-130.0	-162.0	-178.0	-213.0	-250.0	-337.0
HEURES :	460.77	484.77				
CHARGE :	-351.0	-400.0				
Δ Z = 20 cm						
HEURES :	0.00	0.03	0.13	0.27	0.43	0.60
CHARGE :	-23.0	-24.0	-46.0	-51.0	-55.0	-59.0
HEURES :	0.77	1.02	1.27	1.77	2.27	3.02
CHARGE :	-62.0	-64.0	-64.0	-67.0	-68.0	-68.0
HEURES :	3.77	4.77	8.77	15.93	22.77	52.77
CHARGE :	-70.0	-71.0	-74.0	-84.0	-90.0	-99.0
HEURES :	76.77	100.77	124.77	148.77	172.77	196.77
CHARGE :	-103.0	-107.0	-107.0	-110.0	-111.0	-112.0
HEURES :	220.77	244.77	268.77	292.77	364.77	436.77
CHARGE :	-113.0	-114.0	-118.0	-120.0	-124.0	-133.0
HEURES :	460.77	484.77				
CHARGE :	-134.0	-136.0				
Δ Z = 30 cm						
HEURES :	0.00	0.03	0.13	0.27	0.43	0.60
CHARGE :	-33.0	-35.0	-52.0	-55.0	-59.0	-62.0
HEURES :	0.77	1.02	1.27	1.77	2.27	3.02
CHARGE :	-64.0	-65.0	-65.0	-69.0	-70.0	-70.0
HEURES :	3.77	4.77	8.77	15.93	22.77	52.77
CHARGE :	-71.0	-72.0	-80.0	-90.0	-92.0	-101.0
HEURES :	76.77	100.77	124.77	148.77	172.77	196.77
CHARGE :	-104.0	-108.0	-108.0	-111.0	-112.0	-113.0
HEURES :	220.77	244.77	268.77	292.77	364.77	436.77
CHARGE :	-116.0	-117.0	-118.0	-122.0	-124.0	-132.0
HEURES :	460.77	484.77				
CHARGE :	-132.0	-136.0				
Δ Z = 40 cm						
HEURES :	0.00	0.03	0.13	0.27	0.43	0.60
CHARGE :	-45.0	-45.0	-56.0	-57.0	-61.0	-64.0
HEURES :	0.77	1.02	1.27	1.77	2.27	3.02
CHARGE :	-66.0	-66.0	-67.0	-71.0	-72.0	-72.0
HEURES :	3.77	4.77	8.77	15.93	22.77	52.77
CHARGE :	-72.0	-73.0	-81.0	-91.0	-96.0	-106.0
HEURES :	76.77	100.77	124.77	148.77	172.77	196.77
CHARGE :	-110.0	-111.0	-112.0	-111.0	-112.0	-116.0
HEURES :	220.77	244.77	268.77	292.77	364.77	436.77
CHARGE :	-117.0	-121.0	-117.0	-124.0	-123.0	-134.0
HEURES :	460.77	484.77				
CHARGE :	-133.0	-132.0				

▲ Z= 50 cm

HEURES :	0.00	0.03	0.13	0.27	0.43	0.60
CHARGE :	-55.0	-55.0	-58.0	-60.0	-63.0	-66.0
HEURES :	0.77	1.02	1.27	1.77	2.27	3.02
CHARGE :	-67.0	-67.0	-68.0	-72.0	-73.0	-73.0
HEURES :	3.77	4.77	8.77	15.93	22.77	52.77
CHARGE :	-73.0	-74.0	-82.0	-92.0	-100.0	-108.0
HEURES :	76.77	100.77	124.77	148.77	172.77	196.77
CHARGE :	-110.0	-112.0	-112.0	-112.0	-113.0	-117.0
HEURES :	220.77	244.77	268.77	292.77	364.77	436.77
CHARGE :	-117.0	-119.0	-118.0	-120.0	-121.0	-132.0
HEURES :	460.77	484.77				
CHARGE :	-126.0	-126.0				

▲ Z= 60 cm

HEURES :	0.00	0.03	0.13	0.27	0.43	0.60
CHARGE :	-111.0	-106.0	-92.0	-84.0	-80.0	-76.0
HEURES :	0.77	1.02	1.27	1.77	2.27	3.02
CHARGE :	-75.0	-75.0	-76.0	-79.0	-80.0	-80.0
HEURES :	3.77	4.77	8.77	15.93	22.77	52.77
CHARGE :	-81.0	-82.0	-90.0	-100.0	-103.0	-111.0
HEURES :	76.77	100.77	124.77	148.77	172.77	196.77
CHARGE :	-113.0	-113.0	-113.0	-113.0	-113.0	-117.0
HEURES :	220.77	244.77	268.77	292.77	364.77	436.77
CHARGE :	-117.0	-117.0	-116.0	-120.0	-119.0	-125.0
HEURES :	460.77	484.77				
CHARGE :	-124.0	-124.0				

▲ Z= 80 cm

HEURES :	0.00	0.03	0.13	0.27	0.43	0.60
CHARGE :	-114.0	-112.0	-100.0	-92.0	-89.0	-83.0
HEURES :	0.77	1.02	1.27	1.77	2.27	3.02
CHARGE :	-83.0	-83.0	-83.0	-84.0	-84.0	-84.0
HEURES :	3.77	4.77	8.77	15.93	22.77	52.77
CHARGE :	-84.0	-84.0	-91.0	-102.0	-104.0	-111.0
HEURES :	76.77	100.77	124.77	148.77	172.77	196.77
CHARGE :	-113.0	-113.0	-113.0	-115.0	-115.0	-115.0
HEURES :	220.77	244.77	268.77	292.77	364.77	436.77
CHARGE :	-116.0	-116.0	-116.0	-116.0	-117.0	-120.0
HEURES :	460.77	484.77				
CHARGE :	-120.0	-121.0				

▲ Z= 100 cm

HEURES :	0.00	0.03	0.13	0.27	0.43	0.60
CHARGE :	-113.0	-110.0	-108.0	-101.0	-95.0	-95.0
HEURES :	0.77	1.02	1.27	1.77	2.27	3.02
CHARGE :	-92.0	-92.0	-92.0	-92.0	-92.0	-92.0
HEURES :	3.77	4.77	8.77	15.93	22.77	52.77
CHARGE :	-92.0	-92.0	-94.0	-103.0	-108.0	-111.0
HEURES :	76.77	100.77	124.77	148.77	172.77	196.77
CHARGE :	-113.0	-113.0	-113.0	-116.0	-116.0	-116.0
HEURES :	220.77	244.77	268.77	292.77	364.77	436.77
CHARGE :	-117.0	-116.0	-117.0	-117.0	-118.0	-120.0
HEURES :	460.77	484.77				
CHARGE :	-120.0	-120.0				

6. Stock hydrique entre la surface du sol et une cote donnée au début et à la fin de la phase de redistribution.

KIBDICN	13.14/ 8/ 3/1989
---------	------------------

Z (cm)	TETA	STOCK	Z (cm)
10.0	.350	35.0	10.0
		52.4	15.0
20.0	.298	67.4	20.0
		82.3	25.0
30.0	.249	94.7	30.0
		107.2	35.0
40.0	.243	119.3	40.0
		131.5	45.0
50.0	.242	143.6	50.0
		155.7	55.0
60.0	.241	167.8	60.0
		179.9	65.0
70.0	.255	192.6	70.0
		205.3	75.0
80.0	.266	218.6	80.0
		231.9	85.0
90.0	.277	245.8	90.0
		259.6	95.0
100.0	.290	274.1	100.0
		288.7	105.0
110.0	.293	303.3	110.0
		318.0	115.0
120.0	.302	333.1	120.0
		348.2	125.0
130.0	.304	363.4	130.0

KIBDICN	18. 0/28/ 3/1989
---------	------------------

Z (cm)	TETA	STOCK	Z (cm)
10.0	.080	8.0	10.0
		12.1	15.0
20.0	.084	16.3	20.0
		20.5	25.0
30.0	.071	24.0	30.0
		27.6	35.0
40.0	.102	32.7	40.0
		37.8	45.0
50.0	.158	45.7	50.0
		53.6	55.0
60.0	.196	63.5	60.0
		73.3	65.0
70.0	.229	84.7	70.0
		96.2	75.0
80.0	.247	108.6	80.0
		120.9	85.0
90.0	.264	134.1	90.0
		147.3	95.0
100.0	.278	161.2	100.0
		175.1	105.0
110.0	.287	189.5	110.0
		203.8	115.0
120.0	.287	218.1	120.0
		232.4	125.0
130.0	.293	247.1	130.0

7. Calcul de la conductivité hydraulique (drainage interne) à différentes cotes.

$z = 10 \text{ cm}$ $S = - 2.397 * \ln(t) + 25.64$ $S, \text{ mm}$ stock hydrique entre la cote z et la surface du sol à l'instant $t, \text{ h}$.

$t, \text{ h}$	0	.03	.13	.27	.43	.6	.77	1.02	1.27	1.77	2.27	3.02	3.77	4.77	6.77	15.93	22.77
$q, \text{ mm/h}$	79.9	18.44	8.88	5.57	4	3.11	2.35	1.89	1.35	1.06	.79	.64	.5	.27	.15	.11	
dH/dz	-1	-1	-.76	-.76	-.81	-.78	-.78	-.84	-.81	-.81	-.81	-.7	-.59	-.69	-.87	-.1	
$K, \text{ mm/h}$	79.9	18.44	11.68	7.33	4.94	3.99	3.01	2.25	1.67	1.31	.98	.91	.85	.39	.17	.11	
$\theta, \text{ cm}^3/\text{cm}^3$	.34	.317	.289	.285	.274	.26	.253	.249	.241	.234	.225	.213	.209	.199	.18	.169

52.77	76.77	100.77	124.77	148.77	172.77
.05	.03	.02	.02	.02	.01
-.9	-.8	-.53	-.51	-.5	-.32
.06	.04	.04	.04	.04	.03
.157	.153	.151	.151	.143	.142

$z = 20 \text{ cm}$ $S = - 4.788 * \ln(t) + 49.55$

$t, \text{ h}$	0	.03	.13	.27	.43	.6	.77	1.02	1.27	1.77	2.27	3.02	3.77	4.77	6.77	15.93	22.77
$dS/dt, \text{ mm/h}$	159.6	36.83	17.73	11.13	7.98	6.22	4.69	3.77	2.71	2.11	1.59	1.27	1	.55	.3	.21	
dH/dz	-1	-.85	-.81	-.7	-.73	-.63	-.55	-.55	-.55	-.55	-.55	-.55	-.55	-.55	-.9	-1.09	-.8
$K, \text{ mm/h}$	159.6	43.33	21.89	15.9	10.93	9.87	8.53	6.85	4.93	3.84	2.89	2.31	1.82	.61	.28	.26	
$\theta, \text{ cm}^3/\text{cm}^3$	.285	.281	.259	.254	.249	.234	.223	.217	.208	.2	.19	.178	.166	.152	.139	.135

52.77	76.77	100.77	124.77	148.77	172.77
.09	.06	.05	.04	.03	.03
-.5	-.5	-.47	-.31	-.31	-.25
.18	.12	.11	.13	.1	.12
.122	.122	.119	.114	.114	.112

$z = 30 \text{ cm} \quad S = -7.152 * \ln(t) + 70.66$

$t, \text{ h}$	0	.03	.13	.27	.43	.6	.77	1.02	1.27	1.77	2.27	3.02	3.77	4.77	8.77	15.93	22.77
$dS/dt, \text{ mm/h}$	238.4	55.02	26.49	16.63	11.92	9.29	7.01	5.63	4.04	3.15	2.37	1.9	1.5	.82	.45	.31	
dH/dz	-1	-.38	-.3	-.27	-.23	-.23	-.23	-.23	-.23	-.2	-.18	-.15	-.15	-.29	-.29	-.31	
$K, \text{ mm/h}$	238.4	144.79	88.3	61.59	51.83	40.39	30.48	24.48	17.57	15.75	13.17	12.67	10	2.83	1.55	1	
$\theta, \text{ cm}^3/\text{cm}^3$	.246	.243	.232	.23	.226	.218	.21	.206	.199	.194	.187	.175	.163	.14	.11	.106

52.77	76.77	100.77	124.77	148.77	172.77
.14	.09	.07	.06	.05	.04
-.34	-.32	-.29	-.29	-.25	
.41	.28	.24	.21	.2	
.096	.093	.091	.091	.087	.084

$z = 40 \text{ cm} \quad S = -9.354 * \ln(t) + 91.73$

$t, \text{ h}$	0	.03	.13	.27	.43	.6	.77	1.02	1.27	1.77	2.27	3.02	3.77	4.77	8.77	15.93	22.77
$dS/dt, \text{ mm/h}$	312.13	72.03	34.68	21.78	15.61	12.16	9.18	7.37	5.29	4.13	3.1	2.48	1.96	1.07	.59	.41	
dH/dz	-1	-.29	-.29	-.19	-.19	-.17	-.14	-.14	-.14	-.14	-.14	-.1	-.1	-.14	-.53	-.53	
$K, \text{ mm/h}$	312.13	248.38	119.59	114.63	82.16	71.53	65.57	52.64	37.79	29.5	22.14	24.8	19.6	7.64	1.11	.77	
$\theta, \text{ cm}^3/\text{cm}^3$	.247	.241	.241	.237	.239	.232	.231	.228	.225	.222	.219	.213	.21	.185	.145	.138

52.77	76.77	100.77	124.77	148.77	172.77
.18	.12	.09	.08	.06	.05
-.42	-.31	-.16	-.16		
.43	.39	.56	.5		
.122	.119	.121	.119	.114	.116

$z = 50 \text{ cm} \quad S = - 10.98 * \ln(t) + 114.4$

$t, \text{ h}$	0	.03	.13	.27	.43	.6	.77	1.02	1.27	1.77	2.27	3.02	3.77	4.77	8.77	15.93	22.77
$dS/dt, \text{ mm/h}$		366	84.46	40.67	25.53	18.3	14.26	10.76	8.65	6.2	4.84	3.64	2.91	2.3	1.25	.69	.48
dH/dz		-1.48	-.62	-.58	-.47	-.36	-.3	-.3	-.3	-.25	-.25	-.25	-.25	-.25	-.25	-.3	-.3
$K, \text{ mm/h}$		247.3	136.23	70.12	54.32	50.83	47.53	35.87	28.83	24.8	19.36	14.56	11.64	9.2	5	2.3	1.6
$\theta, \text{ cm}^3/\text{cm}^3$		.246	.239	.241	.24	.24	.238	.237	.233	.233	.235	.236	.229	.232	.222	.194	.187

52.77	76.77	100.77	124.77	148.77	172.77
.21	.14	.11	.09	.07	.06
-.27	-.25	-.19	-.19		
.78	.56	.58	.47		
.171	.172	.171	.175	.171	.173

$z = 60 \text{ cm} \quad S = - 11.88 * \ln(t) + 138.1$

$t, \text{ h}$		.27	.43	.6	.77	1.02	1.27	1.77	2.27	3.02	3.77	4.77	8.77	15.93	22.77
$dS/dt, \text{ mm/h}$		44	27.63	19.8	15.43	11.65	9.35	6.71	5.23	3.93	3.15	2.49	1.35	.75	.52
dH/dz		-1.19	-1.13	-1	-.87	-.87	-.87	-.78	-.78	-.78	-.47	-.47	-.47	-.47	-.27
$K, \text{ mm/h}$		36.97	24.45	19.8	17.74	13.39	10.75	8.6	6.71	5.04	6.7	5.3	2.87	1.6	1.93
$\theta, \text{ cm}^3/\text{cm}^3$		.249	.246	.249	.245	.244	.242	.241	.244	.237	.24	.238	.236	.225	.228

52.77	76.77	100.77	124.77	148.77	172.77
.23	.15	.12	.1	.08	.07
-.25					
.92					
.211	.214	.212	.218	.207	.209