

REPUBLIQUE TUNISIENNE

1982

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE

DIRECTION DES RESSOURCES EN EAU ET EN SOL

DIVISION DES SOLS

ETUDE METHODOLOGIQUE DES TRANSFERTS D'EAU ET DES SELS DANS UN MONOLITHE DE SOL ARGILEUX

2^{ÈRE} PARTIE : CARACTÉRISATION HYDRODYNAMIQUE
ET MODÉLISATION DES TRANSFERTS D'EAU

Par : V. VALLES, V.S.N.A. Pédologue à l'O.R.S.T.O.M.
A.M. VALLES, Allocataire D.G.R.S.T.
avec la collaboration technique de F. DAOUD et N. MAMI

1982

E-S 199

République tunisienne
MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE
Direction des Ressources
en Eau et en Sol
Division des Sols

ETUDE METHODOLOGIQUE DES TRANSFERTS D'EAU
ET DES SELS DANS UN MONOLITHE DE SOL ARGILEUX

2ÈME PARTIE : CARACTÉRISATION HYDRODYNAMIQUE
ET MODÉLISATION DES TRANSFERTS D'EAU

Par V. VALLES V.S.N.A. Pédologue à l'ORSTOM
A.M. VALLES Allocataire D.G.R.S.T.

avec la collaboration technique de F. DAUD et N. MAMI

E. S. 199

Cette étude a été réalisée dans le cadre de la Convention B2
DRES-ORSTOM, et a bénéficié d'une aide de la D.G.R.S.T.

1982

R E S U M E

Ce rapport présente les résultats d'un travail visant à mesurer et modéliser les transferts d'eau dans un sol argileux hétérogène.

Dans la première partie sont regroupées toutes les données mesurées en laboratoire sur un monolithe. Plusieurs essais d'humectation et de dessèchement du sol se sont succédés durant une année, permettant de déterminer les caractéristiques hydrodynamiques du sol étudié.

Un modèle de simulation des transferts d'eau par la méthode du bilan local est proposé dans la deuxième partie. Ce modèle est testé sur les résultats des expériences effectuées sur le monolithe.

CHAPITRE I

DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET METHODES DE MESURES

I - DESCRIPTION DU MONOLITHE

1) Prélèvement et description du profil

Un monolithe de 1,60 mètre de hauteur sur 50 cm de diamètre a été prélevé dans une parcelle expérimentale de la station de recherche du C.R.G.R. (Centre de Recherches du Génie Rural) à Cherfech, représentative de sols de la Basse Vallée de la Medjerda, région agricole assez intensément irriguée par des eaux de salure variable.

Il s'agit d'un sol peu évolué d'origine alluviale fluviatile, à hydromorphie profonde, et présentant un profil salin descendant à l'origine. Sa texture est argileuse, sa structure moyenne dans l'horizon travaillé, plus grossière au-dessous, avec un horizon compact entre 30 et 70 cm environ.

Le profil de densité apparente, dont la valeur ne dépasse pas 1,3 dans les horizons supérieurs, présente un "ventre" entre 30 et 60 cm, atteignant 1,6 puis se stabilise entre 1,25 et 1,45 vers la base. La porosité estimée (densité réelle théorique 2,5) est généralement supérieure à 40 %. Elle atteint 50 % de 0 à 30, mais présente un minimum à 38 % entre 50 et 60 cm de profondeur.

Le prélèvement a été réalisé après l'implantation, au centre du cylindre, d'un tube d'accès de sonde à neutrons, par enfoncement progressif d'un cylindre en PVC de 2 mètres de longueur. Après extraction le fond a été garni de cailloux et graviers, puis le monolithe a été placé au laboratoire de l'Ariana (DRES) sur un socle étanche.

Il a été dans un premier temps équipé aux 6 profondeurs de 10, 30, 50, 80, 110 et 150 cm, de trois batteries de tensiomètres, salinity-sensors et sondes quadripôles, et de trois bougies poreuses pour prélèvement de la solution du sol à 10, 50 et 110 cm. Une série d'expériences préliminaires, comprenant un essai de marquage au tritium en régime saturé, sont rapportés par ailleurs (VIEILLEFON & al. 1982).

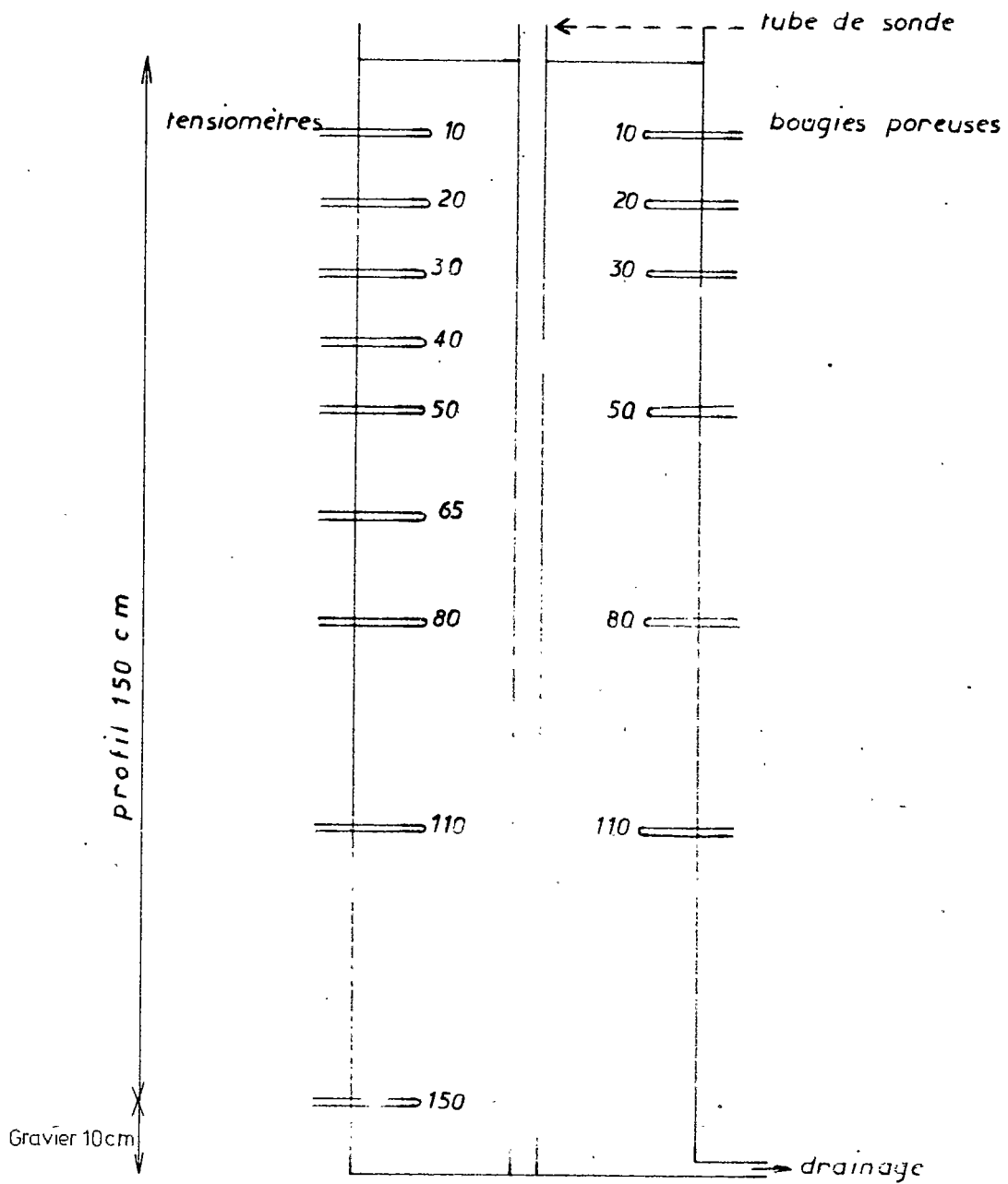


Fig.1. Schéma du monolithe

2) Equipement

Pour suivre les transferts d'eau avec précision, l'équipement du monolithe a été modifié.

- Un tube en aluminium placé au centre du monolithe permet l'accès à une sonde neutronique.
- Le monolithe a été équipé de 9 tensiomètres à mercure à lecture directe situés à 10, 20, 30, 40, 50, 65, 80, 110 et 145 cm de profondeur.
- Enfin 6 bougies poreuses ont été installées à 10, 20, 30, 50, 80 et 110 cm.

(figure 1)

3) Dispositif d'irrigation

Un système d'irrigation localisée (type goutte à goutte) est utilisé.

Ce dispositif permet d'irriguer avec des intensités faibles. (inférieures à la perméabilité en saturé).

On n'observe jamais de lame d'eau en surface.

II - MESURE DES HUMIDITES

1) Courbes d'étalonnage

L'étalonnage a été réalisé en pile à Cadarache par le CEA.

La connaissance de la densité apparente pour chaque couche différenciée du profil est nécessaire.

Les densités apparentes ont été mesurées à l'aide d'un densitomètre à membrane à 1 m du site de prélèvement du monolithe.

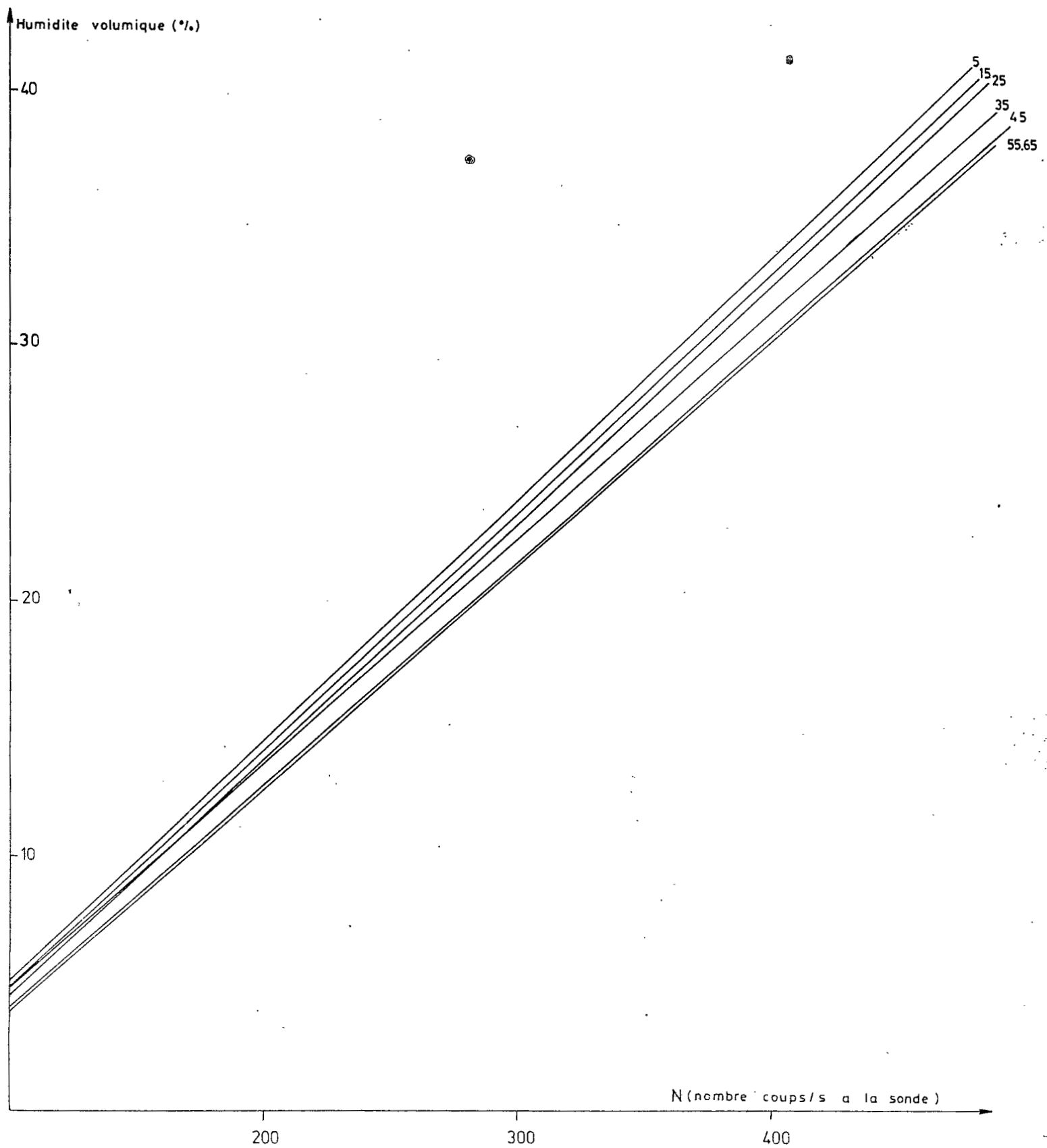
Les valeurs des densités apparentes et les coefficients fournis par l'étalonnage en pile sont portés dans le tableau 1.

On obtient pour chaque couche de 10 cm, une droite donnant l'humidité volumique en fonction du nombre de coups par seconde mesuré à la sonde.

$$\theta (\%) = A \cdot N + B$$

Humidité volumique Nombre coups/s

Fig. 2 - Droites d'étalonnage pour 0-70 cm



Quelques droites d'étalonnage sont portées sur la figure 2 à titre d'exemple.

| PROFONDEUR | DENSITE APPARENTE | COEFFICIENTS D'ETALONNAGE | |
|------------|-------------------|---------------------------|-------|
| | | A | B |
| 0 - 10 cm | 1,33 | 0,094 | - 4,3 |
| 10 - 20 | 1,22 | 0,092 | - 4,3 |
| 20 - 30 | 1,26 | 0,092 | - 4,7 |
| 30 - 40 | 1,45 | 0,089 | - 4,2 |
| 40 - 50 | 1,53 | 0,088 | - 4,8 |
| 50 - 60 | 1,55 | 0,088 | - 4,9 |
| 60 - 70 | - | 0,088 | - 4,9 |
| 70 - 80 | 1,38 | 0,089 | - 3,8 |
| 80 - 90 | - | 0,089 | - 3,8 |
| 90 - 100 | 1,45 | 0,089 | - 4,0 |
| 100 - 110 | - | 0,089 | - 4,0 |
| 110 - 120 | 1,36 | 0,090 | - 3,4 |
| 120 - 130 | 1,32 | 0,090 | - 3,1 |
| 130 - 140 | - | 0,090 | - 3,1 |
| 140 - 150 | 1,47 | 0,089 | - 4,1 |

Tableau 1 : Densité apparente et coefficients d'étalonnage des différentes couches

2) Utilisation de la sonde neutronique

Deux types de sondes ont été utilisés : Solo 10 (source 10 mCi) et Solo 20 (Source 40 mCi). Les résultats sont comparables et on observe des écarts de 5 coups/seconde en moyenne.

- l'étalonnage est effectué dans un fût de 200 litres d'eau. Nous avons remarqué que 15 à 20 mesures en temps long sont nécessaires pour obtenir des comptages stabilisés (problèmes de chauffe).

- les mesures sont faites tous les 10 cm, de 5 cm à 145 cm, en temps long avec deux ou trois répétitions. Le comptage eau est de nouveau mesuré à la fin du profil.

Toutes ces précautions ont permis d'obtenir des résultats précis et fiables.

3) Calcul des humidités

Les humidités sont calculées à 5, 15... 145 cm à l'aide des coefficients (tableau 1) et des comptages de la sonde corrigés par le comptage dans l'eau.

$$\theta \% = A \times \frac{N \times 1000}{N_1} + B$$

N nombre de coups/seconde mesuré

N₁ comptage eau

A et B coefficients d'étalonnage

Pour obtenir les valeurs des humidités à 10 cm, 20 cm... qui correspondent aux hauteurs des tensiomètres, on fait la moyenne arithmétique des valeurs inférieures et supérieures.

En résumé :

$$\begin{array}{l} \text{comptage à 5 cm} \longrightarrow \theta_{5 \text{ cm}} \\ \text{comptage à 15 cm} \longrightarrow \theta_{15 \text{ cm}} \end{array} \quad \theta_{10 \text{ cm}} = \frac{\theta_{5 \text{ cm}} + \theta_{15 \text{ cm}}}{2}$$

III - MESURE DE LA SUCCION ET DE LA CHARGE HYDRAULIQUE

1) Définitions

$$H = h - z + P_{\text{osm}}$$

H est la charge hydraulique, c'est-à-dire le potentiel total créant l'écoulement de l'eau

h est la suction ou potentiel capillaire

z est la profondeur

P_{osm} est le potentiel osmotique

tous les termes sont exprimés en cm d'eau

En fait on néglige le terme osmotique, et l'équation devient :

$$H(\text{cm}) = h(\text{cm}) - z(\text{cm})$$

2) Mesures

Les tensiomètres sont reliés à un manomètre à mercure. La charge est lue directement en cm d'eau.

CHAPITRE II

RESULTATS EXPERIMENTAUX

Plusieurs essais avec des eaux de qualité différente ont été effectués.

- 1er essai : 14 juillet 1981

Saturation du monolithe avec l'eau de la Medjerda (CE = 3,34 mmhos).
Mesures en drainage interne et évaporation

- 2ème essai : 17 octobre 1981

Irrigation avec une eau salée (CE = 6,78 mmhos).
Mesures en drainage interne -

- 3ème essai : 10 novembre 1981

Irrigation avec une eau salée (CE = 56,71 mmhos)

- 4ème essai : 20 janvier 1982

Identique au 1er essai -

- 5ème essai : 29 mars 1982

Irrigation avec l'eau de la Medjerda.
Mesures en infiltration -

Le but de ces divers essais est de déterminer les fonctions $h(\theta)$ et $k(\theta)$, et de suivre leurs variations en fonction de la salure du sol.

Le sol étant entièrement dessalé avant les expériences, aucune variation sensible n'a été observée malgré les sels apportés par l'irrigation.

Seuls les essais 1 et 5 sont décrits avec précision

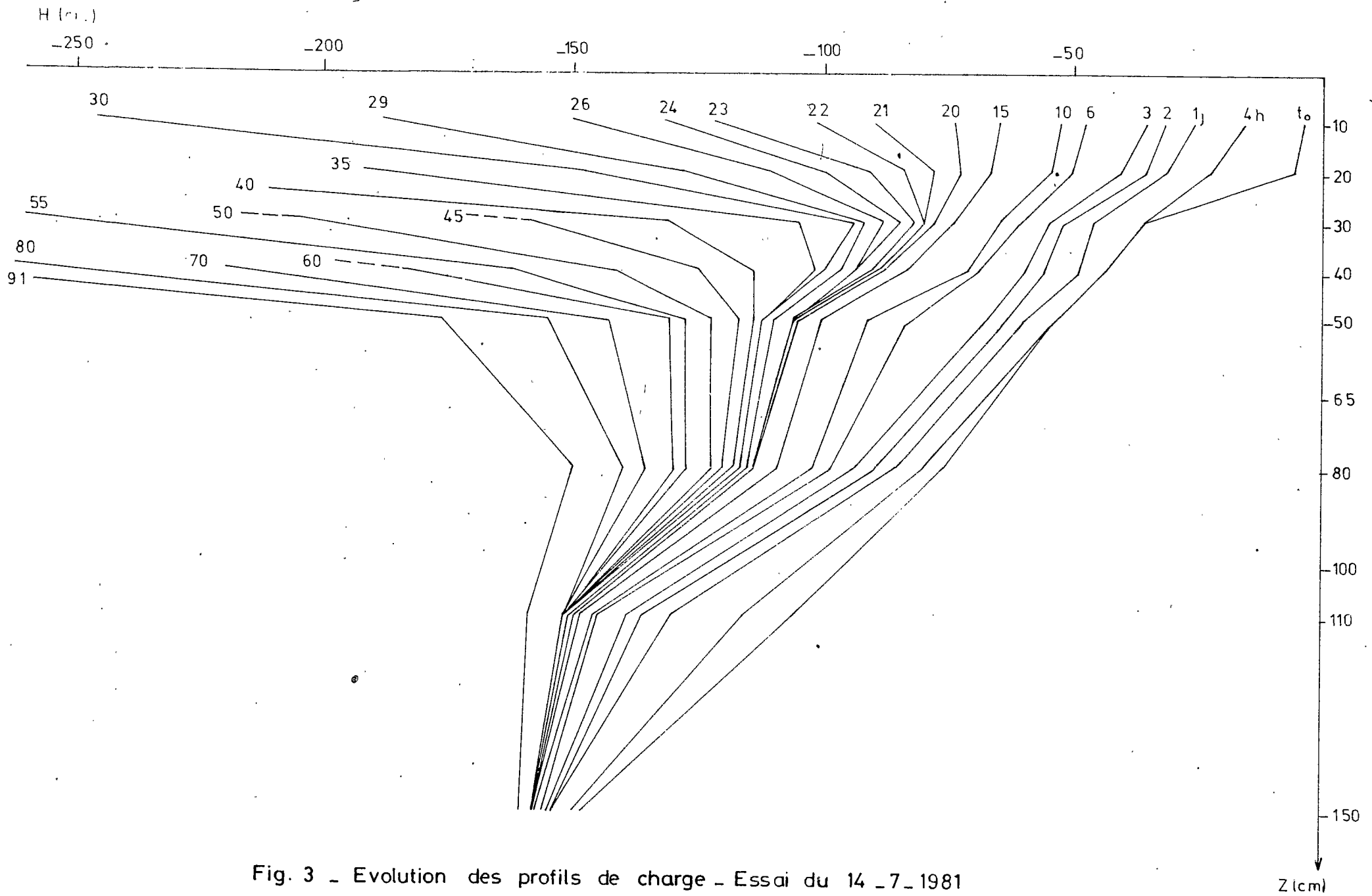


Fig. 3 - Evolution des profils de charge - Essai du 14_7_1981

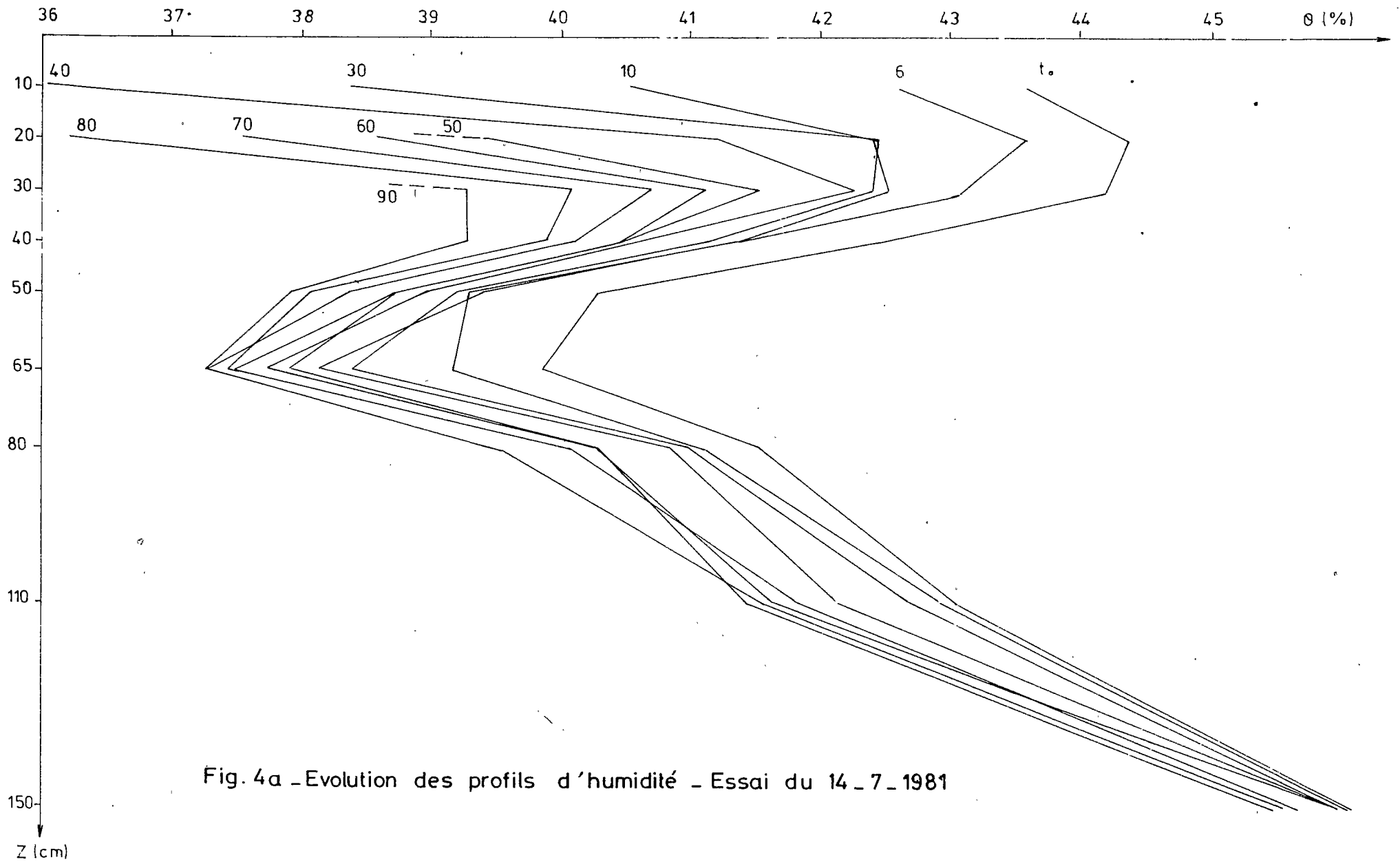


Fig. 4a - Evolution des profils d'humidité - Essai du 14_7_1981

I - DESCRIPTION DE L'ESSAI DU 14 JUILLET 1981

Partant d'un profil ressuyé après plusieurs mois d'évaporation, le monolithe a été porté à saturation très lentement à partir de la base ; ceci pour éviter la formation de bulles d'air emprisonnées.

Le 14 juillet 1981, le monolithe saturé, la surface du sol a été couverte et l'on a suivi pendant 20 jours la redistribution en drainage interne.

Puis le sol découvert, soumis ainsi à l'évaporation, on a pu observer pendant 70 jours le profil soumis au bilan naturel c'est-à-dire à la fois à des phénomènes de percolation et d'évaporation.

Pendant la phase de drainage interne, les mesures tensiométriques et neutroniques étaient effectuées deux fois par jour, pendant la phase du bilan naturel, une seule série de mesures quotidiennes a été faite.

Cet ensemble de mesures a permis un suivi assez précis de la redistribution d'eau dans le profil.

L'évolution des profils de charge et des profils d'humidité sont portés sur les figures 3 et 4.

A l'arrêt de l'irrigation, le profil de charge est voisin de la droite $H = -z$.

Pendant les 20 jours de drainage interne, le profil tend vers la droite $H = 150$ cm, en pivotant autour du point fixe ($H = 150$, $z = 150$). Dès que le monolithe est découvert, on observe un plan de flux nul qui s'enfonce progressivement jusqu'à 75 cm (fig. 5), l'évaporation n'affecte donc au maximum que les 75 premiers centimètres du sol.

Le plan de flux nul observé à 65 cm est dû à un mauvais fonctionnement d'un tensiomètre et ne correspond à aucune réalité physique.

Les profils d'humidité suivent une évolution identique, mais l'humidité à saturation de chaque tranche de sol est très variable.

La mesure d'humidité avec la sonde à neutrons se révèle beaucoup moins précise que les mesures tensiométriques. Ceci explique l'évolution moins régulière des profils d'humidité.

II - DESCRIPTION DE L'ESSAI DU 29 MARS 1982

Après une évaporation de deux mois, le monolithe a été irrigué avec des intensités très faibles pour mesurer la baisse des tensiomètres.

| | |
|------------|------------------|
| 0 → 5 h | $q_0 = 1,0$ mm/h |
| 5 h → 12 h | $q_0 = 2,0$ mm/h |

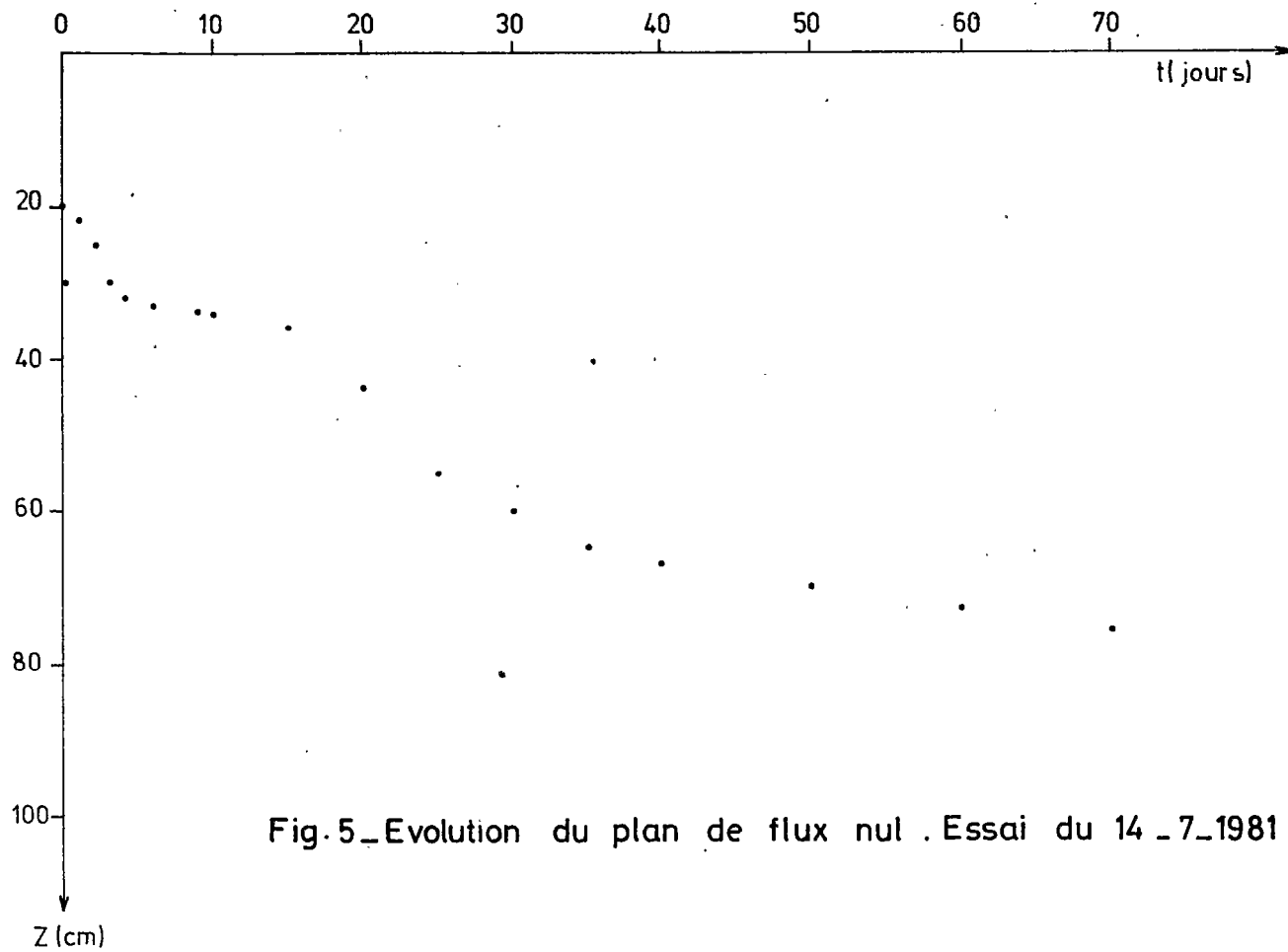


Fig. 5_Evolution du plan de flux nul . Essai du 14 _7_1981

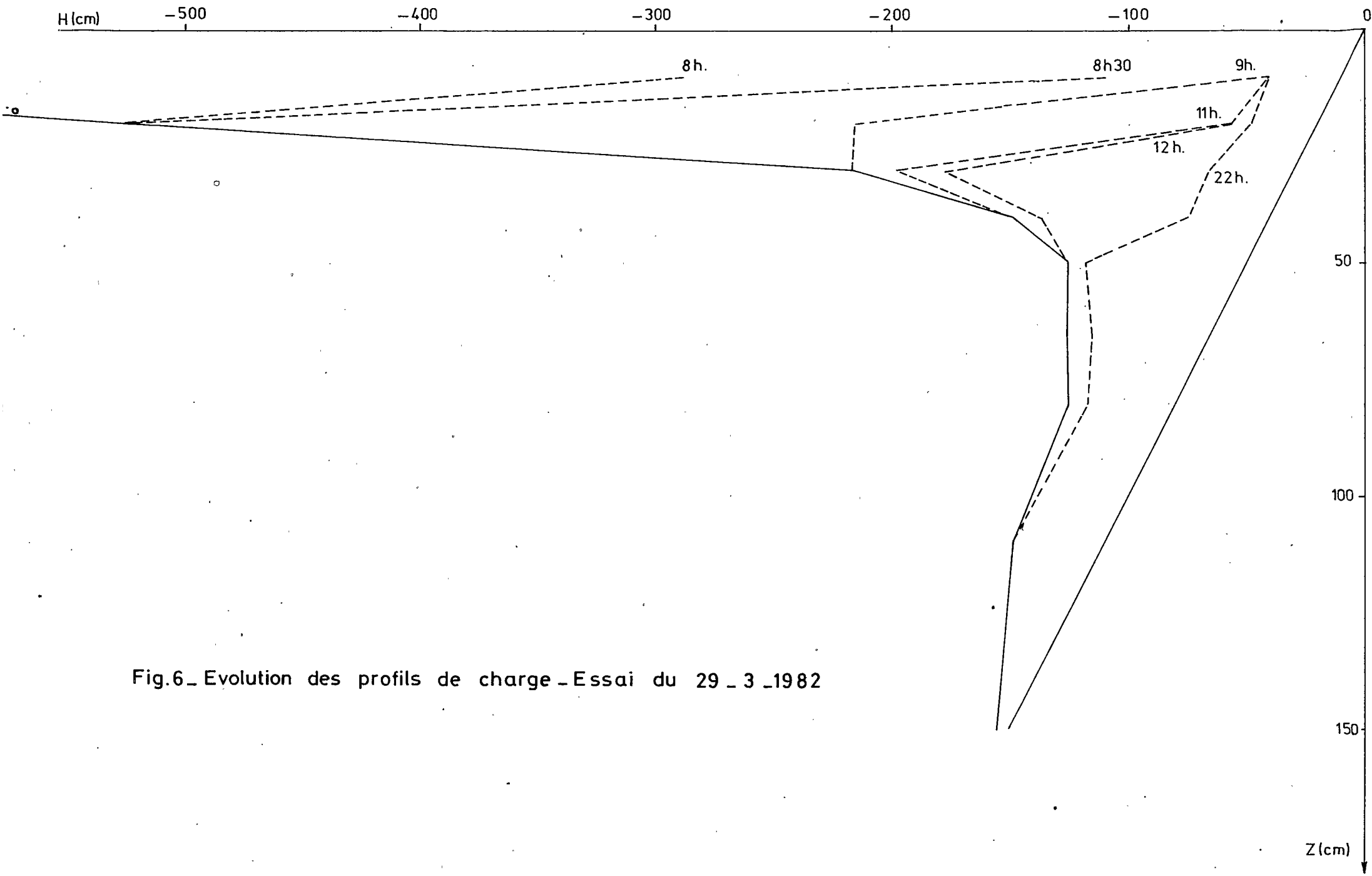


Fig.6_ Evolution des profils de charge -Essai du 29 _ 3 _1982

Le tensiomètre à 10 cm, a réagi après 6 heures d'irrigation. Nous avons pu mesurer $h(\theta)$ en infiltration pour 10 et 20 cm ; pour les autres profondeurs la chute des tensiomètres a été trop rapide. L'évolution des profils de charge est portée sur la figure 6.

III - DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES

1) Définition

On entend généralement par caractéristiques hydrodynamiques les fonctions succion $h(\theta)$ et perméabilité hydrique $K(\theta)$.

Ces fonctions sont définies par la loi de DARCY généralisée aux écoulements en régime non saturé (HILLEL, 1974).

$$q = -S \cdot K(\theta) \cdot \frac{\partial H}{\partial z}$$

avec

$$H = h(\theta) - z$$

q débit instantané en cm^3/s à la cote z

S section en cm^2

θ humidité volumique

$K(\theta)$ perméabilité hydrique en $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$

H charge hydraulique en cm d'eau

h succion en cm d'eau

z cote en cm

En régime non saturé, la succion et la perméabilité hydrique sont des fonctions de l'humidité.

2) Méthodes de calcul

a) Succion

Pour pallier à l'imprécision relative des mesures neutroniques en sol argileux, nous avons multiplié les mesures. Le nombre de couples (h, θ) a été ainsi suffisamment élevé pour établir une régression fiable de type $h = a (\theta_s - \theta)^b$ pour chaque niveau de tensiomètre.

Les points mesurés et les courbes ainsi calculées sont portées sur les figures suivantes.

Au-delà de $h = - 700$ cm, les tensiomètres ne fournissent aucune indication sur la succion. Cette valeur de h correspond à un $pF = \log-h$ de 2,8.

Nous avons comparé les relations $pF = f(\theta)$ déterminées à la station du Cherfech (UNESCO, 1970) et celles calculées sur le monolithe prélevé dans cette station sur la même parcelle. La figure 14 présente à titre d'exemple ces courbes pour $z = 10$ cm.

La similitude des deux courbes permet d'extrapoler la relation $pF = f(\theta)$ des divers horizons au-delà de $pF = 2,8$ et jusqu'à des valeurs de $pF = 4,2$.

Les valeurs mesurées en infiltration font apparaître une hystérésis faible (fig. 7 et 8).

Dans la suite des calculs, l'hystérésis est négligée, on utilise une seule fonction $h(\theta)$ pour l'infiltration et l'évaporation.

b) Perméabilité

Nous avons vu l'imprécision des mesures neutroniques en sol argileux (fig. 4) et la nécessité de lisser les valeurs d'humidité.

Aussi, nous proposons de tracer de nouveaux profils d'humidité à partir des profils de charge et des fonctions $h(\theta)$.

Fig.7 - Relation $h(\theta)$ pour la cote 10 cm

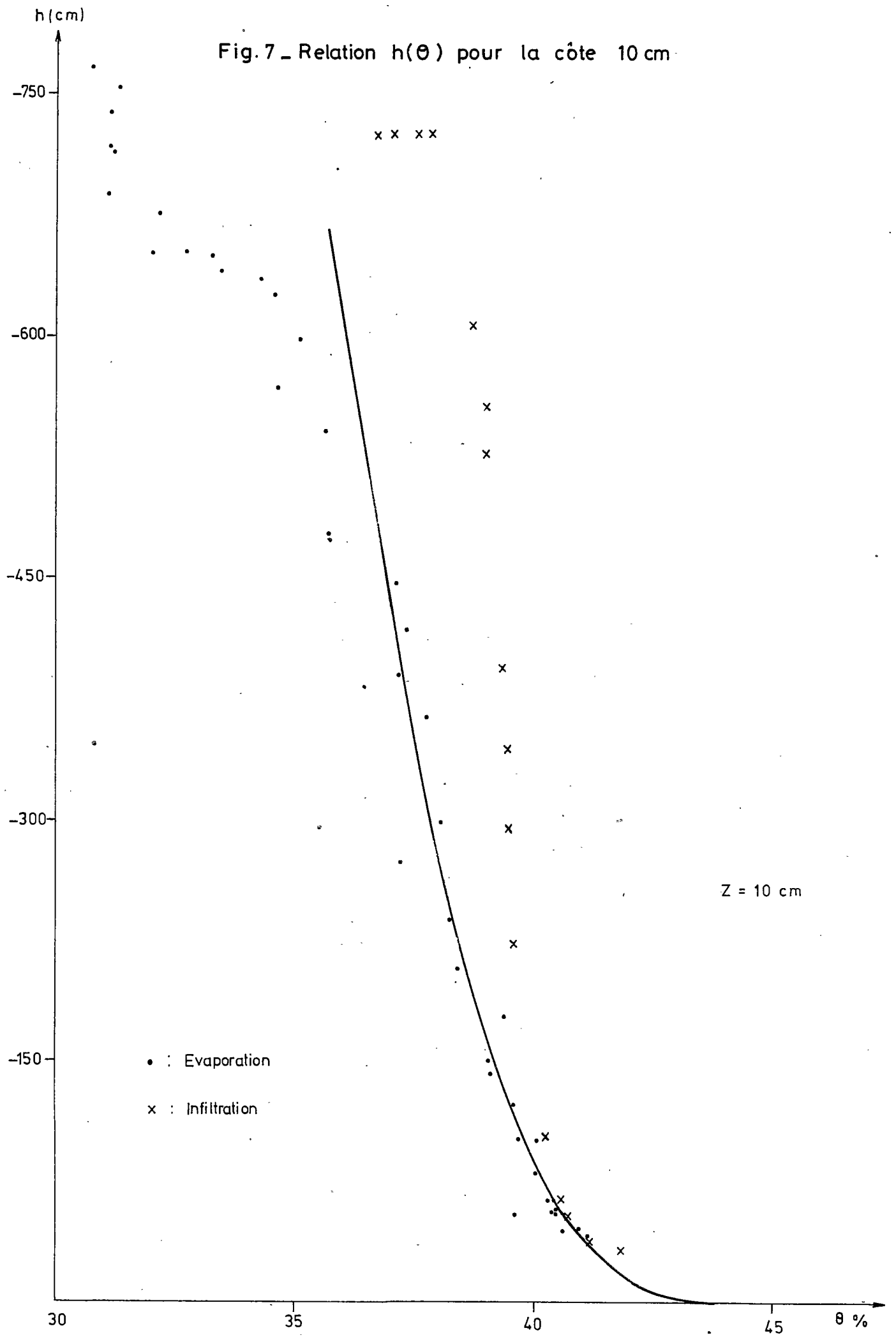


Fig.8_Relation $h(\theta)$ pour la cote 20 cm

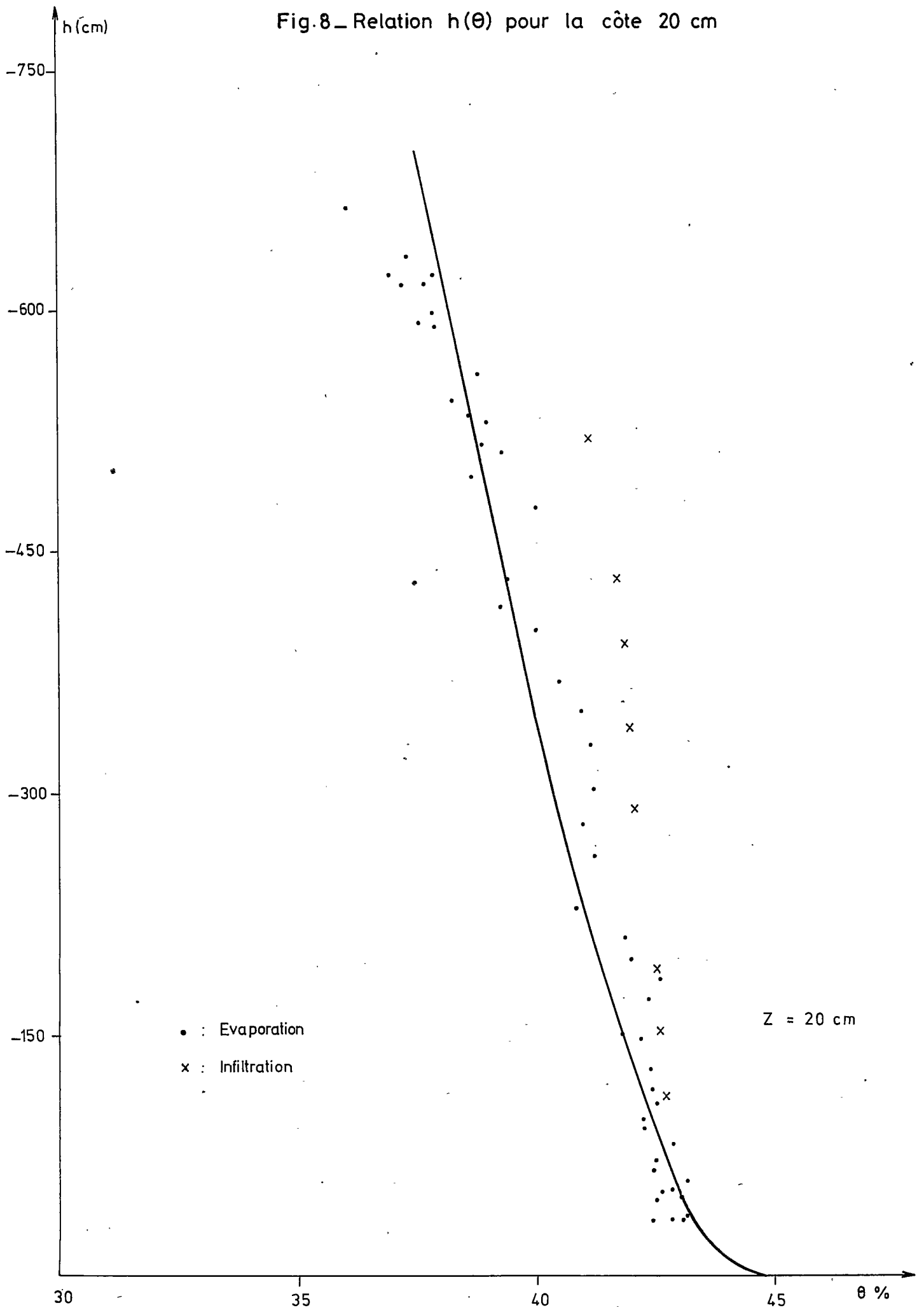


Fig. 9 _ Relation $h(\theta)$ pour la cote 30 cm

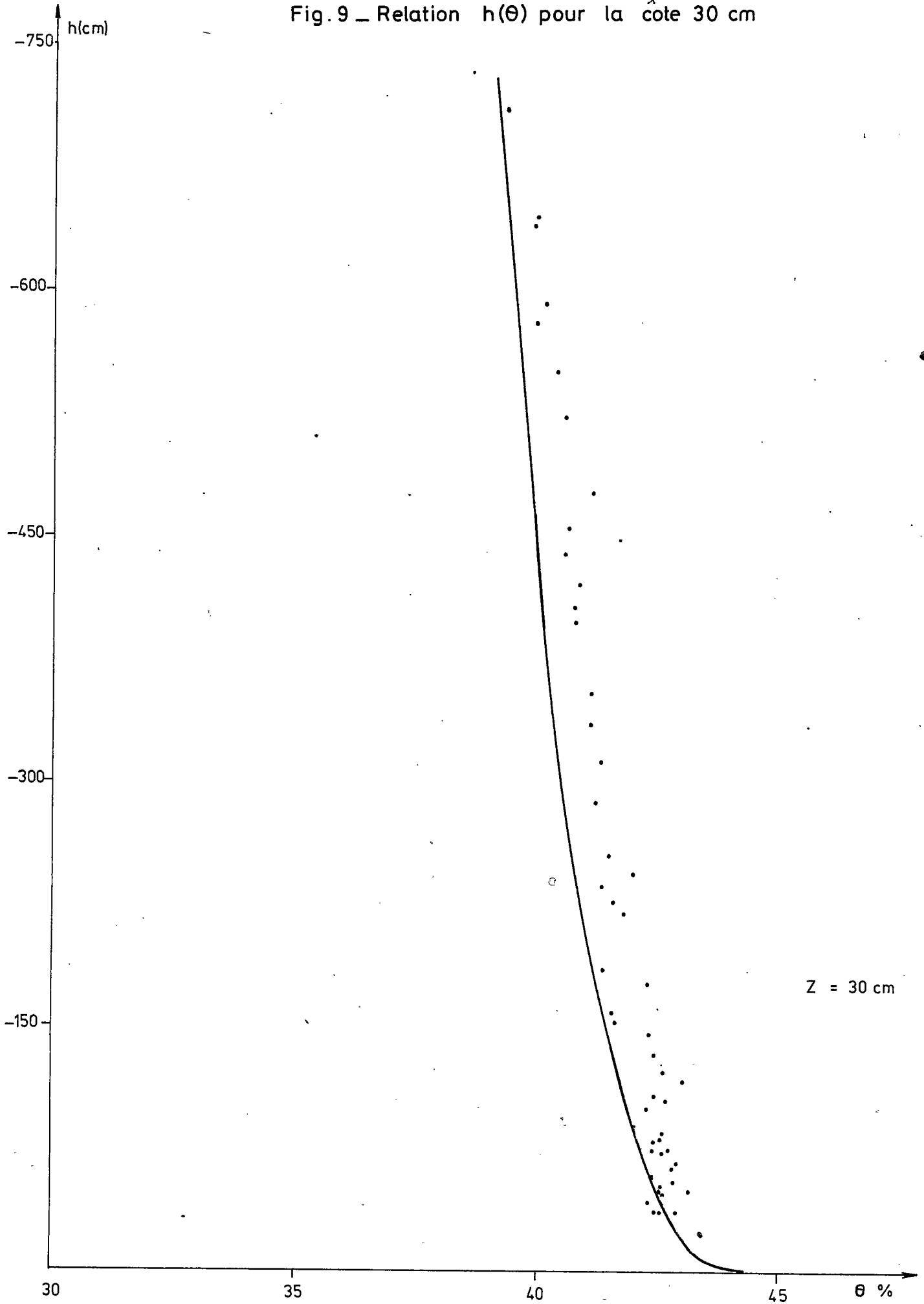


Fig. 10 - Relation $h(\theta)$ pour la cote 40 cm

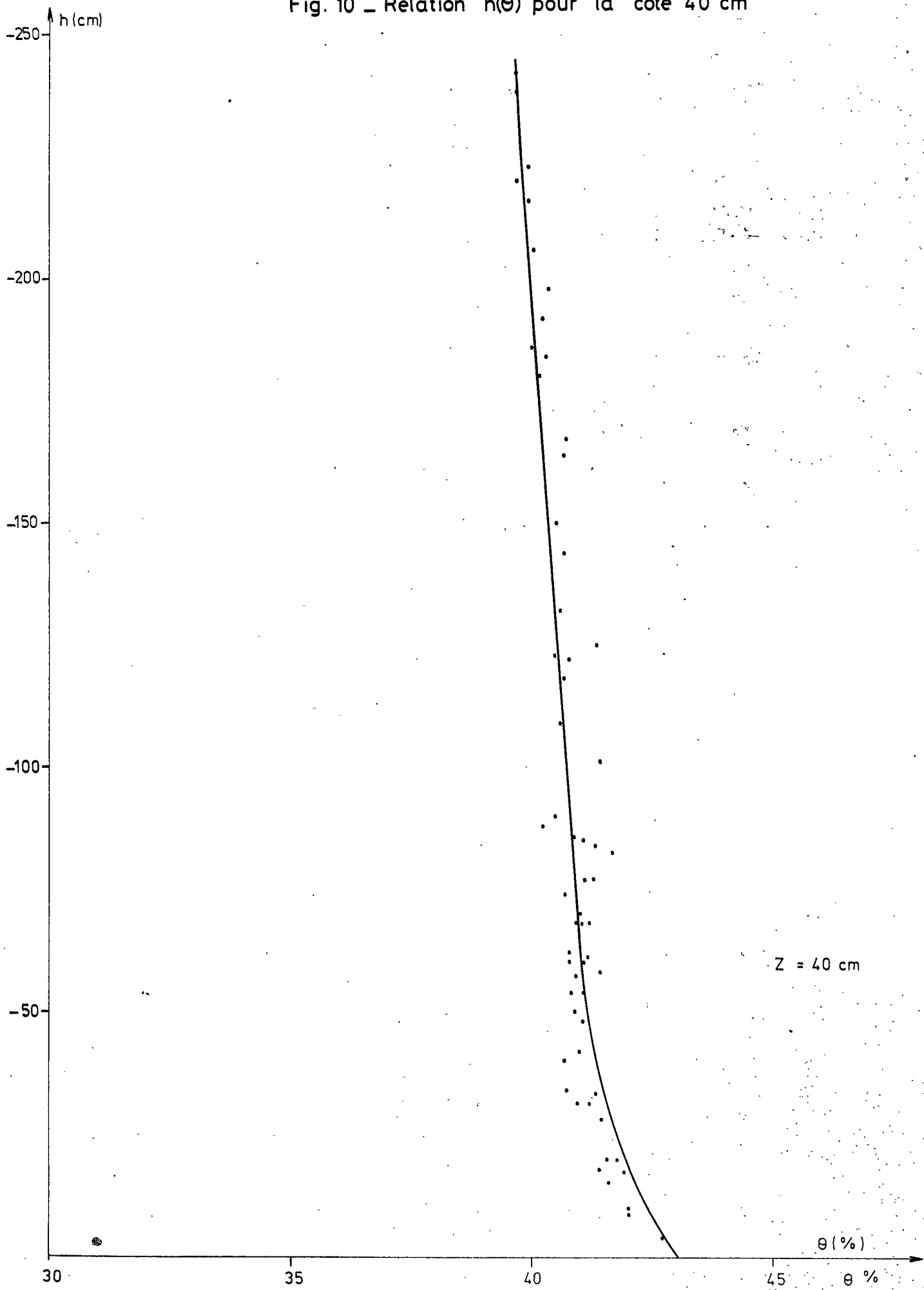
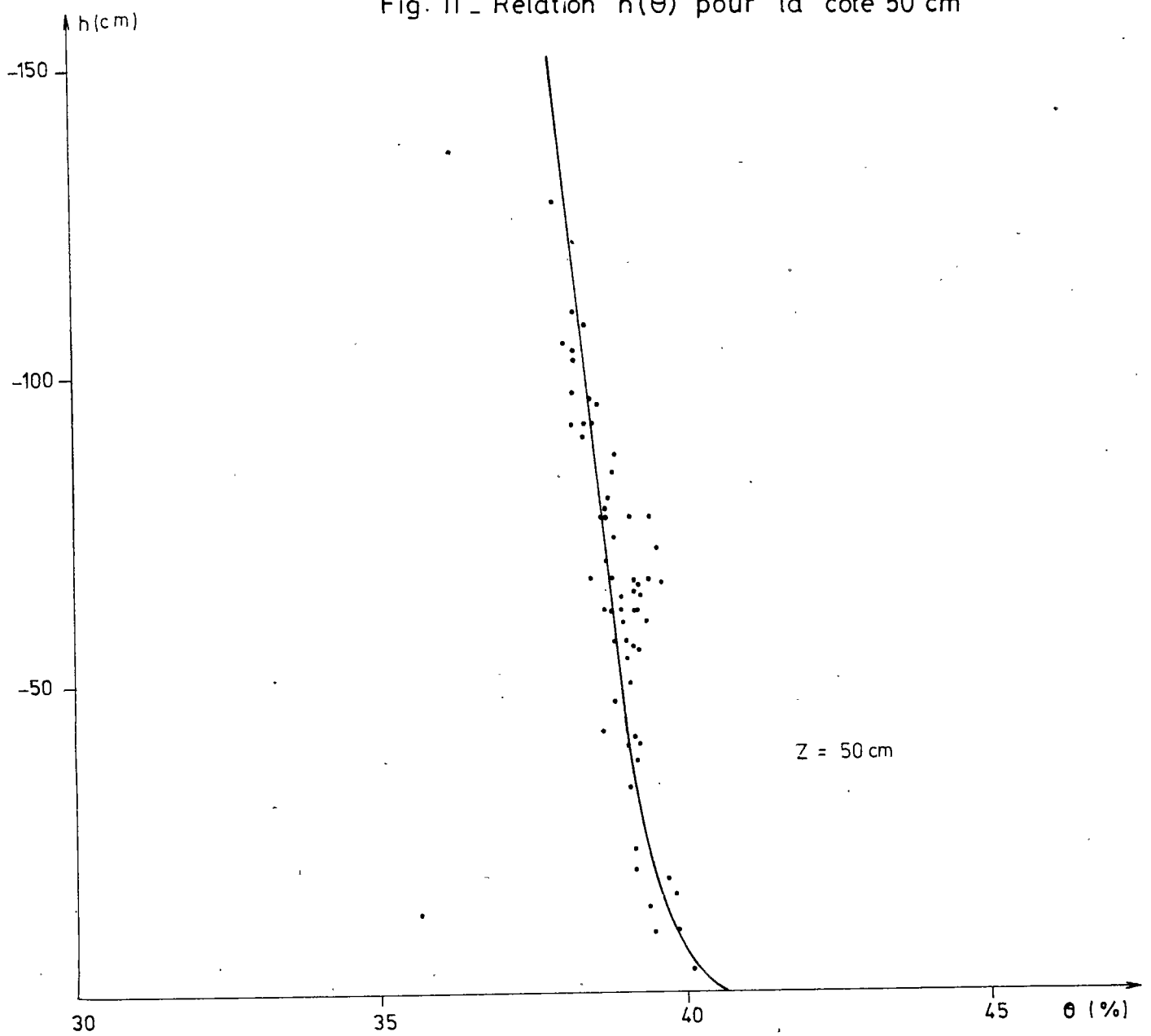


Fig. 11 - Relation $h(\theta)$ pour la côte 50 cm



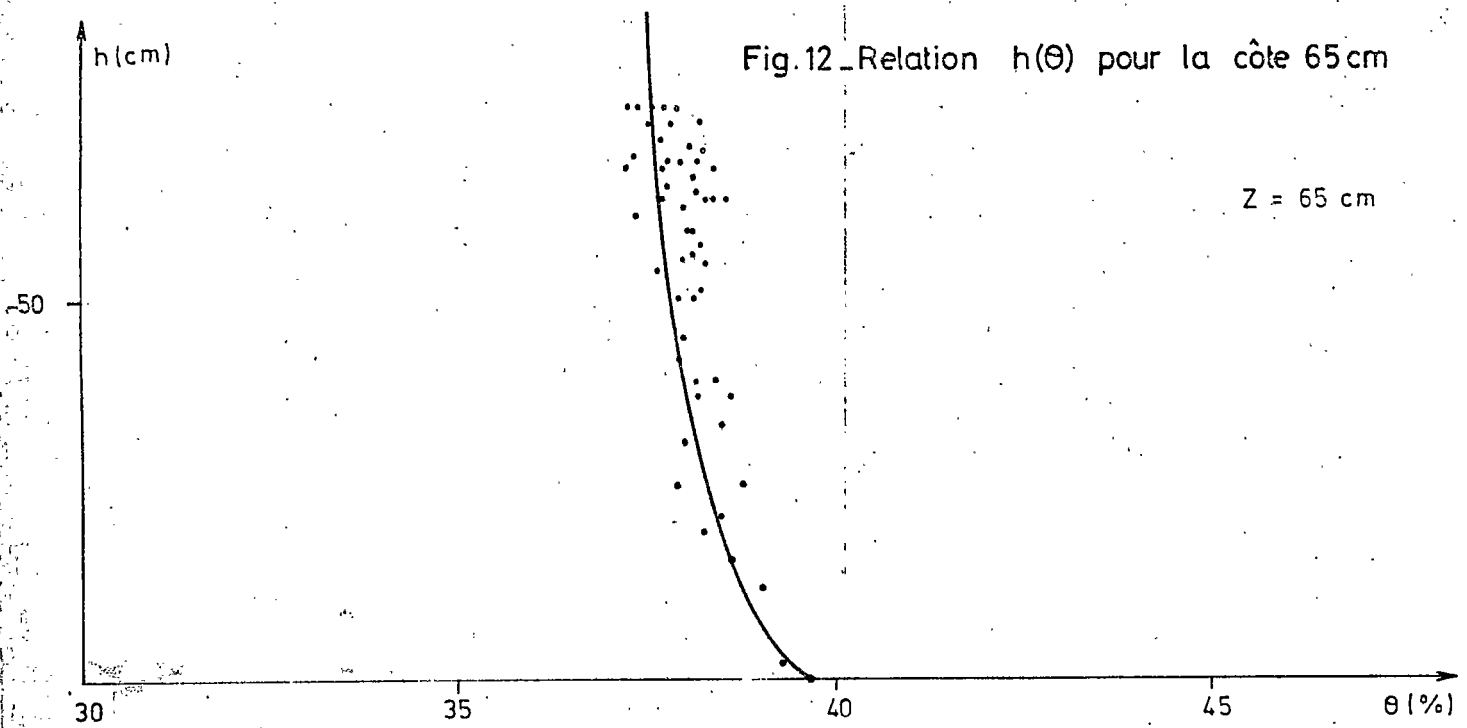


Fig. 13 - Relation $h(\theta)$ pour la côte 80 cm

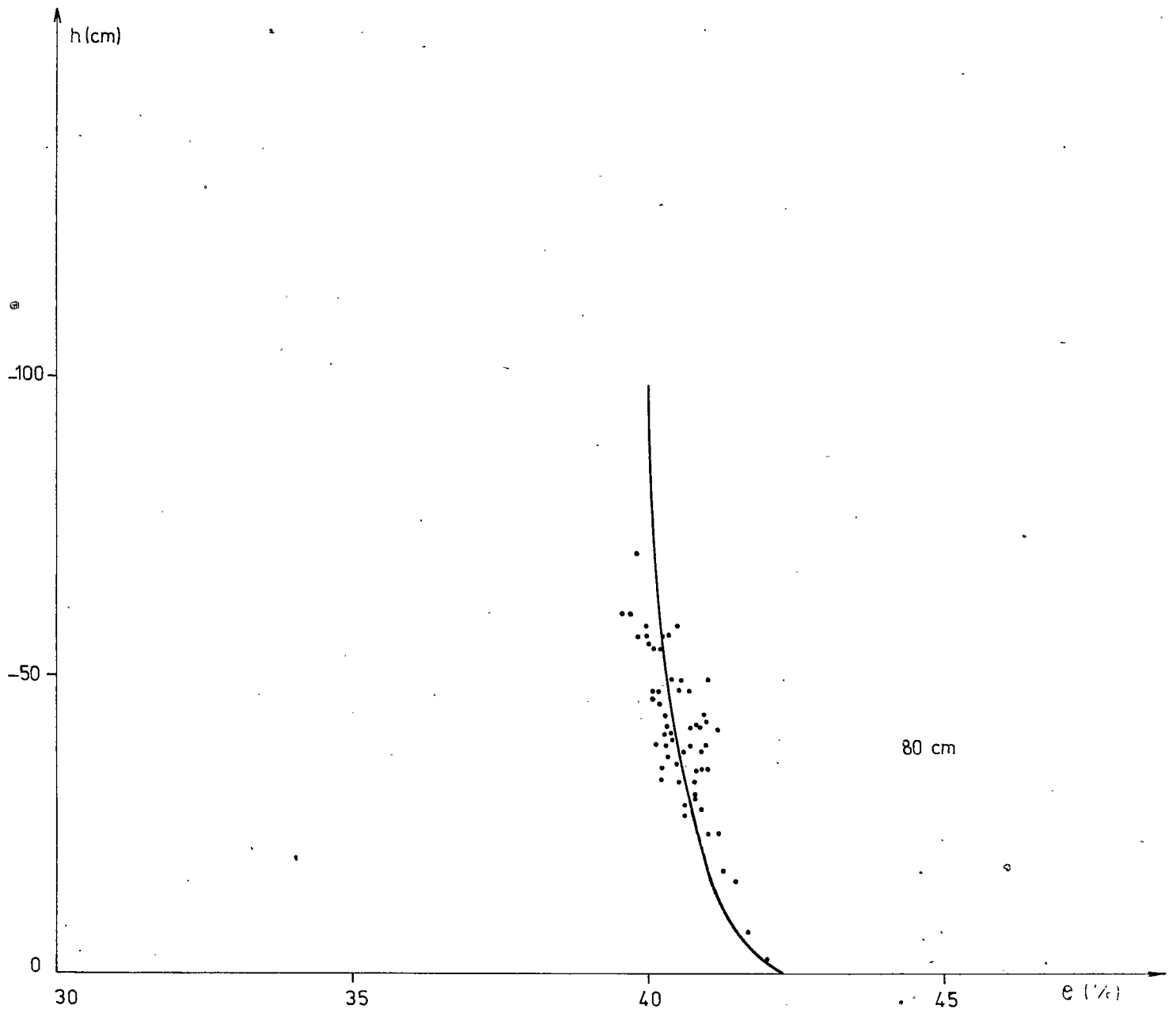
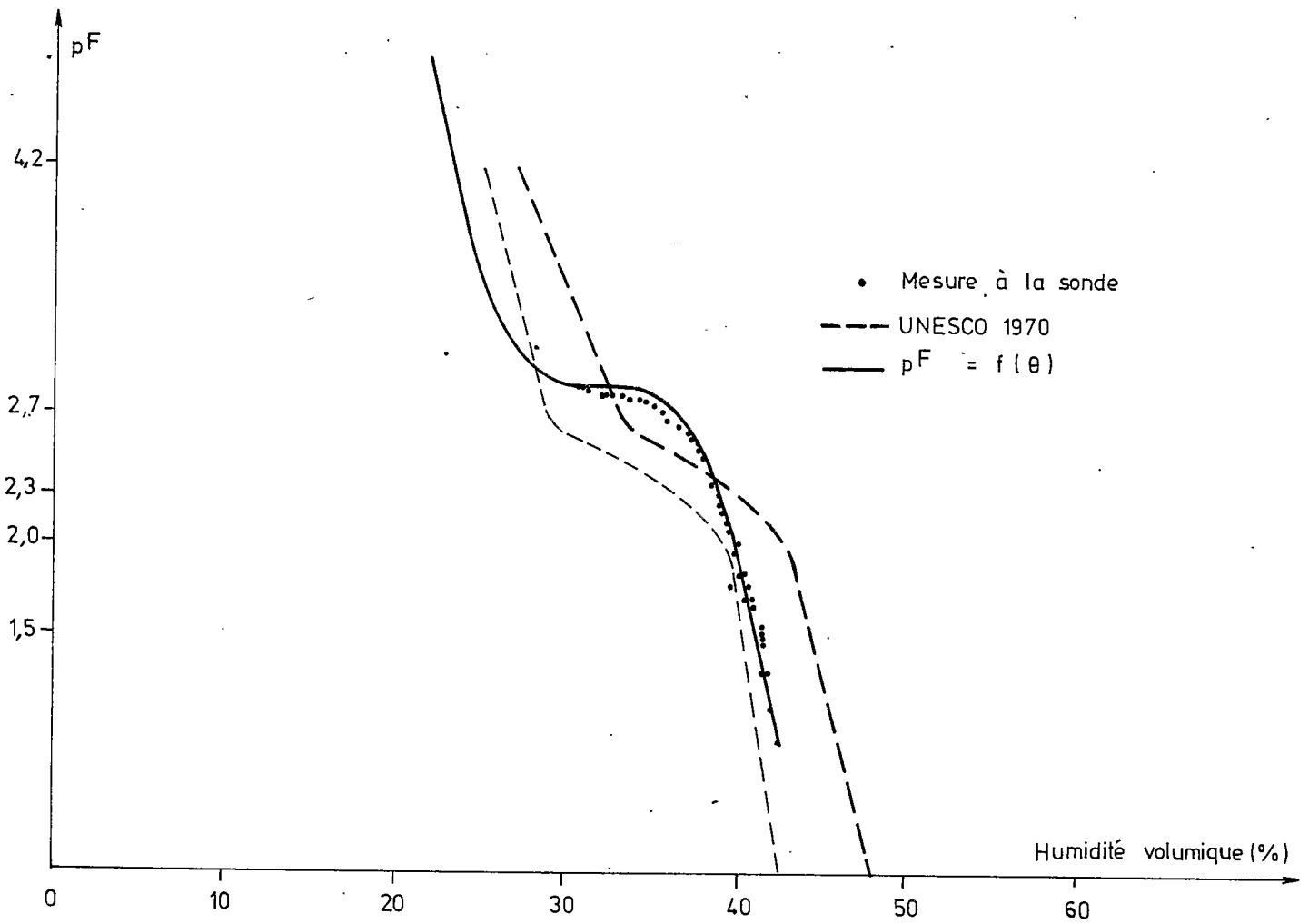


Fig.14 - Courbes de pF pour la côte 10 cm



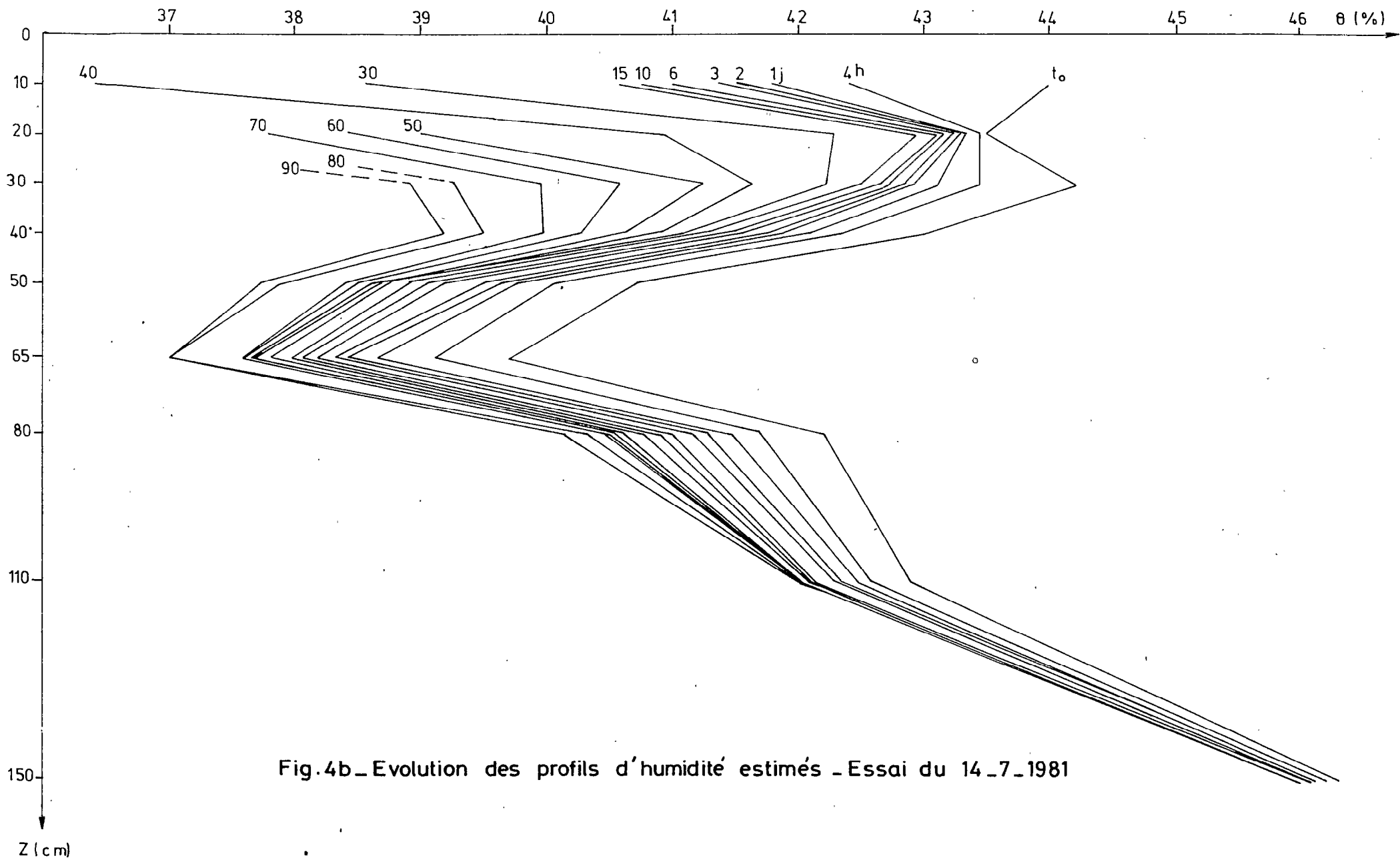


Fig.4b - Evolution des profils d'humidité estimés - Essai du 14_7_1981

L'évolution de ces nouveaux profils d'humidité apparaît comme beaucoup plus régulière (fig. 4b).

Tous les calculs qui suivent sont exécutés avec ces valeurs d'humidité estimées à partir des mesures tensiométriques et des fonctions $h(\theta)$.

Le calcul de la perméabilité s'effectue d'après les méthodes du plan de flux nul et du drainage interne (VACHAUD et al., 1978).

METHODE DU DRAINAGE INTERNE
.....

Pour chaque cote z , on calcule à l'instant t , le stock d'eau S , compris entre la surface et cette cote.

$$S = \int_{x=0}^{x=z} \theta_x dx$$

La variation de stock entre les instants t_1 et t_2 permet de calculer le flux moyen traversant la cote z pendant l'intervalle de temps $t_2 - t_1$.

$$q = \frac{S_2 - S_1}{t_2 - t_1}$$

avec S_2 et S_1 stocks aux instants t_1 et t_2 . La valeur dH/dz est évaluée à la cote z à l'aide du profil tensiométrique pendant l'intervalle de temps $t_2 - t_1$, la valeur moyenne $\overline{dH/dz}$ est obtenue par la formule

$$\overline{dH/dz} = \frac{dH/dz_{t_1} + dH/dz_{t_2}}{2}$$

La perméabilité se déduit alors de la loi de Darcy généralisée.

$$K = \frac{q}{dH/dz}$$

Cette valeur de la perméabilité à la cote z correspond à une humidité θ estimée à

$$\theta_z = \frac{\theta_{zt_1} + \theta_{zt_2}}{2}$$

| DATE | θ_{t1} (%) | θ_{t2} (%) | $\bar{\theta}$ (%) | Z_0 cm | S_{t1} cm | S_{t2} cm | ΔS cm | (1) $q = \frac{\Delta S}{\Delta t}$ cm/d | $dH/d2t2$ | $dH/d2$ | (2) dH/dz | K : (1)/(2) cm/jour |
|-------------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-------------|----------------|----------------|------------------|--|-----------|---------|----------------|------------------------|
| <u>Drainage interne</u> | | | | | | | | | | | | |
| 14 juil. - 15 juil. | 43,46 | 43,35 | 42,41 | | 8,538 | 8,435 | 0,1030 | 0,1498 | 1,00 | 0,95 | 0,975 | 0,1537 |
| 15 " - 16 " | 43,35 | 43,30 | 43,33 | | 8,435 | 8,393 | 0,0415 | 0,0407 | 0,95 | 1,00 | 0,975 | 0,0417 |
| 16 " - 17 " | 43,30 | 43,25 | 43,28 | | 8,393 | 8,368 | 0,0250 | 0,0255 | 1,00 | 0,95 | 0,975 | 0,0262 |
| 17 " - 18 " | 43,25 | 43,24 | 43,25 | | 8,368 | 8,348 | 0,0200 | 0,0152 | 0,95 | 0,80 | 0,875 | 0,0174 |
| 20 " - 21 " | 43,14 | 43,11 | 43,13 | | 8,307 | 8,298 | 0,0090 | 0,0080 | 0,65 | 0,77 | 0,675 | 0,0118 |
| 21 " - 23 " | 43,11 | 43,10 | 43,11 | | 8,298 | 8,288 | 0,0095 | 0,0051 | 0,70 | 0,65 | 0,675 | 0,0075 |
| 27 " - 29 " | 42,99 | 42,96 | 42,98 | | 8,241 | 8,237 | 0,0045 | 0,0026 | 0,40 | 0,45 | 0,425 | 0,0051 |
| <u>Bilan naturel</u> | | | | | | | | | | | | |
| 5 Août - 6 " | 42,86 | 42,79 | 42,83 | 23,5 | 1,500 | 1,497 | 0,0025 | 0,0025 | 0,50 | 1,10 | 0,800 | 0,0031 |
| 6 " - 7 " | 42,79 | 42,72 | 42,76 | 27,5 | 3,200 | 3,196 | 0,0043 | 0,0043 | 1,10 | 2,00 | 1,550 | 0,0027 |
| 7 " - 8 " | 42,72 | 42,63 | 42,68 | 30,5 | 4,466 | 4,461 | 0,0051 | 0,0051 | 2,00 | 2,35 | 2,175 | 0,0023 |
| 8 " - 10 " | 42,63 | 42,52 | 42,58 | 31,5 | 4,884 | 4,876 | 0,0081 | 0,0041 | 2,35 | 3,10 | 2,725 | 0,0013 |
| 14 " - 18 " | 42,16 | 41,74 | 41,95 | 35,0 | 6,329 | 6,297 | 0,0320 | 0,0080 | 7,60 | 13,40 | 10,500 | 0,00076 |
| 18 " - 24 " | 41,74 | 40,92 | 41,33 | 40,0 | 8,350 | 8,275 | 0,0755 | 0,0125 | 13,40 | 20,95 | 17,175 | 0,00073 |
| 24 " - 29 " | 40,92 | 39,95 | 40,44 | 49,5 | 12,063 | 11,976 | 0,0873 | 0,0175 | 20,95 | 24,55 | 22,750 | 0,00076 |
| 29 " - 4 Sept. | 39,95 | 39,00 | 39,48 | 57,5 | 15,046 | 14,941 | 0,1048 | 0,0175 | 24,55 | 24,00 | 24,275 | 0,00072 |
| 4 Sept. - 9 Sept. | 39,00 | 38,54 | 38,77 | 62,5 | 16,823 | 16,737 | 0,0873 | 0,0175 | 24,00 | 24,10 | 24,050 | 0,00072 |

Tableau 2 : Calcul de la perméabilité à la cote 20 cm

| Pro- fondeur - cm | s % | Fonction h(θ) | | Fonction K(θ) | | | |
|-------------------------|--------|------------------------|--------|------------------------|-----------|-------|----------|
| | | a | b | a1 | b1 | a2 | b2 |
| 10 | 44,00 | 2,858 | 1,646 | 1,053 | - 45,386 | 0,244 | - 11,868 |
| 20 | 44,60 | 1,740 | 23,581 | 2,096 | - 92,225 | 0,006 | - 3,378 |
| 30 | 44,20 | 2,470 | 12,000 | 2,651 | - 115,279 | 0,015 | - 3,976 |
| 40 | 43,00 | 2,470 | 12,000 | 2,156 | - 91,551 | 0,772 | - 34,534 |
| 50 | 40,70 | 2,470 | 12,000 | 1,829 | - 73,481 | 0,0 | - 3,699 |
| 65 | 39,80 | 2,470 | 12,00 | 1,132 | - 44,519 | 0,0 | - 3,699 |
| 80 | 42,20 | 2,470 | 12,000 | 1,513 | - 63,634 | 0,0 | - 3,777 |
| 110 | 43,70 | 2,470 | 12,000 | 2,322 | - 99,209 | 0,0 | - 3,301 |
| 145 | 47,00 | 2,470 | 12,000 | 4,743 | - 219,124 | 0,0 | - 2,000 |

Tableau 3 : Humidité à saturation, coefficients des fonctions h(θ), K(θ) pour différentes profondeurs.

METHODE DU PLAN DE FLUX NUL
.....

Le principe de la méthode est identique, seul diffère le calcul des stocks d'eau.

Comme il y a évaporation dans la partie supérieure, on ne peut pas utiliser le stock d'eau entre la surface et la cote z ; on considère donc le stock d'eau compris entre la cote z et la cote moyenne du plan de flux nul \bar{z}_0

$$\bar{z}_0 = \frac{z_{ot1} + z_{ot2}}{2}$$

$$S = \int_{x=z}^{x=\bar{z}_0} \theta_x dx$$

La suite du calcul est identique.

La perméabilité a été calculée pour les cotes où sont installés les tensiomètres.

Nous donnons à titre d'exemple les calculs intermédiaires pour la cote $z = 20$ cm (tableau 2).

Les valeurs de la perméabilité pour chaque profondeur sont portées sur la figure 15

Toutes les courbes de perméabilité montrent une variation exponentielle en fonction de l'humidité. La variation est très marquée jusqu'en un point anguleux à partir duquel la perméabilité varie peu.

En coordonnées semi-logarithmiques, ceci se traduit par des paires de droites. Nous avons déterminé les coefficients de ces droites, ils varient régulièrement avec la profondeur et sont fortement corrélés avec l'humidité à saturation de l'horizon considéré (fig. 16).

Fig. 15 - Variation de la permeabilité en fonction de l'humidité pour différentes profondeurs

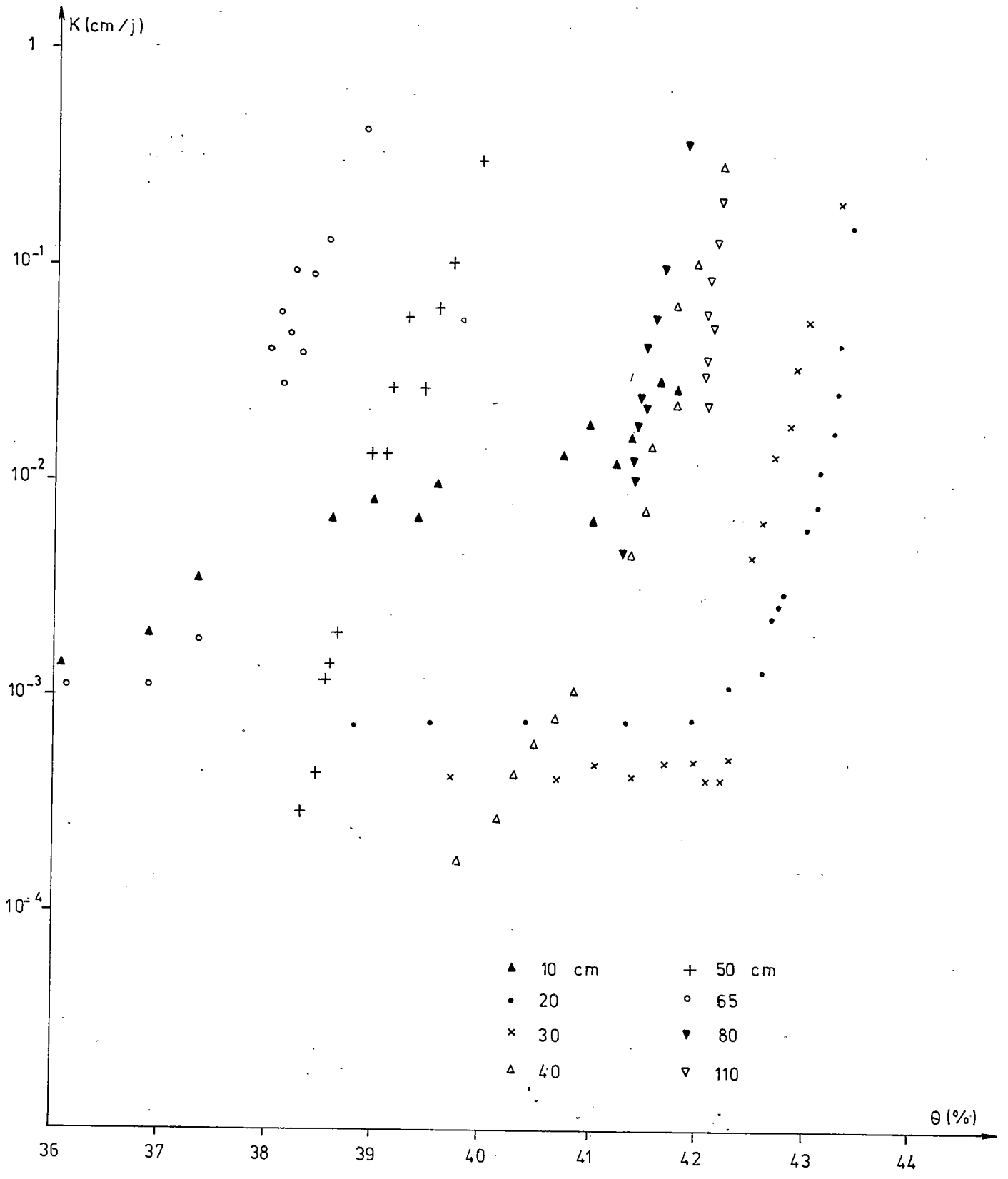


Fig. 15 - VARIATION DE LA PERMEABILITE EN FONCTION DE L HUMIDITE POUR DIFFERENTES PROFONDEURS

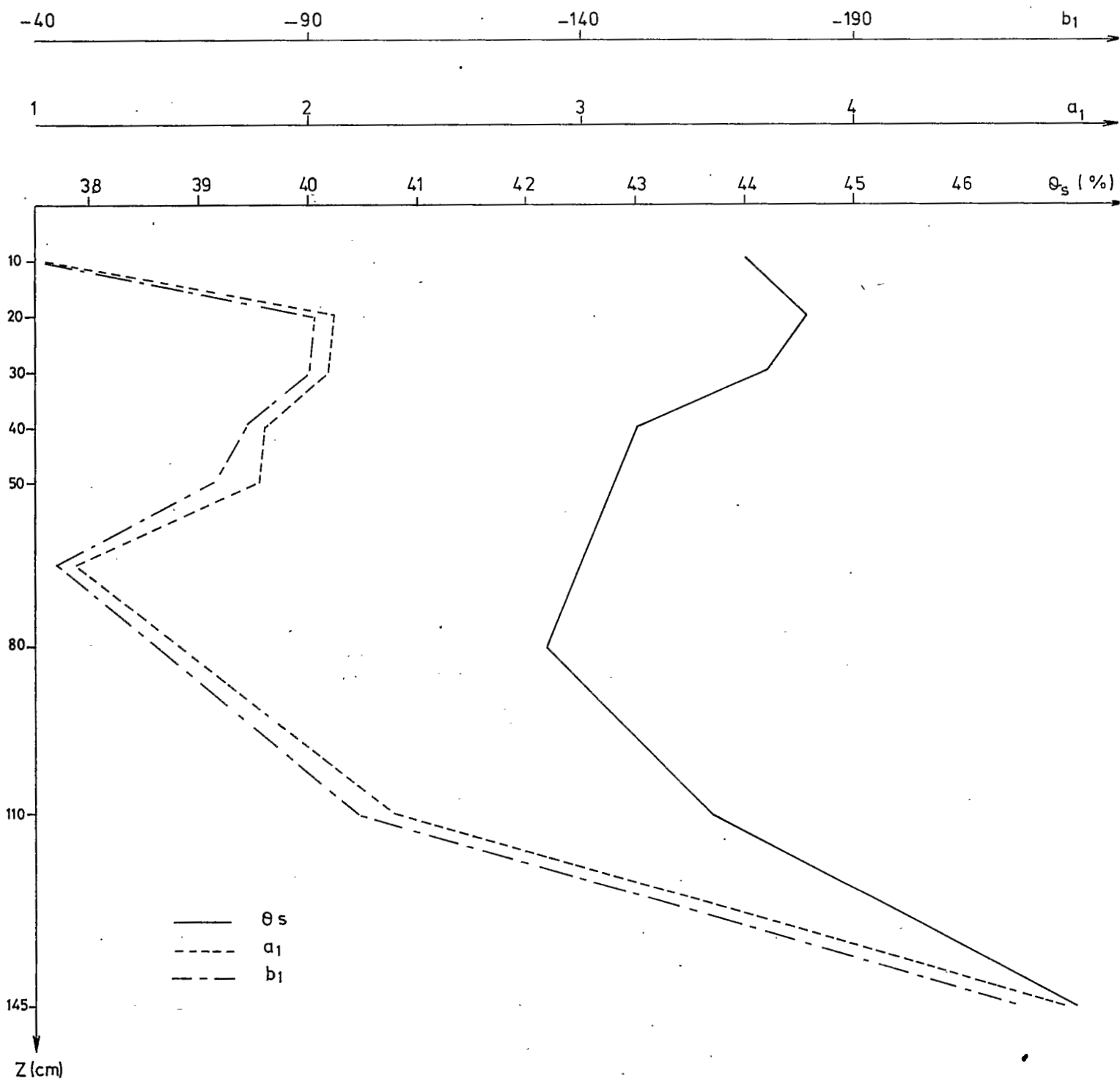


Fig. 16 - Humidités à saturation et coefficients de régression de la perméabilité pour différentes côtes

La présence d'un point anguleux met en évidence pour chaque niveau l'existence de deux types d'eau. Une eau correspondant aux faibles humidités, s'écoulant lentement et des eaux s'écoulant rapidement pour des humidités voisines de la saturation.

On remarque que les droites $\log k = f(\theta)$ sont bien définies, la dispersion des points est faible. La variation régulière des humidités estimées par les fonctions $h(\theta)$ semble avoir bien réduit l'imprécision dans le calcul des perméabilités.

CHAPITRE III

MODELISATION DES TRANSFERTS D'EAU

I - EQUATIONS REGISSANT LE TRANSFERT

Avec les hypothèses d'un transfert isotherme, d'eau pure, incompressible dans un milieu rigide (pas de gonflement des argiles) on peut écrire les équations suivantes :

- conservation de la masse d'eau

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial q}{\partial z} \quad (1)$$

θ humidité volumique cm/cm

t temps s

q flux cm/s

z cote cm

- équation de DARCY étendue au régime non saturé

$$q = - K(\theta) \frac{\partial H}{\partial z} \quad (2)$$

et

$$H = h(\theta) - z \quad (3)$$

La combinaison de ces 3 équations nous donne l'équation de RICHARDS

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) \right] \quad (4)$$

en posant $C(h) = \frac{d\theta}{dh}$

K est une fonction de l'humidité, et donc de la pression capillaire.

II - RESOLUTION

Nous avons choisi un schéma de discrétisation de l'équation (4) en différences finies implicite, conservatif qui à l'avantage d'être peu coûteux (VAUCLIN et al., 1978)

$$C_i^j \frac{h_i^{j+1} - h_i^j}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta z} \left[K_{i+1/2}^j \left(\frac{h_{i+1}^{j+1} - h_i^{j+1}}{\Delta z} - 1 \right) - K_{i-1/2}^j \left(\frac{h_i^{j+1} - h_{i-1}^{j+1}}{\Delta z} - 1 \right) \right] \quad (5)$$

avec

$$K_{i\pm 1/2}^j = \sqrt{K_i \cdot K_{i\pm 1}} \quad (6)$$

Le système d'équation (5) et (6) est résolu en utilisant l'algorithme de THOMAS.

Nous avons choisi des conditions aux limites adaptées au cas étudiés, c'est-à-dire

- une humidité constante à la base
- un flux imposé à la surface.

On peut donc écrire

$$\theta_n^j = \text{cte} \text{ soit } h_n^j = \text{cte} \quad (7)$$

En régime d'irrigation le flux en surface est déterminé par le débit de l'irrigation, en drainage interne le flux est nul, en régime d'évaporation le flux en surface est une fonction de l'humidité en surface ou du temps.

En résumé :

| | | | |
|-------------|----------|-----|---------------|
| irrigation | q_0 | $=$ | q_i |
| drainage | q_0 | $=$ | 0 |
| évaporation | $q_0(t)$ | $=$ | $f(\theta_0)$ |

CHAPITRE IV

RESULTATS DE LA SIMULATION

I - SIMULATION DE L'ESSAI DU 14 JUILLET 1981

1) Les paramètres

L'essai du 14 juillet 1981, qui a duré 90 jours est simulé en utilisant un pas de temps $\Delta t = 1$ heure, et un pas d'espace $\Delta z = 2$ cm.

Les paramètres nécessaires à la simulation ont été déterminés lors de cet essai.

- les fonctions $h(\theta)$ et $K(\theta)$ calculées à une cote z , sont affectées à une tranche de sol entourant cette cote. Par exemple de 14 cm à 24 cm les fonctions sont celles déterminées à 20 cm.
- l'humidité à saturation est intrapolée linéairement pour chaque couche de 2cm.
- le fond du monolithe reste à saturation durant tout l'essai $h(n) = 0$.
- les flux en surface ont été mesurés dans un bac au cours de l'essai.

0 - 20 jours $q_0 = 0$ (drainage interne)

20 - 30 jours $q_0 = 0,002$ cm/h

30 - 90 jours $q_0 = 0,0011$ cm/h.

L'expérience ayant lieu dans un local peu aéré, les valeurs du flux d'évaporation en surface sont assez faibles par rapport à l'évapotranspiration mesurée dans la région.

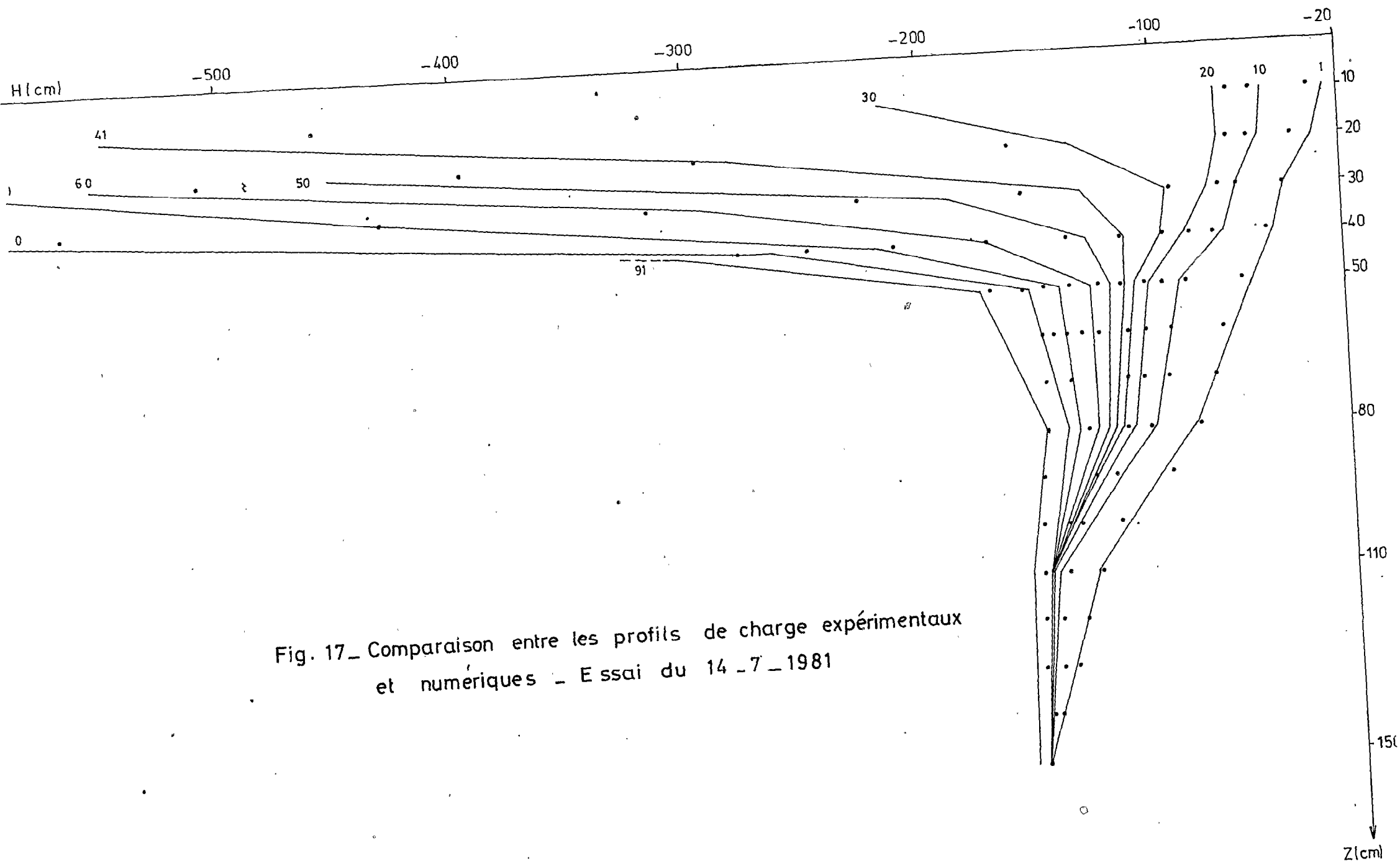
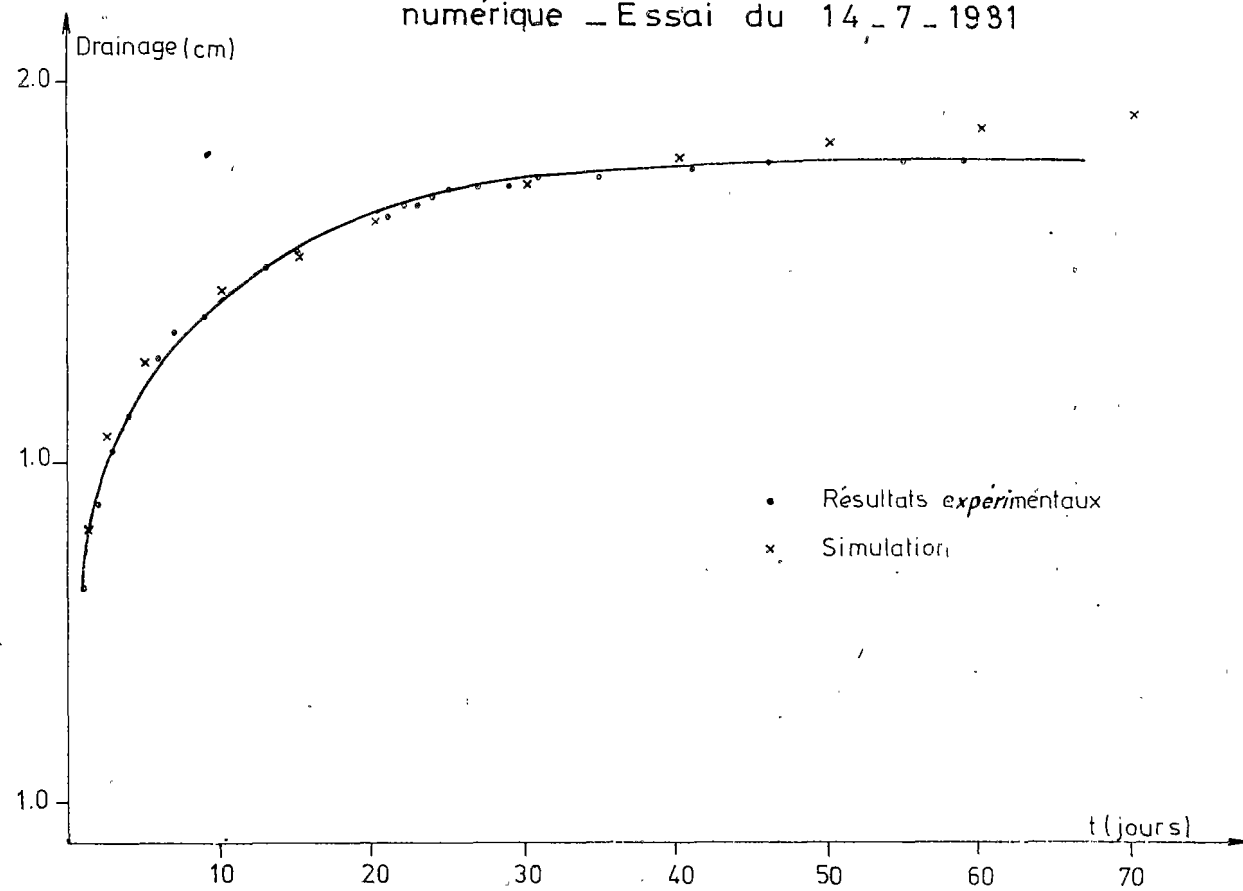


Fig. 17_ Comparaison entre les profils de charge expérimentaux et numériques - Essai du 14_7_1981

Fig.18_ Comparaison entre drainage expérimental et numérique _Essai du 14_7_1981



2) Résultats

L'évolution des profils de charge expérimentaux et numériques est portée sur la figure 17.

On observe un bon accord entre résultats expérimentaux et numériques. La simulation fournit l'allure des profils de charge de manière correcte.

Les écarts entre mesures et résultats numériques sont de l'ordre de 10 cm d'eau pour la charge hydraulique ; ce qui correspond à une imprécision relative pour l'humidité inférieure à 0,01 %.

Pour les fortes valeurs de h , l'écart est plus important. Ceci est lié à l'imprécision des relations $h(\theta)$ et à l'extrapolation de ces fonctions au-delà de $h = -700$ cm (limite d'entrée de l'air dans les tensiomètres utilisés).

Les volumes drainés calculés et mesurés sont portés sur la figure 18. On observe un bon accord entre les deux courbes de drainage tout au long de l'expérience.

A partir du 60ème jour, la simulation surestime légèrement le volume drainé par rapport aux mesures. L'écart est de l'ordre de grandeur de l'imprécision de la mesure liée à la présence du lit de gravier à la base du monolithe.

II - SIMULATION DE L'ESSAI DU 29 MARS 1982

1) Les paramètres

L'étude des fonctions hydrodynamiques en infiltration et en ressuyage montre que seule la relation $h = f(\theta)$ présente une hystérésis en sol argileux. La perméabilité est identique en phase d'humectation ou d'assèchement. Le dépouillement des résultats expérimentaux obtenus sur le monolithe ne donne qu'une hystérésis assez faible pour les courbes de succion.

Pour la simulation de l'infiltration d'eau dans le monolithe, on utilise donc des fonction hydrodynamiques identiques à celles utilisées pour le ressuyage, ce qui revient à négliger l'hystérésis.

Le pas d'espace $\Delta z = 2$ cm reste identique, le pas de temps choisi est $\Delta t = 0,05$ h soit 3 minutes pour une expérience qui dure 24 heures.

Le profil tensiométrique initial est obtenu en intrapolant linéairement tous les deux centimètres, les valeurs fournies par les tensiomètres. On affecte la valeur lue à 10 cm pour les couches comprises entre 0 et 14 cm.

La condition à la base du monolithe reste identique $h(n) = 0$.

Les flux en surface sont ceux utilisés durant l'irrigation

| | | | |
|----|---|------|------------------|
| 0 | - | 5 h | $q_0 = 1,0$ mm/h |
| 5 | - | 12 h | $q_0 = 2,0$ mm/h |
| 12 | - | 24 h | $q_0 = 0$ |

2) Résultats

L'évolution des profils tentiométriques simulés et mesurés est portée sur la figure 19. L'allure des courbes est respectée, mais on observe un retard pour les courbes calculées de 2 h environ.

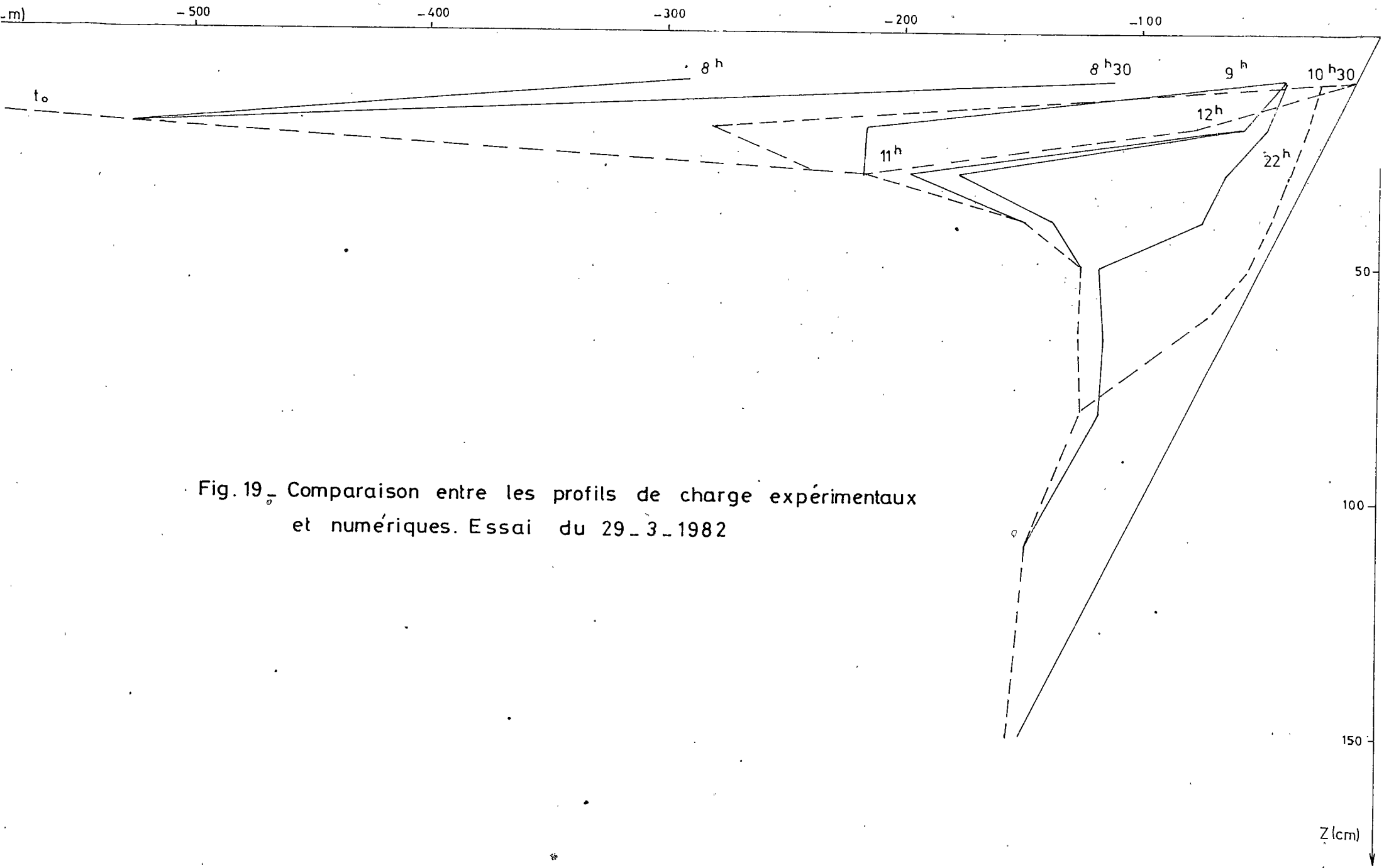


Fig. 19_ Comparaison entre les profils de charge expérimentaux et numériques. Essai du 29_3_1982

Plusieurs sources d'imprécision interviennent pour expliquer ce décalage.

- on a négligé les phénomènes d'hystérésis sur les courbes $h = f(\theta)$
- le profil d'humidité initial a été estimé avec une certaine imprécision, surtout en surface. En effet le sol au début de l'essai était très sec, les tensiomètres en surface indiquaient une valeur supérieure à 700 cm, il a donc fallu extrapoler les valeurs de la charge hydraulique et des humidités.

Le modèle proposé a été utilisé pour la simulation de deux essais dont on connaissait toutes les données. Ceci a permis de vérifier la validité de ce modèle.

En plus de ses qualités numériques (conservation de l'eau, précision des calculs) ce modèle présente l'avantage d'être peu coûteux et facile à mettre en oeuvre. La simulation de 90 jours pour 75 horizons distincts demande 2 mn 19 s de temps machine sur un calculateur de type CII - HB 66.

Les qualités de ce modèle autorisent son utilisation pour la prévision.

CONCLUSION

Les expériences effectuées en laboratoire sur une colonne de sol non perturbé ont permis d'éclaircir un certain nombre de problèmes.

- L'utilisation d'une sonde à neutrons en sol argileux est délicate. On peut obtenir cependant des résultats fiables avec des conditions de manipulation très strictes :

Comptages dans l'eau fréquents et prolongés (chauffe de la sonde).
Mesures répétées en temps long.
Vérification de l'état de charge des accumulateurs.
Usage de l'alimentation sur piles à rejeter.

- La détermination précise des caractéristiques hydrodynamiques du sol argileux étudié, nous a amené à modifier la méthode de calcul. Une relation entre la charge hydraulique et l'humidité est établie directement, sans utiliser la variable temps.

Le calcul des stocks d'eau est fait avec des humidités estimées à l'aide des mesures tensiométriques et des fonctions $h(\theta)$.

- Un modèle unidimensionnel de transferts d'eau dans un sol stratifié a été mis au point. Ce type de modèle déjà utilisé pour des sols sableux a été testé pour un sol fortement argileux.

- Le bon accord des résultats de la simulation avec les mesures autorise à utiliser ce modèle pour la prévision.

BIBLIOGRAPHIE

HILLEL D. (1974) - L'eau et le sol - Principes et processus physiques -
Vanders. 288 p.

VACHAUD G., DANCETTE C., SONKO S. THONY J.L. (1978) - Méthodes de caracté-
risation 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. agron. 29, p. 1-36.

VACHAUD G., VAUCLIN M., COLOMBANI J. (1981) - Bilan hydrique dans le Sud
tunisien. I - Caractérisation expérimentale des transferts dans
la zone non saturée. J. hydrol., 49, p. 31-52.

VAUCLIN M., HAVERKAMP R., VACHAUD G. (1978) - Etude de la résolution numérique
de l'équation de l'infiltration d'eau en milieu non saturé.
Rapport HL - 78-1, Grenoble, 159 p.

VAUCLIN M., VACHAUD G. (1981) - Bilan hydrique dans le Sud tunisien.
II - Modélisation numérique et prévision des transferts hydriques
en sol stratifié. J. hydrol., 49, p. 53-73.

VIEILLEFON J., ZANTE P. (1981) - Etude du régime hydrique et de la salure
en périmètre irrigué sur sol gypseux salé. DRES-ORSTOM, ES 190,
101 p.

VIEILLEFON J., OLIVE P., HUBERT P. (1982) - Etude méthodologique des transferts
d'eau et de sels dans un monolithe de sol argileux.
I - Essais préliminaires de caractérisation des transferts.

LISTE DES FIGURES

- 1 Schéma du monolithe
- 2 Droites d'étalonnage pour 0-70 cm
- 3 Evolution des profils de charge - Essai du 14 juillet 1981
- 4a Evolution des profils d'humidité - Essai du 14 juillet 1981
- 4b Evolution des profils d'humidité estimés - Essai du 14 juillet 1981
- 5 Evolution du plan de flux nul - Essai du 14 juillet 1981
- 6 Evolution des profils de charge - Essai du 29 mars 1982
- 7 Relation $h(\theta)$ pour la cote 10 cm
- 8 Relation $h(\theta)$ pour la cote 20 cm
- 9 Relation $h(\theta)$ pour la cote 30 cm
- 10 Relation $h(\theta)$ pour la cote 40 cm
- 11 Relation $h(\theta)$ pour la cote 50 cm
- 12 Relation $h(\theta)$ pour la cote 65 cm
- 13 Relation $h(\theta)$ pour la cote 80 cm
- 14 Courbes de pF pour la cote 10 cm.
- 15 Variation de la perméabilité en fonction de l'humidité pour différentes profondeurs.
- 16 Humidités à saturation et coefficients de régression de la perméabilité pour différentes cotes.
- 17 Comparaison entre les profils de charge expérimentaux et numériques Essai du 14 juillet 1981.
- 18 Comparaison entre drainage expérimental et numérique. Essai du 14 juillet 1981.
- 19 Comparaison entre les profils de charge expérimentaux et numériques Essai du 29 mars.

LISTE DES TABLEAUX

- 1 Densité apparente et coefficients d'étalonnage des différentes couches.
- 2 Calcul de la perméabilité à la cote 20 cm.
- 3 Humidité à saturation et coefficients des fonctions $h(\theta)$ et $K(\theta)$ pour différentes profondeurs.

TABLE DES MATIERES

| | Page |
|--|-------------------------------|
| RESUME | 2 |
| CHAPITRE I : DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET METHODES DE MESURE | 3 |
| I Description du monolithe | 3 |
| 1) Prélèvement et description du monolithe | 3 |
| 2) Equipement | 5 |
| 3) Dispositif d'irrigation | 5 |
| II Mesure de l'humidité | 5 |
| 1) Courbes d'étalonnage | 5 |
| 2) Utilisation de la sonde à neutrons | 7 |
| 3) Calcul des humidités | 8 |
| III Mesure de la succion et de la charge hydraulique | 8 |
| 1) Définitions | 8 |
| 2) Mesures | 9 |
| CHAPITRE II : RESULTATS EXPERIMENTAUX | 10 |
| I Description de l'essai du 14 juillet 1981 | 13 |
| II Description de l'essai du 29 mars 1982 | 14 |
| III Détermination des caractéristiques hydrodynamiques | 16 |
| 1) Définitions | 16 |
| 2) Méthodes de calcul | 17 |
| a) Succion | 17 |
| b) Perméabilité | - Méthode du drainage interne |
| | - Méthode du plan de flux nul |

| | |
|--|----|
| CHAPITRE III : MODELISATION DES TRANSFERTS D'EAU | 33 |
| I Equations régissant le transfert | 33 |
| II Résolution | 34 |
| | |
| CHAPITRE IV : RESULTATS DE LA SIMULATION | 35 |
| I Simulation de l'essai du 14 juillet 1981 | 35 |
| 1) Les paramètres | 35 |
| 2) Résultats | 38 |
| II Simulation de l'essai du 29 mars 1982 | 39 |
| 1) Les paramètres | 39 |
| 2) Résultats | 39 |
| | |
| CONCLUSION | 42 |
| | |
| BIBLIOGRAPHIE | 43 |
| | |
| LISTE DES FIGURES | 44 |
| | |
| LISTE DES TABLEAUX | 45 |