

MINISTÈRE DE LA QUALITÉ DE LA VIE  
**DIRECTION DE LA PRÉVENTION DES POLLUTIONS ET NUISANCES**  
Service des problèmes de l'eau  
14, avenue du Général-Leclerc, 92521 NEUILLY-SUR-SEINE  
Tél.: 758.12.12

# ÉTUDE DE LA PROPAGATION DES NITRATES DANS UN SOL DU VAL DE LOIRE

par

A. LALLEMAND-BARRES, M. BONNET, G. BROSSIER



**BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES**

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

Département géologie de l'aménagement

Division hydrogéologie

B.P. 6009 – 45018 Orléans Cédex – Tél.: (38) 63.00.12

Bureau de Recherches  
Géologiques et Minières  
BIBLIOTHÈQUE

**76 SGN 207 AME**

Mai 1976

## R E S U M E

---

Cette étude a été réalisée d'une part dans le cadre des travaux propres du département Aménagement, et d'autre part dans le cadre d'un contrat pour le Ministère de la Qualité de la Vie (opération n° 5600-74-091).

L'objectif de cette recherche était d'étudier la propagation en direction de la nappe d'un nitrate répandu en surface.

La première phase de la recherche consiste en une étude expérimentale effectuée dans le Val d'Orléans. Cette étude expérimentale, dont ce rapport rend compte, nous a permis de constater que le nitrate répandu en surface s'infiltrait très vite en direction de la nappe.

La deuxième phase de la recherche a pour objet une tentative de modélisation des phénomènes observés par les théories et modèles proposés récemment pour les phénomènes de transfert en sols non saturés.

## S O M M A I R E

---

	<u>Page</u>
INTRODUCTION	1
1. - RAPPELS PRELIMINAIRES	2
1.1 Caractéristiques d'un sol	2
1.2. Pression	3
1.2.1. Succion	3
1.2.2. Potentiel capillaire	4
1.3. Vitesse et sens de l'écoulement	5
1.3.1. La loi de Darcy	5
1.3.2. Profils de potentiel et sens de l'écoulement	5
1.4. Calcul des flux	6
2. - METHODES DE MESURE	6
2.1. Mesure des succions	6
2.2. Enregistrement des succions	7
2.3. Mesure des teneurs en eau	9
2.3.1. Principes	9
2.3.2. Les courbes d'étalonnage	10
2.4. Prélèvements d'eau dans le sol	11
2.5. Dosage du nitrate dans l'eau du sol	11

...

3. - ETUDE SUR LE TERRAIN	12
3.1. Description et reconnaissance du site	12
3.1.1. Analyses granulométriques	13
3.1.2. Caractéristiques physiques	14
3.1.3. Analyses minéralogiques	14
3.1.4. Analyses chimiques	16
3.2. Aménagement de la parcelle expérimentale	18
3.3. Expériences de traçage	20
3.4. Interprétation des résultats expérimentaux	22
3.4.1. Mesure des teneurs en eau	22
3.4.1.1. <i>Calcul des stocks et des variations de stock</i>	22
3.4.1.2. <i>Tracé des profils hydriques</i>	23
3.4.1.3. <i>Discussion des résultats</i>	39
3.4.2. Mesure des succions	39
3.4.2.1. <i>Mesure des gradients de potentiel et détermination du sens de l'écoulement</i>	39
3.4.2.2. <i>Profils de potentiel</i>	40
3.4.2.3. <i>Discussion des résultats</i>	56
3.4.3. Calcul des flux et des perméabilités	56
3.4.4. Mesure des teneurs en nitrate	59
3.4.5. Discussion des résultats	68
4. - ESSAI DE MODELISATION	70
4.1. Présentation des modèles disponibles	70
4.2. Sélection d'un modèle	72
4.3. Résultats obtenus	72
CONCLUSION	78
BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE	79

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

---

Depuis quelques années, l'utilisation intensive d'engrais azotés a fait passer le taux des nitrates dans les nappes à une valeur proche sinon égale à celle du seuil actuellement toléré qui est de 45 mg/l de  $\text{NO}_3^-$ .

Il nous a paru intéressant d'étudier le transfert du nitrate à travers un sol non saturé du Val de Loire, les engrais azotés étant couramment utilisés dans cette région et les taux de nitrate mesurés dans les nappes pouvant être élevés.

L'objectif de cette étude est d'évaluer quantitativement comment une substance polluante donnée, en l'occurrence l'ion  $\text{NO}_3^-$ , introduite à la surface du sol dans des conditions définies, se propage en profondeur dans un milieu défini et peut atteindre une nappe souterraine.

Dans cette optique, nous avons entrepris l'étude hydrodynamique et hydrochimique d'un système eau - sol - sel dans la zone non saturée.

## 1. - RAPPELS PRELIMINAIRES

Les processus d'écoulement en milieu non saturé ne sont pas simples ; ils sont très difficiles à décrire quantitativement. Ils mettent en jeu des relations complexes entre les variables, notamment les teneurs en eau et les succions.

Nous rappellerons les grandeurs fondamentales qui interviennent dans la résolution de ces problèmes.

### 1.1. Caractéristiques d'un sol

- $\rho_s$  le poids spécifique est le poids de l'unité de volume d'un grain solide.
- $\rho_h$  la densité "humide" ou poids spécifique apparent d'un sol est le poids de l'unité de volume du sol, eau comprise.
- $\rho_s$  la densité "sèche" est le poids de l'unité de volume du sol, sans eau intersticielle.

Ces trois valeurs s'expriment en  $\text{g/cm}^3$ .

- $W$  la teneur en eau pondérale est le rapport du poids d'eau contenu dans le sol au poids sec de l'échantillon. On l'exprime en pour cent.
- $\theta$  la teneur en eau volumique est le rapport du volume d'eau au volume du sol en place.

Principales relations :

$$\theta = W \cdot \rho_s$$

$$\rho_h = \rho_s(1 + W)$$

...

Sur le terrain, la courbe donnant la répartition de la teneur en eau sur une verticale en fonction de la profondeur s'appelle un profil hydrique. En ordonnée, on porte la profondeur  $z$  par rapport à la surface, et en abscisse, la teneur en eau volumique. Pour des répartitions unidimensionnelles, le volume d'eau contenu dans un cylindre vertical de section  $d\sigma$  et limité par deux plans de cote  $z_1$  et  $z_2$  est proportionnel à la surface de  $\sigma$  :

$$dv(z_1, z_2) = \int_{z_1}^{z_2} \theta dv = d\sigma \int_{z_1}^{z_2} \theta dz$$

$\int_{z_1}^{z_2} \theta dz$  appelé stock d'eau caractérise la quantité d'eau contenue dans une tranche de sol.

La variation du stock d'eau entre deux instants  $t_1$  et  $t_2$  s'exprime par la différence entre le stock d'eau au temps  $t_2$  et celui au temps  $t_1$ .

$$\frac{dS}{dt} = \frac{St_2(z_1, z_2) - St_1(z_1, z_2)}{t_2 - t_1}$$

Le terme  $\frac{dS}{dt}$  a la dimension d'une vitesse. Il représente aussi un volume d'eau par unité de temps et de section horizontale.

## 1.2. Pression

### 1.2.1. Succion

Il est usuel de définir la différence de pression entre les phases eau et air dans la zone non saturée par le terme de pression capillaire  $P_c = P_a - P_w$

$P_a$  : pression de l'air

$P_w$  : pression de l'eau

et par la hauteur capillaire :

$$h_c = \frac{(P_a - P_w)}{\rho_w g}$$

$\rho_w$  : masse volumique de l'eau

$g$  : accélération de la pesanteur

Si l'on admet que l'air constitue une phase continue et inerte, se trouvant en tous points à la pression atmosphérique, on introduit alors la notion de succion :

$$\psi = \frac{(P_w - P_{at})}{\rho_w g}$$

La pression de l'eau dans le sol dans la zone non saturée est inférieure à la pression atmosphérique.

Notons que la succion ainsi définie est une grandeur négative dans la zone non saturée, et liée de façon complexe à la teneur en eau.

### 1.2.2. Potentiel capillaire

On définit le potentiel capillaire par :

$$\phi = \psi - z$$

l'axe des z ayant pour origine la surface du sol et étant orienté vers le bas.

L'expression  $\phi = \psi - z$  est une expression algébrique,  $\psi$  étant négatif lorsque le sol n'est pas saturé.

Si l'on dispose de mesures de potentiel à des cotes différentes  $z_1, z_2, \text{etc.}$ , on peut calculer des gradients de potentiel :

$$\frac{\text{pot}_2 - \text{pot}_1}{z_2 - z_1} = \text{grad}$$

...



### 1.3. Vitesse et sens de l'écoulement

#### 1.3.1. La loi de Darcy

La loi de Darcy, appliquée au milieu poreux non saturé, s'écrit de la manière suivante :

$$v = - K(\theta) \frac{\delta\phi}{\delta z}$$

$\frac{\delta\phi}{\delta z}$  représente le gradient de potentiel

$K(\theta)$  représente la conductivité hydraulique.

Le coefficient de perméabilité  $K$  dépend, dans ce cas, de la teneur en eau.

#### 1.3.2. Profils de potentiel et sens de l'écoulement

Le profil de potentiel représente la distribution verticale des potentiels dans le sol. En ordonnée, on porte la profondeur  $z$  orientée positivement vers le bas, et en abscisse le potentiel  $\phi$  orienté positivement vers la droite.

Comme le montre l'équation de Darcy, le signe du vecteur vitesse dépend directement du signe du gradient de potentiel. Le sens de l'écoulement découle du signe du vecteur de vitesse ( $v$ ).

Si  $v < 0$ , il y a évaporation

Si  $v > 0$ , il y a infiltration.

L'examen des profils de potentiel permet de visualiser rapidement le sens des écoulements dans un milieu non saturé.

Le point où l'on observe une inversion des gradients, c'est-à-dire le point pour lequel  $\frac{d\phi}{dz} = 0$ , s'appelle le point de flux nul.

#### 1.4. Calcul des flux

Pour calculer les flux, on admet que la variation du stock d'eau  $\frac{ds}{dt}$ , entre deux cotes  $z_1$  et  $z_2$ , est égale à la différence entre les flux entrant et sortant dans la couche de terrain. Les flux entrant sont comptés positivement et les flux sortant négativement.

$$\frac{ds}{dt} = v_1 - v_2$$

Il suffit de connaître le flux en un point pour calculer le flux en tous les points.

Si l'on observe un point de flux nul sur un profil de potentiel, on délimite ainsi deux zones : l'une où les flux sont ascendants, l'autre où les flux sont descendants.

## 2. - METHODES DE MESURE

### 2.1. Mesure des succions

L'appareil principal de la mesure est une cellule poreuse de céramique, placée en contact intime avec le sol, et dénommée tensiomètre. Cette cellule poreuse perméable saturée assure l'égalité de pression entre l'eau du sol avec laquelle elle est en contact et une enceinte remplie d'eau, reliée au système de mesure.

Le procédé de mesure des pressions nécessite une variation du volume d'eau contenu dans l'enceinte de mesure et les tubes de liaison.

On caractérise le traducteur de pression par sa sensibilité :

$$S = \frac{\Delta\phi}{\Delta V}$$

Il y a donc intérêt à choisir un système de mesure des pressions qui nécessitera une variation de volume minimale, et on aura ainsi une sensibilité plus grande.

C'est pourquoi nous avons choisi le système qui consiste à coupler chacun des tensiomètres à un capteur de pression.

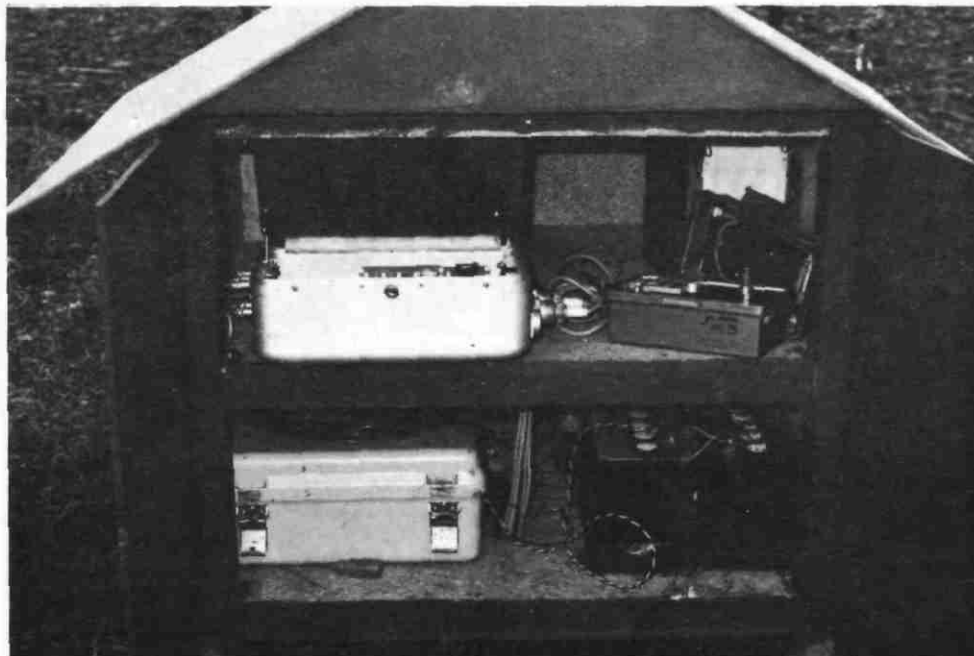
Les capteurs utilisés dans le cadre de cette expérience sont des capteurs de marque NS. Ils étaient reliés aux cellules poreuses suivant le montage schématisé page suivante.

## 2.2. Enregistrement des succions

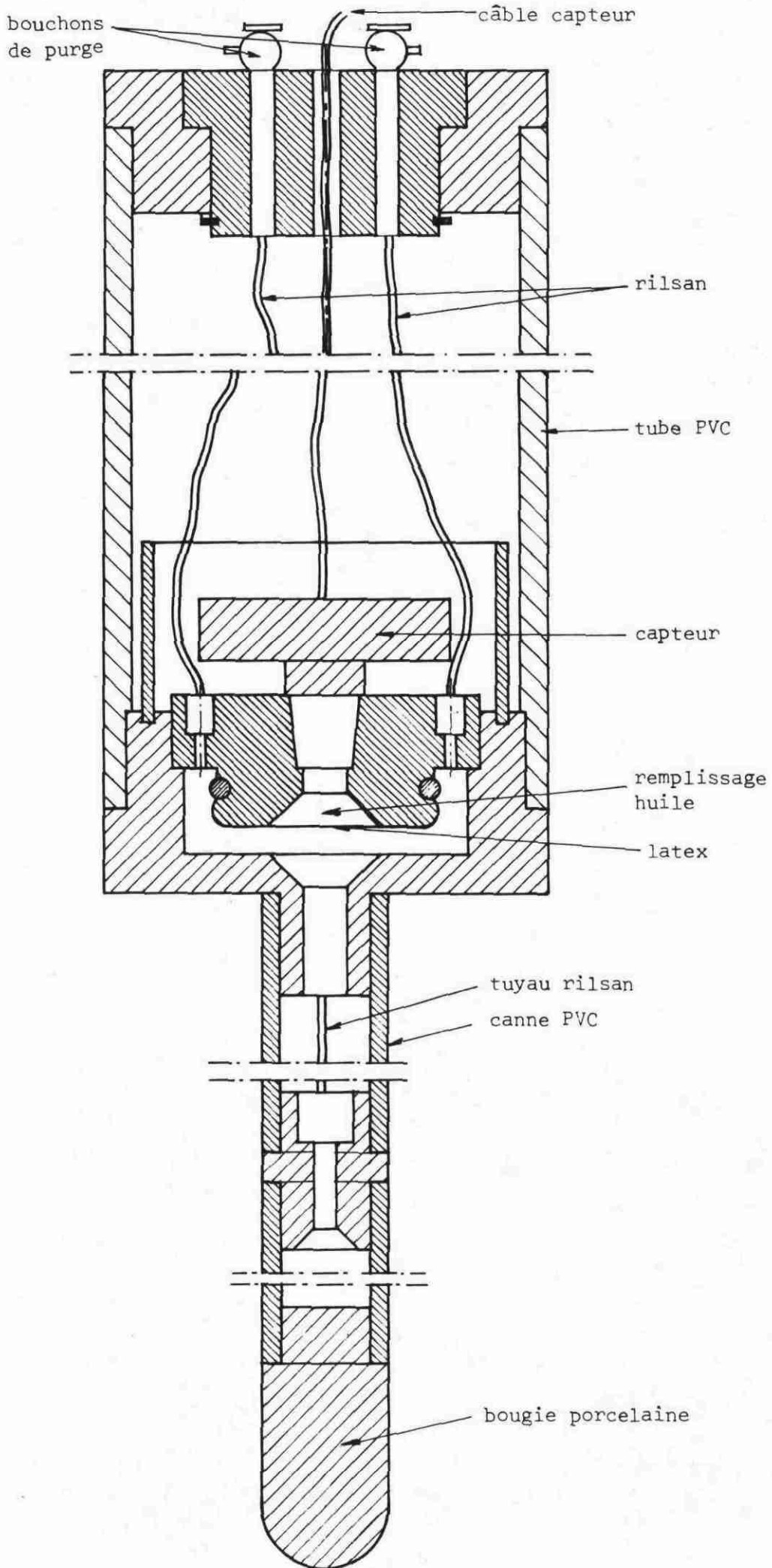
Les informations transmises par le capteur sont amplifiées puis enregistrées sur bandes par l'intermédiaire d'un enregistreur magnétique microdata. L'ensemble du système de mesure est appelé "S.O.P.H.I.S."

La lecture de ces bandes magnétiques se fait ensuite à l'aide d'un programme de calcul sur ordinateur. A la sortie du traitement, on dispose des valeurs des succions en dm d'eau pour chaque capteur, et aux intervalles de temps que l'on aura choisis préalablement grâce à une horloge microdata intégrée au système SOPHIS.

La photo n°1 présente ce système de mesure.



...



PLAN DE MONTAGE D'UN TENSIOMETRE AVEC CAPTEUR

## 2.3. Mesure des teneurs en eau

### 2.3.1. Principes

La sonde à neutrons utilisée est une sonde Pitmann. Son principe est le suivant : une source d'américium-berillium émet des neutrons rapides dans le sol. Ces neutrons rapides sont transformés en neutrons lents par leur choc avec les atomes d'oxygène. Ce ralentissement est proportionnel à la teneur en atomes d'hydrogène du sol. Le détecteur n'est pas séparé de la source, car ce détecteur de neutrons lents n'est pas sensible à la gamme d'énergie des neutrons émis. Il faut évidemment établir une relation (courbe d'étalonnage) entre la réponse du détecteur, en nombre de coups, et la teneur en eau.

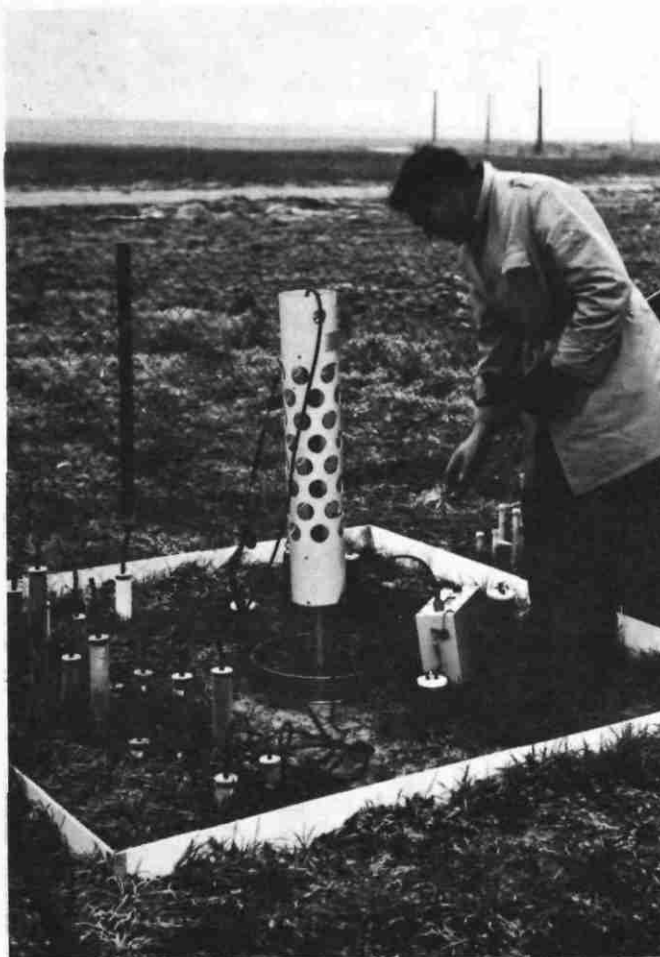


Photo 2

Vue de la sonde nucléaire  
et de  
l'échelle de comptage

...

### 2.3.2. Les courbes d'étalonnage

On distingue trois manières d'établir la courbe d'étalonnage :

- *un étalonnage en laboratoire :*

qui consiste à remplir un fût avec le terrain choisi L'échantillonnage, séchage du terrain et compactage pour obtenir une densité constante sont onéreux et compliqués. On obtient deux points dont la mesure est précise : le point où le sol est sec et la saturation. Puis on laisse drainer jusqu'à équilibre.

- *un étalonnage théorique à partir des données suivantes :*

analyse chimique des éléments majeurs du terrain, adsorption neutronique sur un profil, teneur en eau de constitution, densité sèche et poids spécifique. Cette courbe est établie à l'aide d'un modèle mis au point au CEN de Cadarache.

Il n'a pas été possible lors de cette recherche de faire établir la courbe d'étalonnage de la sonde pour le terrain étudié au CEN Cadarache.

- *un étalonnage sur le terrain :*

C'est la méthode que nous avons utilisée. Pour ce faire, nous avons effectué un sondage de 2m20. Toutes les carottes issues de ce sondage ont été prélevées intactes. Nous avons procédé ensuite à la mise en place d'un tube en dural, et les mesures à la sonde à neutrons ont été effectuées aux cotes de prélèvement.

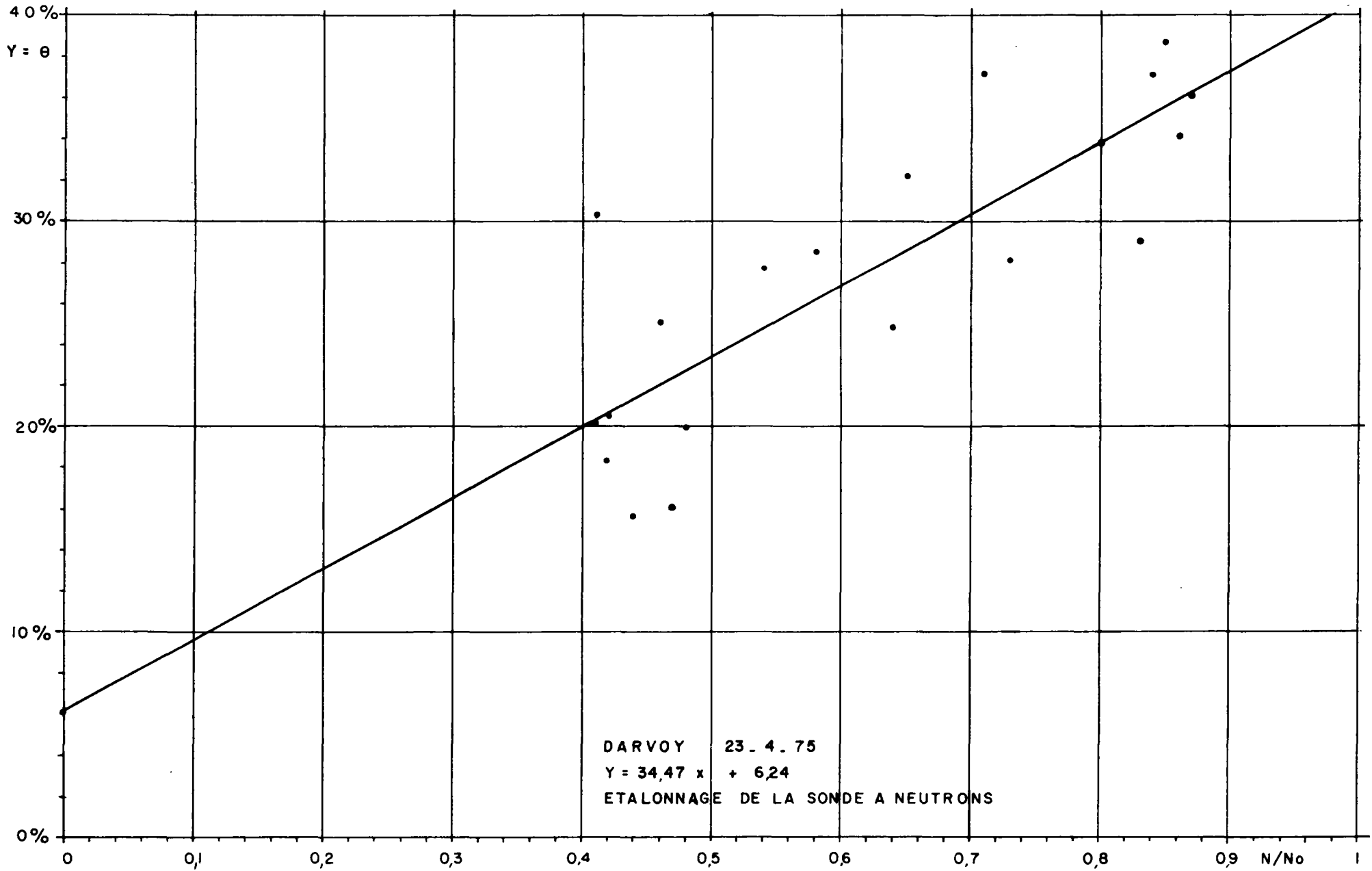
Sur les échantillons prélevés, on a fait au laboratoire des mesures de teneur en eau pondérale et de densité humide.

La teneur en eau volumique est donnée par les relations :

$$\theta = w \rho_s$$
$$\rho_s = \frac{\rho_h}{(1+w)}$$

$\theta$  : teneur en eau volumique  
 $w$  : teneur en eau pondérale  
 $\rho_s$  : densité sèche  
 $\rho_h$  : densité humide

...



On porte la teneur en eau volumique  $\theta$  en fonction de  $N/N_0$ .

$N$  = nombre de coups lu sur l'échelle de comptage au point de mesure considéré.

$N_0$  = nombre de coups lu au début de chaque série de mesures, la source étant dans sa protection.

On obtient un faisceau de points, et l'équation de la droite d'étalonnage est calculée par la méthode des moindres carrés.

La droite obtenue pour le site de Darvoy est donnée en annexe.

#### 2.4. Prélèvements d'eau dans le sol

L'appareil utilisé est constitué d'une cellule poreuse en céramique d'un diamètre voisin de 40 mm, surmontée d'un tube creux en plastique, de même diamètre, fermé par un bouchon muni d'une ou deux tubulures.

Pour extraire de l'eau du terrain, on établit une dépression dans l'appareil. Le temps nécessaire pour que le volume d'eau qui diffuse dans la bougie soit suffisant pour permettre une analyse chimique dépendra évidemment de l'état hydrique du terrain.

L'eau recueillie dans l'appareil de marque "soilmoisture" est prélevée ensuite par l'intermédiaire d'une petite pompe.

#### 2.5. Dosage du nitrate dans l'eau du sol

L'appareil de mesure utilisé pour les dosages de nitrate est un ionomètre spécifique de marque Orion, relié à une électrode à membrane et à échangeur d'ions liquides. Le dosage des nitrates au moyen de cette électrode est plus simple et plus rapide que par toute autre méthode et fournit pourtant une précision comparable.



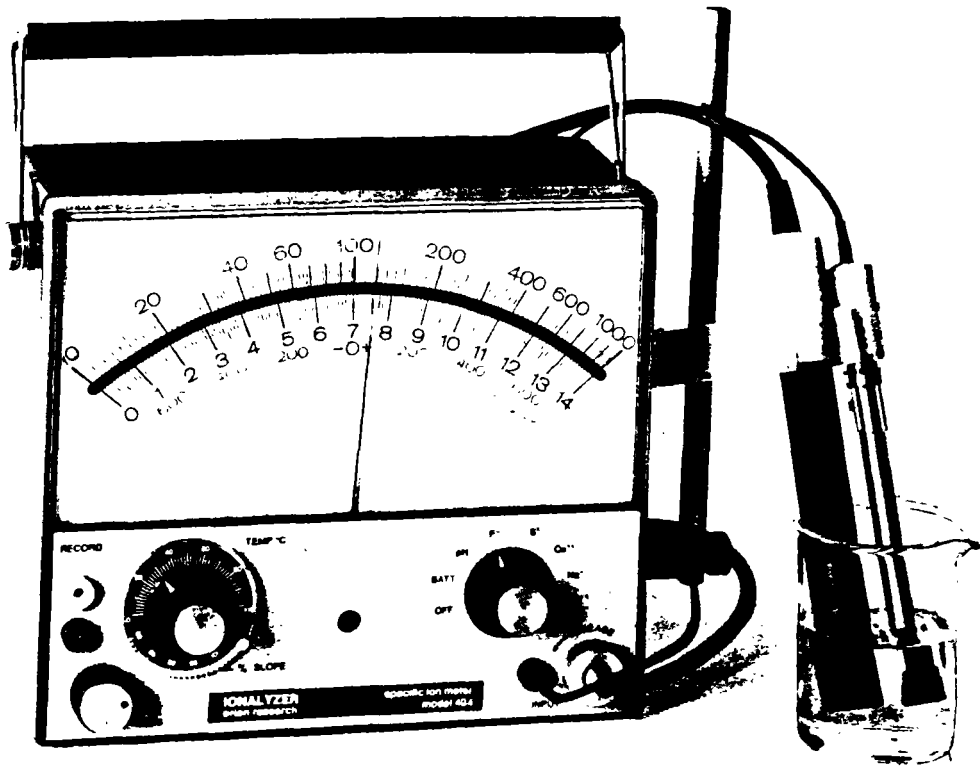


Photo 3 : Ionomètre Orion.

### 3. - ETUDE SUR LE TERRAIN

#### 3.1. Description et reconnaissance du site

La parcelle expérimentale a été implantée dans le Val de Loire en zone agricole, près du village de Darvoy. On sait que dans toute cette région les teneurs en nitrates observées depuis quelques années dans la nappe se révèlent souvent dangereusement élevées. D'autre part, le site est relativement proche du BRGM, donc d'un accès aisé et il avait été équipé de piézomètres lors de précédentes expériences. Une carotte a été prélevée sur ce terrain lors de l'aménagement de la parcelle. Sur les échantillons recueillis, les analyses suivantes ont été effectuées.

### 3.1.1. Analyses granulométriques

Les résultats obtenus lors de l'établissement des courbes granulométriques peuvent être résumés dans le tableau 1.

profondeur cm	> 2 mm graviers %	200 $\mu$ -2 mm gros sable%	20 - 200 $\mu$ sable fin %	2 - 20 $\mu$ limon %	< 2 $\mu$ argile %
0- 10	4	24	30	24	18
10- 20	2	225	35	22	16
20- 30	3	26	34	21	16
30- 40	3	34	24	14	25
40- 50	3	35	25	17	20
50- 60	1	16	21	22	40
60- 70	1	8	19	26	46
70- 80	2	30	20	17	31
80- 90	-	36	20	17	27
90-100	1	40	21	13	25
100-110	3	44	17	11	25
110-120	9	50	41	0	0
120-130	53	29	18	0	0
130-140	51	33	16	0	0
140-150	44	41	15	0	0
150-160	32	52	16	0	0
160-170	18	63	19	0	0
170-180	29	55	16	0	0

Tableau 1 : Compositions granulométriques

On trouve approximativement des sables limoneux jusqu'à 50cm, puis un banc d'argile limoneuse de 50 à 80cm et de nouveau des sables argileux jusqu'à 110

Au-dessous de 1,10 m, les fractions argileuses et limoneuses disparaissent pour laisser place à des sables grossiers et à des graviers.

...

### 3.1.2. Caractéristiques physiques

Sur cette même série d'échantillons, les mesures physiques : densité sèche, teneur en eau pondérale, poids spécifique des grains, ont donné les résultats suivants :

profondeur cm	densité sèche $\gamma_d$ (T/m <sup>3</sup> )	teneur en eau pondérale W (%)	Poids spécifique des grains $\gamma_s$
0- 10	1,36	20,9	2,32
10- 20	1,28	19,4	
20- 30	1,51	18,6	2,30
30- 40	1,24	23,4	2,76
40- 50	1,26	28,5	2,71
50- 60	1,09	31,2	2,67
60- 70	1,23	31,2	2,75
70- 80	1,19	31,1	2,69
80- 90	1,28	29,8	2,65
90-100	1,51	21,3	2,36
100-110	1,52	18,2	2,47
110-120	1,92	15,7	2,33
120-130	2,02	9,0	2,68
130-140	1,93	8,1	2,87
140-150	1,88	8,6	2,63
150-160	1,89	10,4	2,67
160-170	2,00	12,5	2,67
170-180	1,76	11,6	2,64
180-200	1,87	10,8	2,74

Une autre carotte a été prélevée sur le site entre 0 et 120 cm. Sur cette deuxième série d'échantillons, on a procédé à des analyses minéralogiques et chimiques.

### 3.1.3. Analyses minéralogiques

Une détermination des minéraux présents a été faite d'une part sur les échantillons tout-venant, d'autre part sur la fraction argileuse extraite de ces échantillons.

...

Ces déterminations sont uniquement qualitatives, les résultats sont indiqués dans le tableau 2.

Tableau 2 : Composition minéralogique

Profondeur cm	Quartz	Minéraux présents dans le tout-venant				
		<u>feldspath</u> plagio      K		<u>argiles</u> Illite    Kaolinite    Montmo- rillonite		
0- 10	P	P	A	F	Tr	F
10- 20	P	P	A	F	Tr	F
20- 30	P	P	P	Tr	Tr	P
30- 40	P	P	P	F	Tr	P
40- 50	P	F	F	F	Tr	A
50- 60	P	F	F	F	Tr	A
60- 70	P	Tr	Tr	Tr	Tr	TA
70- 80	F	F	F	F	F	A
80- 90	F	Tr	F	F	F	TA
90-100	F	F	F	F	F	A
100-110	P	A	P	F	Tr	P
110-120	P	TA	F	F	F	P
120-130	P	F	A	F	Tr	A

P = présent ; F = faible ; Tr = traces ; A = abondant ; TA = très abondant

profondeur cm	Minéraux présents dans la fraction argileuse		
	Kaolinite	Illite	Montmorillonite
0- 10	3	4	3
10- 20	2	3	5
20- 30	2	4	4
30- 40	2	4	4
40- 50	2	4	4
50- 60	2	3	5
60- 70	2	3	5
70- 80	2	3	5
80- 90	2	3	5
90-100	2	3	5
100-110	2	3	5
110-120	2	3	5
120-130	2	3	5

Les chiffres portés dans les colonnes correspondent à une estimation quantitative du rapport entre eux des minéraux argileux sur une base décimale.

Ces analyses mettent en évidence la teneur importante en quartz et plagioclases jusqu'à 40 cm puis au-delà d'un mètre, et une teneur en argile considérable entre 40 cm et 100 cm. L'argile prédominante est incontestablement la montmorillonite, l'illite étant en quantité moindre et la kaolinite ne se présentant que sous forme de traces.

On note aussi la présence de montmorillonite dans l'échantillon tout-venant prélevé entre 120 et 130 cm. Les analyses granulométriques ne révélaient plus d'argile à cette cote. Ceci rend compte de l'hétérogénéité du terrain, les analyses minéralogiques n'ayant pas été effectuées sur les même série d'échantillons que les analyses granulométriques.

#### 3.1.4. Analyses chimiques

Les échantillons de cette deuxième carotte ont ensuite été soumis à une analyse chimique des constituants majeurs. Notons que cette carotte a été prélevée au mois de juin 1975 et qu'à cette date il était intéressant de connaître la quantité de nitrate présente dans le sol, la première expérience d'épandage de nitrate sur la surface ayant été conduite en mai 1975.

Les résultats de l'analyse chimique sont indiqués dans le tableau 3.

...

profondeur cm	SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	MgO %	CaO %	K <sub>2</sub> O %	Na <sub>2</sub> O %	SO <sub>3</sub> %	CO <sub>2</sub> %	NO <sub>3</sub> %	H <sub>2</sub> O <sup>-</sup> %	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup> %	Perte au four à 1000°C (%)
0- 10	64,4	13,20	4,60	1,38	2,0	3,25	1,70	0,05	0,61	0,11	1,64	1,47	8,10
10- 20	65,7	13,65	4,75	1,12	1,51	3,21	1,70	0,038	0,22	0,12	1,58	2,02	7,00
20- 30	65,4	14,50	5,20	1,33	1,51	3,21	1,70	0,033	0,03	0,10	0,36	3,29	5,86
30- 40	64,2	15,10	5,60	1,35	1,54	3,18	1,60	0,025	0,33	0,10	0,72	3,58	5,30
40- 50	56,80	17,50	7,65	1,70	1,47	3,04	1,29	0,02	0,14	0,11	0,57	5,60	8,20
50- 60	54,90	18,00	8,20	1,98	1,51	3,04	1,21	0,018	0,11	0,12	1,16	6,50	9,85
60- 70	52,50	17,80	8,10	1,93	1,51	3,00	1,14	0,020	0,17	0,13	3,70	7,25	11,90
70- 80	53,80	18,05	8,35	1,85	1,68	3,04	1,14	0,02	0,11	0,11	0,90	7,20	9,15
80- 90	52,00	18,00	8,10	1,85	1,68	2,92	1,11	0,02	0,17	0,10	4,20	7,10	12,15
90-100	59,20	16,45	6,85	1,75	1,68	3,04	1,32	0,018	0,17	0,07	1,04	6,05	7,65
100-110	63,50	15,10	5,80	1,65	1,61	3,11	1,46	0,018	0,19	0,10	0,72	5,45	6,27
110-120	64,20	14,70	5,35	1,40	1,54	3,11	1,50	0,013	0,19	0,12	1,56	4,92	6,80
120-130	66,30	14,15	5,00	1,45	1,47	3,18	1,60	0,013	0,03	0,10	0,41	4,48	4,95

Tableau 3 : Composition chimique

Ces résultats confirment ceux de l'analyse minéralogique : les constituants quartz, plagioclases et argiles forment la totalité des composants minéraux. Les sulfates sont inexistantes, les carbonates se manifestent sous forme de traces, de même que les nitrates.

⋮

### 3.2. Aménagement de la parcelle expérimentale

La zone expérimentale est schématisée sur la figure 1.

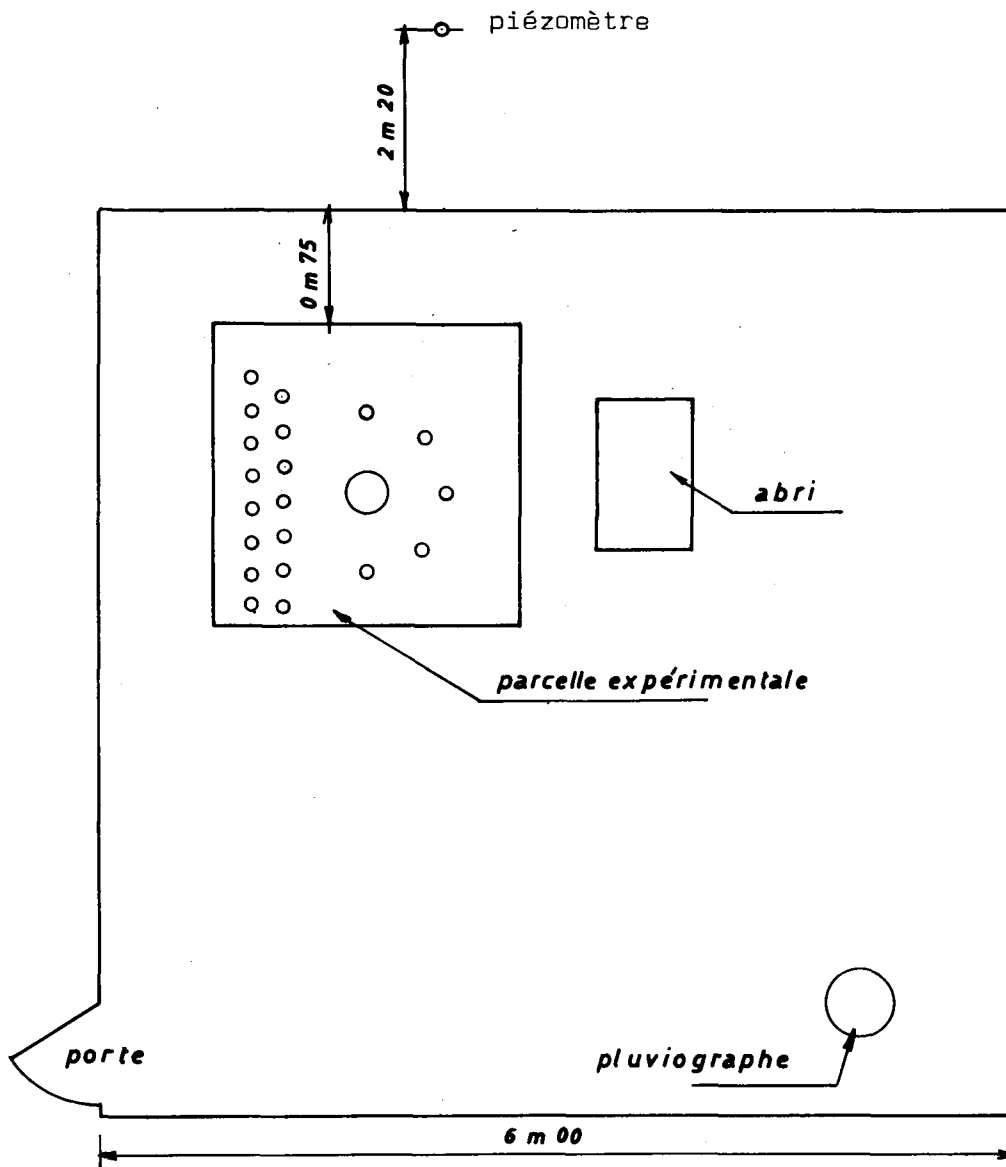


fig1- SCHEMA DE LA ZONE EXPERIMENTALE

Cette zone expérimentale comporte la parcelle expérimentale, l'abri dans lequel se trouvent les appareils de mesure et d'enregistrement des succions, un pluviographe, et à l'extérieur de l'enclos un piézomètre dans lequel le niveau de la nappe est contrôlé et les prélèvements d'eau sont faits pour être analysés.

La figure 2 et la photo 4 donnent une description détaillée de la parcelle expérimentale.

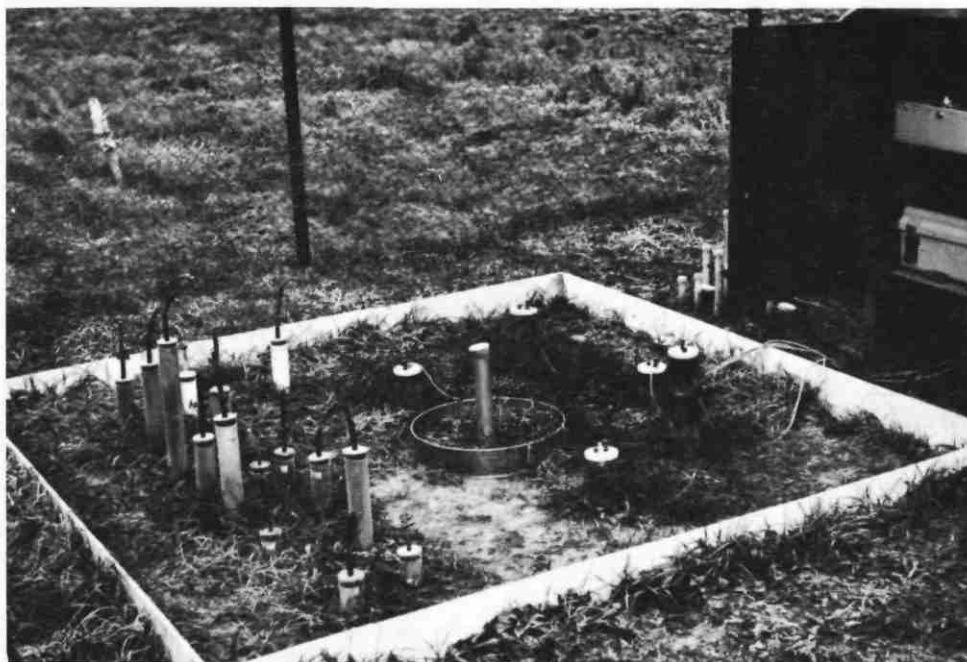


Photo 4

Vue de la  
parcelle  
expérimentale.

La parcelle comportait le dispositif suivant :

- un tube pour mesures de teneur en eau. Ce tube avait une longueur de 2 m 20. Les mesures étaient faites tous les 5 cm, jusqu'à 150 cm puis tous les 10 cm jusqu'à 220 cm.

...



- 5 tensiomètres couplés avec des capteurs de pression, disposés en arc de cercle autour du tube pour mesures hydriques. Leurs cotes étaient de 20, 60, 80, 100 et 120 cm. Les mesures de succions se faisaient toutes les heures.
- 12 bougies poreuses permettant le prélèvement d'eau tous les 10cm jusqu'à 120 cm

### 3.3. Expériences de traçage

Les expériences ont été réalisées à l'aide de nitrate de potassium en solution.

Trois opérations ont été conduites, chronologiquement de la manière suivante :

#### 1ère opération :

- 28-5-1975 : déversement de 5 cm d'eau sur la parcelle, pour humidifier le terrain en surface et diminuer les fissures et craquelures très nombreuses.

- 03-6-1975 : déversement de 80 l de solution de  $\text{NO}_3\text{K}$ , dosée à 1,9 g/l  $\text{NO}_3^-$ .

Les prélèvements d'eau dans les cellules poreuses ont été faits tous les jours, puis tous les deux jours et tous les huit jours pendant deux à trois mois.

- 15-7-1975 : arrosage du terrain avec 5 cm d'eau.

- 30-7-1975 : apport de 18 cm d'eau.

...

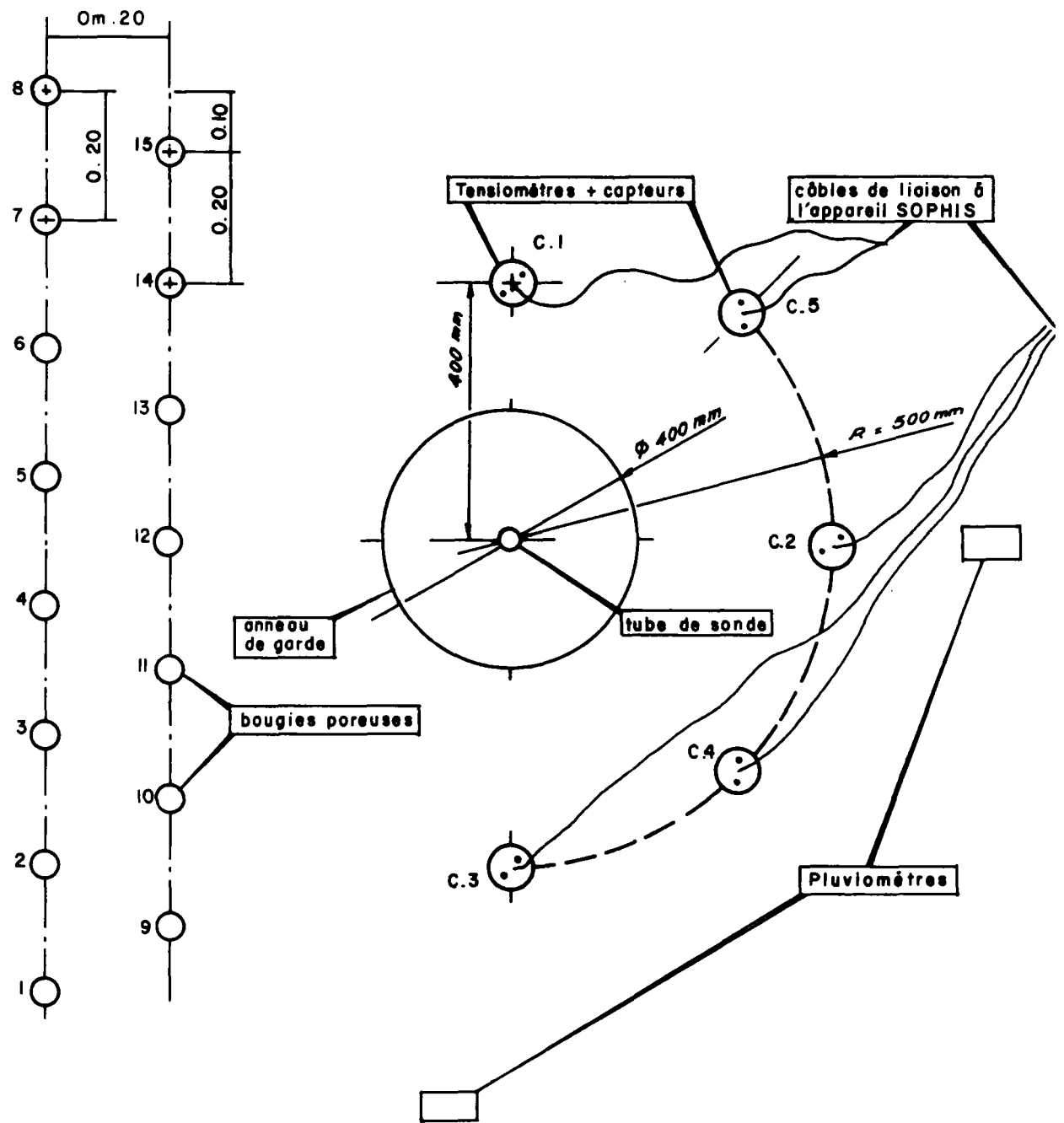


Fig. 2. PLAN DE LA PARCELLE      ECHELLE : 1/10e

Cote des bougies poreuses :	1 : 10 cm	(tous les 10 cm)
	15 : 150 cm	
Cote des capteurs :	C <sub>3</sub> : 100 cm	
	C <sub>4</sub> : 120 cm	
	C <sub>2</sub> : 80 cm	
	C <sub>1</sub> : 60 cm	
	C <sub>5</sub> : 20 cm	

2ème opération :

- 25-8-1975 : apport de 25 cm d'eau sur la parcelle.
  
- 26-8-1975 : déversement de 200 l de solution de  $\text{NO}_3\text{K}$  dosée à 2,9 g/l  $\text{NO}_3^-$ .

3ème opération :

- 25-9-1975 : arrosage de la parcelle avec 30 l de solution  $\text{NO}_3\text{K}$ , dosée à 6 g/l  $\text{NO}_3^-$ .

Le rythme des prélèvements au cours des deux dernières opérations était identique au rythme adopté lors de la première expérience.

### 3.4. Interprétation des résultats expérimentaux

#### 3.4.1. Mesure des teneurs en eau

##### 3.4.1.1. Calcul des stocks et des variations de stock

Les mesures effectuées à la sonde à neutrons nous donnent le rapport  $N/\text{No}$ , tous les 5 cm jusqu'à 150 cm, et tous les 10 cm jusqu'à 220 cm.

Le programme intitulé "BARREAU" (voir page suivante) a été mis au point pour effectuer les calculs suivants :

#### calcul de $\theta$

La droite d'étalonnage  $\theta = 34,47 \times (N/\text{No}) + 6,24$  est entrée en donnée.

#### calcul des volumes élémentaires, $DV(j)$

$$DV_{(1,2)} = \left( (\theta_1 + \theta_2) / (2) \right) \times dz$$

#### calcul des volumes partiels $V(j)$

On a en effet regroupé les volumes élémentaires en sept volumes partiels délimités par les cotes auxquelles sont faites les mesures de succions pour les cinq premiers volumes.

Ces volumes partiels correspondent aux couches suivantes :

- $V_{(1)} = 0-20 \text{ cm}$
- $V_{(2)} = 20-60 \text{ cm}$
- $V_{(3)} = 60-80 \text{ cm}$
- $V_{(4)} = 80-100 \text{ cm}$
- $V_{(5)} = 100-120 \text{ cm}$
- $V_{(6)} = 120-150 \text{ cm}$
- $V_{(7)} = 150-200 \text{ cm}$

calcul des variations de stock sur le profil

$$d \text{ stock} = \text{stock}(t_2) - \text{stock}(t_1)$$

calcul des variations de stock dans les volumes partiels

$$\text{VAV}(j) = V(j)_{t_2} - V(j)_{t_1}$$

Les résultats de ces calculs, pour les mesures effectuées du 24-4-1975 au 15-10-1975 sont donnés dans les tableaux 4 et 5.

#### 3.4.1.2. Tracé des profils hydriques

Le programme "MAIS" a été mis au point pour permettre le traçage automatique des profils de teneur en eau à différentes dates. (Ce même programme "MAIS" permet de tracer automatiquement les profils de potentiel).

L'examen des profils hydriques met en évidence l'hétérogénéité importante de cette coupe de terrain.

...

---

Remarque : Les pluies portées dans les tableaux sont les pluies cumulées pendant l'intervalle de temps entre deux mesures.

36CN-FC-479 3-R

MAINPGM

DATE 17/05/76

TIME 14.42.30

BARREAU

```

REAL MESU (100)
DIMENSION TITRE(20),DV(50),Z(50),V(20),VPR(20),VAV(20) ,
IDZ(50),K(50),ITAB1(500),ITAB2(500),ITAB3(500),
2 TAB1(500),TAB2(500),TAB3(500),TAB4(500),TAB5(500,50),TAB6(500,50)
DATA LEC,IMF/1,3/
READ 1005,TITRE,LOPTE,JOURA,MOISA,NANA,LHEURA,MINUTA,A,B
1005 FORMAT (20A4,/,A1,4X,5I5,2F5.0)
READ 1010,NBMESU,(7(I),I=1,NBMESU)
1010 FORMAT (15,(T6,15F5.0))
READ 1015,NBV,(K(J),J=1,NBV)
1015 FORMAT (15,(T6,15I5))
PRINT 1020,TITRE
1020 FORMAT (1H1,/,2CX,20A4,////)
PPRINT 1025
1025 FORMAT(1H ,25X,25H TENEURS EN EAU VOLUMIQUE)
NBDV=NBMESU-1
DO 10 J=1,NBV
VAV(J)=-100000.
10 VPR(J)=-100000.
VTCPR=-100000.
KOMPTE=C
20 READ(LEC,1030,FND=100) JOUR,MOIS,NAN,LHEUR,MINUT,PLUIE,FERRIG,
1(MESU(I),I=1,NBMESU)
1030 FORMAT (5I2,2(A4,1X),(T21,12F5.0))
STOCK=0.
KOMPTE=KOMPTE+1
DO 30 I=1,NBMESU
MESU(I)=((MESU(I)*A)+E)/100.
30 CONTINUE
PRINT 1035,JOUR,MOIS,NAN,LHEUR,MINUT,(MESU(I),I=1,NBMESU)
1035 FORMAT (1H,12,4I2,(T16,12F8.3))
CALL TEMPI (JOURA,MOISA,NANA,LHEURA,MINUTA,JOUR,MOIS,NAN,LHEUR,
1MINUT,LOPTE,TEMPS2,ITEST)
IF (ITEST.EQ.C) GO TO 35
PRINT 1040,JOUR,MOIS,NAN,LHEUR,MINUT
1040 FORMAT (1H0,5I4,33HDATE ANTERIEURE A LA DATE CF IGINE)
GO TO 200
35 DO 40 I=2,NBMESU
J=I-1
DZ(J)=Z(I)-Z(J)
DV(J)=((MESU(I)+MESU(J))/2)*DZ(J)
STOCK=STOCK+DV(J)
40 CONTINUE
IF(VTCPR.EQ.-100000.) GO TO 45
DSTOCK=STOCK-VTCPR
45 VTCPR=STOCK
I2=0
DO 60 J=1,NBV
V(J)=C.
I1=I2+1
I2=I2+K(J)
DO 50 L=I1,I2
50 V(J)=V(J)+DV(L)
IF(VPR(J).EQ.-100000.) GO TO 55
VAV(J)=V(J)-VPR(J)

```

```

360N-FC-479 3-8          MAINPGM          DATE 17/05/76          TIME 14.42.
55 VP*(J)=V(J)
60 CONTINUE
   TEMPS1=TEMPS2
   ITAB1(KOMPTF)=JOUR
   ITAB2(KOMPTE)=MCIS
   ITAB3(KOMPTC)=NAN
   TAB1(KOMPTE)=PLUIE
   TAB2(KOMPTE)=IRRIG
   TAB3(KOMPTE)=STOCK
   TAB4(KOMPTE)=DSTOCK
   DO 65 J=1,NBV
   TAB5(KOMPTE,J)=V(J)
   TAB6(KOMPTE,J)=VAV(J)
65 CONTINUE
   GO TO 20
100 PRINT 1065
1065 FORMAT (1F1,                                132H DATE
1PLUIE IRRIG  V(1) VAV(1)  V(2) VAV(2)  V(3) VAV(3)  V(4) VAV(4)
2)  V(5) VAV(5)  V(6) VAV(6)  V(7) VAV(7)
   DO 80 I=1,KOMPT
   PRINT 1080,(ITAB1(I),ITAB2(I),ITAB3(I),TAB1(I),TAB2(I),
1 ((TAB5(I,J),TAB6(I,J)),J=1,NBV))
1080 FORMAT (1H ,I2,2I3,1X,A4,2X,A4,      16F7.3,(T20,16F7.3))
80 CONTINUE
   PRINT 1100
1100 FORMAT (77H1          DATE          PLUIE (CM)          IRRIG (CM)          STOC
1K (CM3)  DSTOCK (CM3) //)
   PRINT 1200,(ITAB1(I),ITAB2(I),ITAB3(I),TAB1(I),TAB2(I),TAB3(I),
ITAB4(I),I=1,KOMPTF)
1200 FORMAT(1H ,3I4,11X,A4,11X,A4,2F15.3)
900 STOP
   END

```



Tableau 5

DATE			PLUIE (CM)	IRRIG (CM)	STOCK (CM <sup>3</sup> )	DSTOCK (CM <sup>3</sup> )
24	4	75	0.0		59.201	0.251
12	5	75	5.6		58.239	-0.962
23	5	75	0.1		53.381	0.142
28	5	75	0.6		57.755	-0.626
31	5	75	0.4	5.0	58.360	0.625
2	6	75	0.0		53.430	0.100
3	6	75	0.4	2.0	58.321	-0.159
4	6	75	0.0		59.163	0.042
5	6	75	0.0		59.525	0.363
6	6	75	0.0		59.905	0.379
9	6	75	0.0		59.390	-0.514
10	6	75	0.0		58.913	-0.577
11	6	75	0.0		58.609	-0.204
12	6	75	0.4		58.527	-0.081
13	6	75	0.0		58.470	-0.058
16	6	75	0.1		58.228	-0.241
17	6	75	0.1		57.533	-0.655
18	6	75	0.5		58.481	0.948
20	6	75	0.0		58.241	-0.240
23	6	75	0.1		59.130	0.888
24	6	75	0.1		58.966	-0.164
25	6	75	0.0		59.154	0.188
26	6	75	0.0		58.736	-0.418
30	6	75	0.1		59.166	0.420
1	7	75	0.0		58.215	-0.951
2	7	75	0.0		58.224	0.009
3	7	75	0.0		58.762	0.528
4	7	75	0.1		58.613	-0.149
7	7	75	2.2		58.758	0.145
8	7	75	0.0		58.858	0.100
11	7	75	0.7		58.837	-0.021
15	7	75	0.1		57.808	-1.029
17	7	75	0.0		59.249	1.441
21	7	75	0.9		58.755	-0.494
22	7	75	0.1		58.546	-0.209
23	7	75	0.0		58.298	-0.248
24	7	75	0.0		57.929	-0.370
28	7	75	0.0		57.549	-0.379
30	7	75	0.0		57.015	-0.534
30	7	75	0.0	18.0	60.402	3.387
31	7	75	0.0		59.409	-0.993
4	8	75	0.0		58.678	-0.721
6	8	75	0.03		58.453	-0.226
9	8	75	0.45		57.574	-0.879
11	8	75	0.0		56.991	-0.583
13	8	75	0.02		56.415	-0.576
18	8	75	0.54		56.876	0.460
20	8	75	0.3		56.085	-0.790
23	8	75	1.07		56.432	0.346
25	8	75	0.01	25.0	56.038	-0.394
26	8	75	0.01	5.0	59.479	3.441
27	8	75	0.01		59.484	0.005
28	8	75	0.00		59.048	-0.436
29	8	75	0.0		58.331	-0.717
1	9	75	0.0		58.903	0.572
3	9	75	0.74		58.627	-0.276
5	9	75	0.01		58.459	-0.169
8	9	75	0.01		57.946	-0.513
10	9	75	0.0		57.674	-0.272
13	9	75	0.92		57.900	0.227
17	9	75	1.66		58.247	0.347
19	9	75	3.84		60.019	1.772
23	9	75	0.06		53.983	-1.037
25	9	75	0.0	0.7	58.521	-0.461
27	9	75	1.16		59.581	1.059
29	9	75	1.46		60.838	1.257
10	10	75	0.76		60.233	-0.555
15	10	75	1.82		60.285	0.002



Au début et à la fin de cette campagne de mesures, c'est-à-dire au printemps et au début de l'automne, la teneur en eau dans la partie superficielle du terrain est comprise entre 20 et 23%. Elle croît jusqu'à 37% entre 50 et 80 cm, puis est à nouveau voisine de 19% à 2 m 20. Il y a une évidente corrélation avec la coupe du sol : la zone de forte teneur en eau correspond à la couche argileuse, les zones de moindre teneur étant formées des sables fins et grossiers.

On constate que l'amplitude des variations de teneur en eau est appréciable dans les quarante premiers centimètres de sol, mais qu'au-dessous de cette cote elle est très faible.

Cette amplitude calculée entre les profils établis, l'un le 30-7 au soir après un apport d'eau important, l'autre le 13-8 (ce profil étant un des profils de teneurs minimales mesurées), est la suivante :

à la surface	:	≈ 8%
à 20 cm	:	≈ 6,5%
à 40 cm	:	≈ 3,5%
à 60 cm	:	≈ 2,5%
à 80 cm	:	≈ 0,5%
à 100 cm	:	≈ 0,5%
à 120 cm	:	≈ 0,8%
à 150 cm	:	≈ 0,7%
à 2 m	:	≈ 1,5%
à 2 m 20	:	≈ 1,5%

Nous donnons, dans les pages suivantes, un certain nombre de profils hydriques établis au cours de la période d'expérimentation.

C

MAI

```

DIMENSION TITRE(10),SGR(4),DPTCCM(8),LIEUCI(8),IRRIG(5),DATIRI(5)
DIMENSION TEXTEY(4),TEXTEX(5),TEXTIX(5),KS(10),T(10),DT(10),
1 VAL(40),DY(40)
DIMENSION JBLF(100)
DATA JLEC,JIMP,CC,SI/1,3,1.,0./
DATA TEXTEY/'PROF','CNCE','UR E','N CM'/
DATA T/2.,0.3,0.,0.3,0.,0.3,0.,0.8,0.8,0./
DATA DT/0.,0.2,0.2,0.2,0.2,0.3,0.2,0.2,0.2,0.4/
DATA KS/1,2,3,1,2,3,1,2,3,1/
NBTRA=C
JBLCC=1
RFAD(JLEC,1020) TITRE1
READ(JLEC,1020)SGR,DPTCCM,LIEUCI
1020 FORMAT(2CA4)
RFAD 1025,NBDY,(DY(I),I=1,NBDY)
1025 FORMAT(15,(16,15F5.0))
READ(JLEC,1030)YMIN,YMAX,NINTY,XMIN,XMAX,NINTX,XIMIN,XIMAX
1030 FORMAT(3(2F10.0,I5))
READ(JLEC,1020,END=300)TEXTEX,TEXTIX
CALL IDENA(JBLF,100,19,100,70)
CALL PNUMA(5.,5.,JBLCC,0.,0.)
CALL BFCENA(-1.,-1.5,0.9,0.20,0.20,1.,0.)
DIMX=27.5
DIMY=16.
ECHX=DIMX/(XMAX-XMIN)
ECHY=DIMY/(YMAX-YMIN)
YINT=(YMAX-YMIN)/NINTY
XINT=(XMAX-XMIN)/NINTX
XIINT=(XIMAX-XIMIN)/NINTX
CALL FCHEL(ECHX,ECHY,-XMIN*ECHX,-YMIN*ECHY)
50 NBCOL=C
NBCOT=C
READ(JLEC,1020,END=300)IRRIG,DATIRI
TRACE DES AXES.
C
60 CALL TRAS(XMIN,YMIN,0)
Y=YMIN
DO 70 I=1,NINTY
Y=Y+YINT
70 CALL BFCENS(XMIN,Y,1,2,0.15,0.10,CC,SI)
X=XMIN
DO 75 I=1,NINTX
X=X+XINT
75 CALL BECENS(X,YMAX,1,1,0.10,0.15,CC,SI)
Y=YMAX
DO 80 I=1,NINTY
Y=Y-YINT
80 CALL BECENS(XMAX,Y,1,4,0.15,0.10,CC,SI)
X=XMAX
DO 85 I=1,NINTX
X=X-XINT
85 CALL BFCENS(X,YMIN,1,3,0.10,0.15,CC,SI)
Y=YMIN
CALL NCNBS(XMIN-0.6/ECHX,YMIN,0,Y,-1,0.15,0.20,CC,SI)
DO 90 I=1,NINTY
Y=Y+YINT

```

```
3ECN-FO-479 3-8          MAINFGM          DATE 27/01/76          TIME C6.35.56

90 CALL NCMB5(XMIN-C.6/ECHX,Y,0,Y,-1,0.15,0.20,CC,SI)
   CALL PCARA(C,4,DIMY-4.C,0,TEXTEY,16,0.20,0.20,SI,CD)          TEXTE Y
   DECAx=C.2/ECHX
   DECAy=C.2/ECHY
   X=XMIN
   CALL NCMB5(XMIN-DECAx,YMAX+DECAy,0,X,1,0.15,0.20,CD,SI)
   DO 95 I=1,NINTX
   X=X+XINT
95 CALL NCMB5(X-DECAx,YMAX+DECAy,0,X,1,0.15,0.20,CC,SI)
   CALL PCARA(DIMX-3.0,DIMY-0.4,0,TEXTEX,12,0.20,C.20,CD,SI)          TEXTE X
   CALL NCMB5(XMAX+DECAx,YMAX,0,YMAX,-1,0.15,0.20,CC,SI)
   Y=YMAX
   DO 100 I=1,NINTY
   Y=Y-YINT
100 CALL NCMB5(XMAX+DECAx,Y,0,Y,-1,0.15,0.20,CC,SI)
   CALL PCARA(DIMX-3.,-0.5,0,TEXTIX,12,0.20,0.20,CC,SI)          TEXTIX
   DECAx=C.30/ECHX
   DECAy=C.25/ECHY
   X=XMAX
   XI=XIMAX
   CALL NCMB5(XMAX-DECAx,YMIN-DECAy,0,XI,1,0.15,0.20,CD,SI)
   DO 105 I=1,NINTX
   XI=XI-XIINT
   X=X-XINT
105 CALL NCMB5(X-DECAx,YMIN-DECAy,0,XI,1,0.15,0.20,CC,SI)
150 READ(JLEC,1150,END=200)JCUR,MCIS,IAN,(VAL(I),I=1,NBDY)
150 FORMAT(3I2,(121,12F5.0))
   IDEB=C
160 IDEB=IDEB+1
   IF(IDEB.GT.NBDY)GC TC 150
   YP=DY(IDEB)
   XP=VAL(IDEB)
   IF(XP.LT.XMIN.OR.XP.GT.XMAX)GC TC 160
   CALL TRAS(XP,YP,0)
   NBCCL=NBCCL+1
   NBCCT=NBCCT+1
   IF(IDEB.GE.NBDY)GC TC 150
   IDEB=IDEB+1
   DO 180 I=IDEB,NBDY
   Y=DY(I)
   VALX=VAL(I)
   IF(VALX.LT.XMIN.OR.VALX.GT.XMAX)GC TC 175
   IF(NBCCL.LT.11)GC TC 170
   NBCCL=1
170 CALL MCRSE(XP,YP,VALX ,Y,T(NBCCU),DT(NBCCU),KS(NBCCU),ECHX,ECHY)
   XP=VALX
   YP=Y
   GC TO 180
175 PRINT 1175,JCUR,MCIS,IAN,(VAL(I),I=1,NBDY)
175 FORMAT(15H VALFLRS HORS CADRE,3I4,2F10.2)
180 CONTINUE
   Y=YMIN+(C.5*NBCCT)/ECHY
   CALL MCRSE(XMIN+0.5/ECHX,Y,XMIN+2./ECHX,Y,T(NBCCU),DT(NBCCU),
1KS(NBCCU),ECHX,ECHY)
   CALL NCMB5(C.2,C.,2,FLCAT(JCUR),C,0.10,0.20,CD,SI)
   CALL NCMB5(C.,C.,2,FLCAT(MCIS),0,0.10,0.20,CD,SI)
```

W IV 36CN-FQ-479 3-8

MAINFGM

DATE 27/01/76

TIME C6

```
CALL NCMB(A(C.,C.,2,FLCAT(IAN),-1,0.10,0.20,CG,SI))
GC TO 150
200 CALL PNLMA(C.,DIMY,JBLCC,0.,0.)
CALL PCARA(C.,1.,0,LIELLI,32,0.20,0.25,CG,SI)
CALL PCARA(C.,1.5,0,DPICCN,32,0.20,0.25,CC,SI)
CALL PCARA(C.,2.0,0,SGR,16,0.20,0.25,CC,SI)
CALL PCARA(7.,2.0,0,TIFREI,40,0.30,0.60,CG,SI)
C CALL PCARA(21.,1.5,0,IFRIG,20,0.20,0.25,CC,SI)
C CALL PCARA(21.,1.0,0,DATIRI,20,0.20,0.25,CC,SI)
CALL BECCNA(DIMX+1.,3.5,0,9,0.20,0.20,CC,SI)
CALL TRAA(DIMX+C.75,3.,0)
CALL TRAA(DIMX+C.75,-DIMY-1.,1)
CALL TRAA(-C.75,-DIMY-1.,1)
CALL TRAA(-C.75,3.,1)
CALL TRAA(DIMX+C.75,3.,1)
NBTRA=NBTRA+1
GO TO (211,211,213),NBTRA
211 CALL PNLMA(C.,5.,JBLCC,0.,0.)
GC TO 50
213 CALL PNLMA(DIMX+2.,-3*DIMY-10.,JELCC,0.,0.)
NBTRA=C
GC TO 50
200 JBLCC=999
CALL PNLMA(C.,C.,JBLCC,0.,0.)
STOP
END
```

Figure 3a

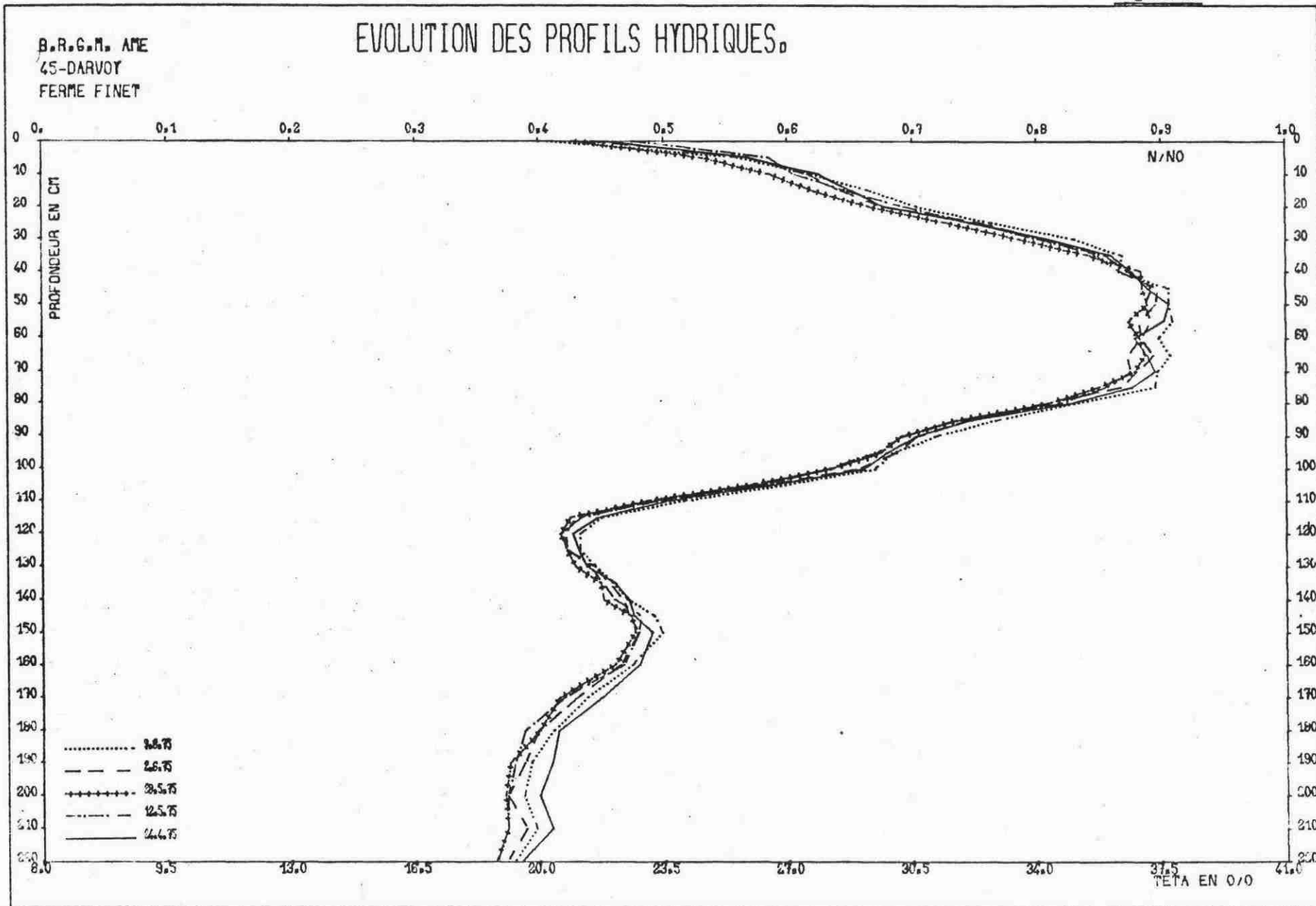


Figure 3b

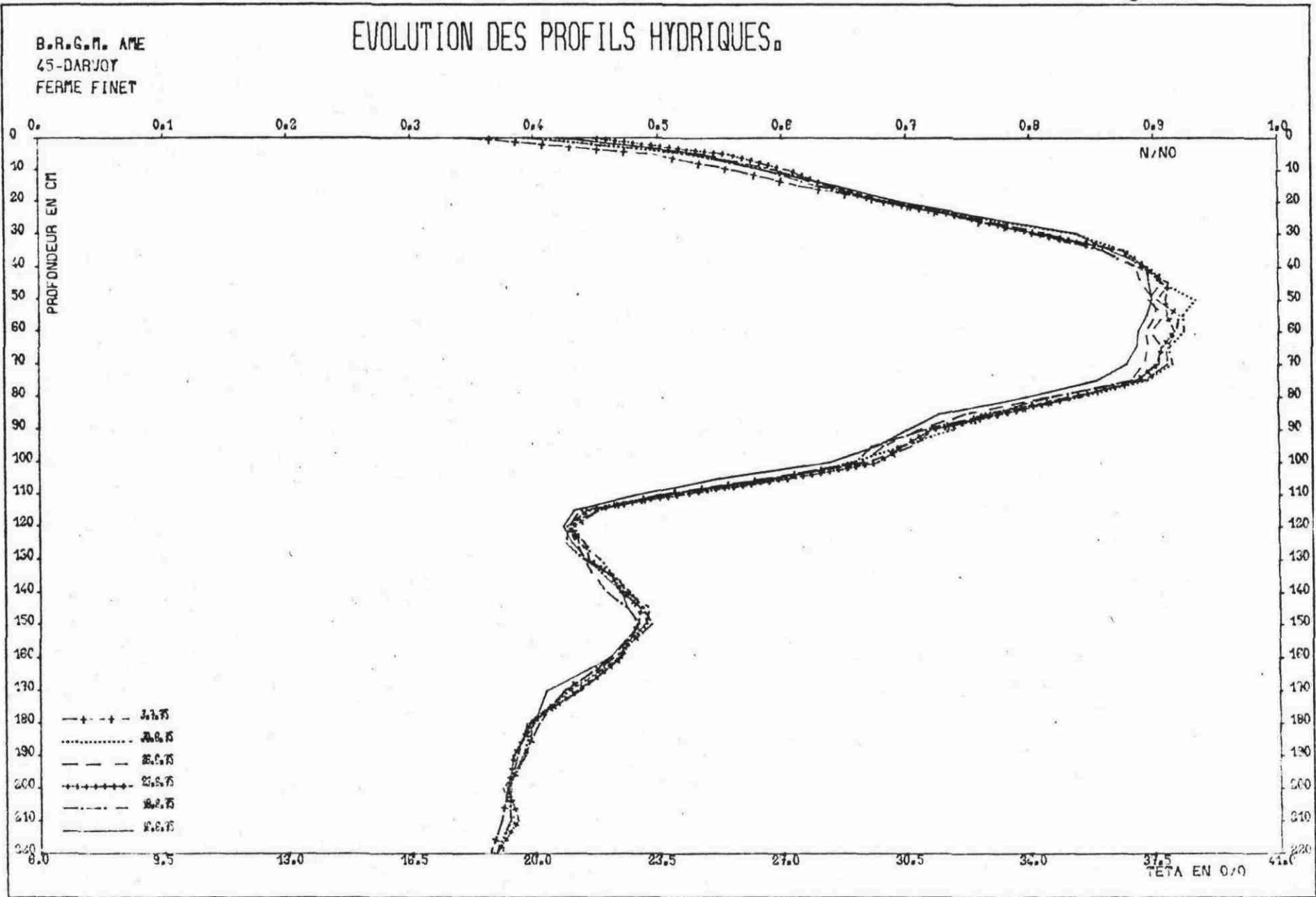


Figure 3c

B.R.G.M. AME  
45-DARVOY  
FERME FINET

# EVOLUTION DES PROFILS HYDRIQUES

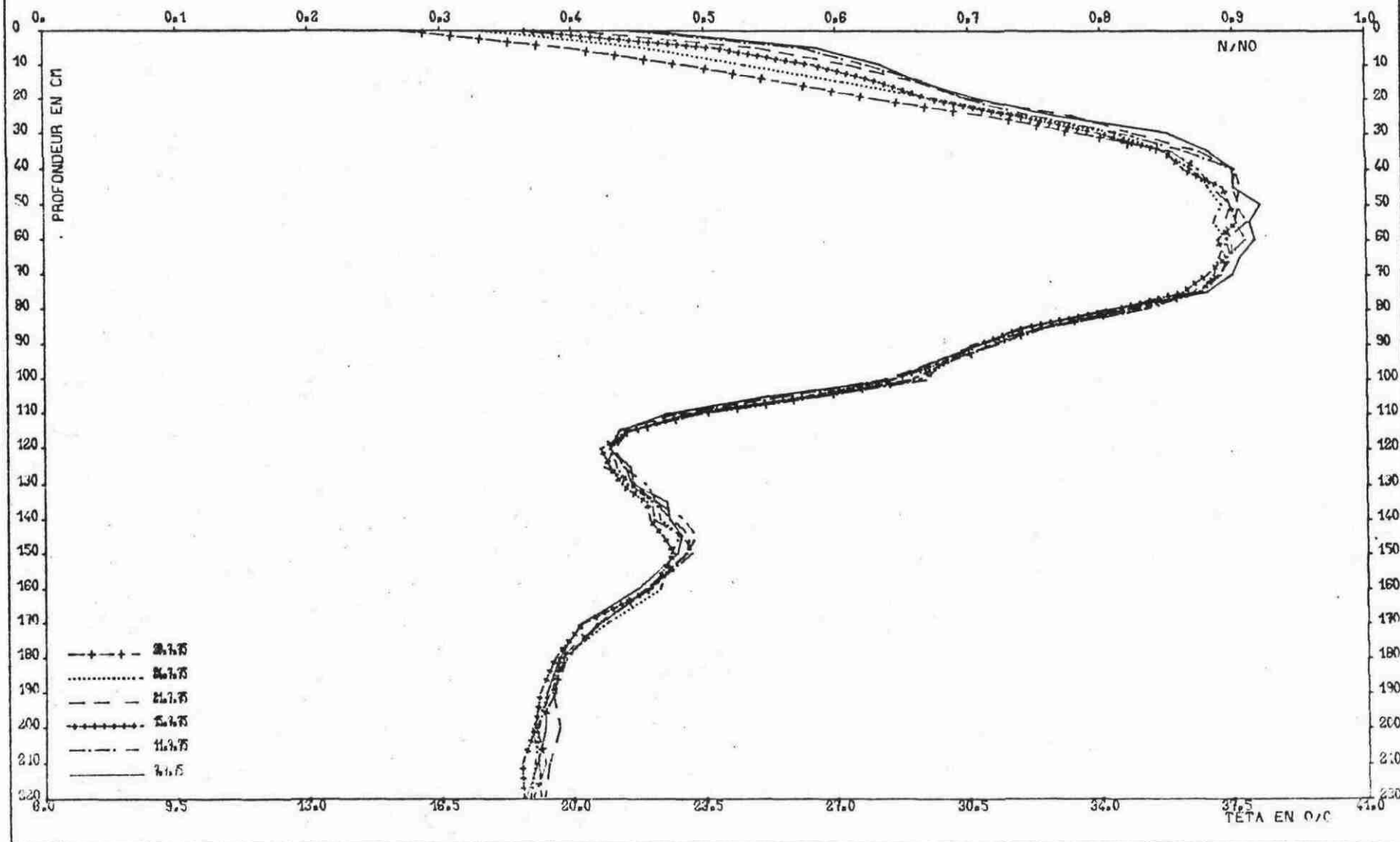


Figure 3d

B.R.G.M. AME  
45-DARVOY  
FERME FINET

# EVOLUTION DES PROFILS HYDRIQUES

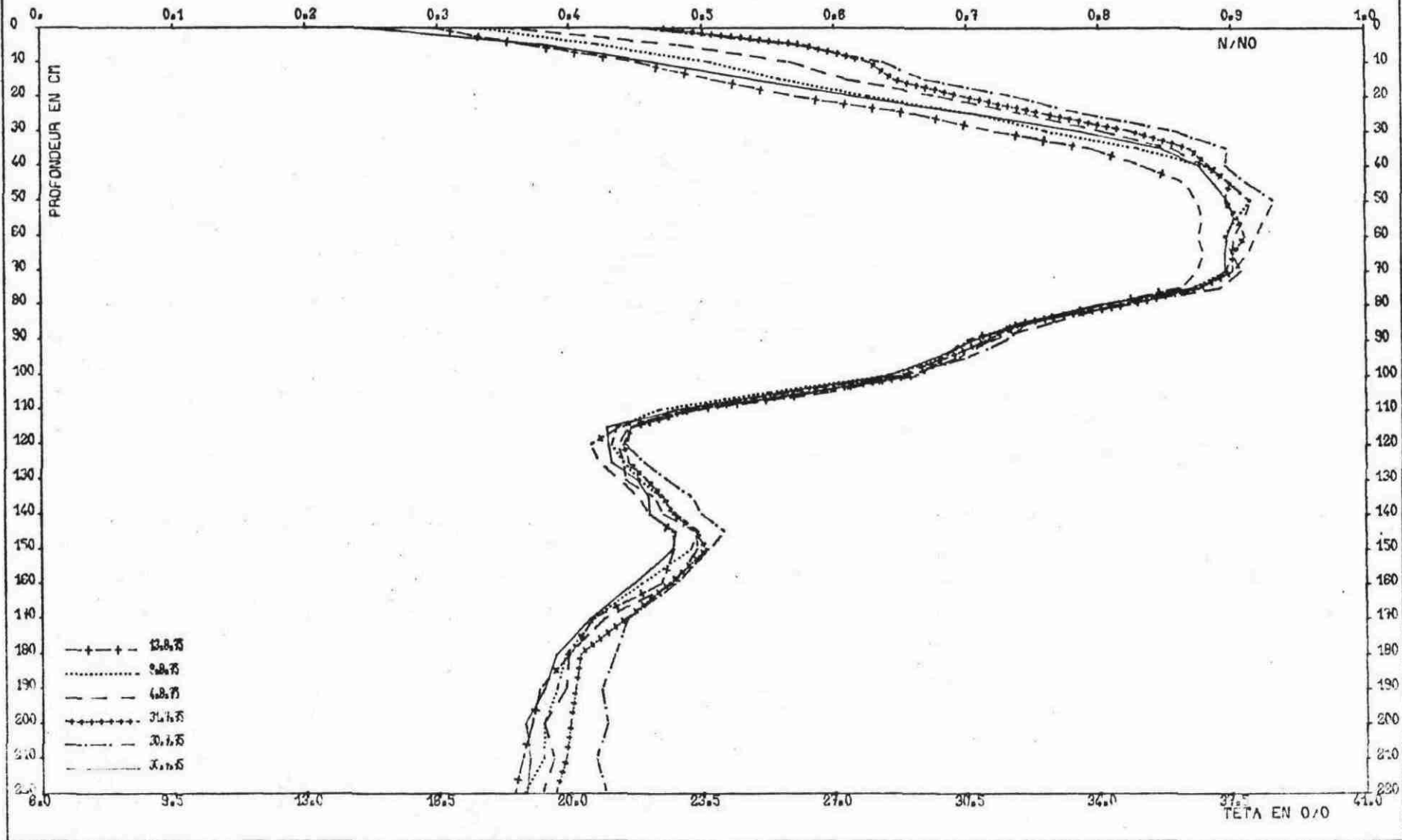




Figure 3e

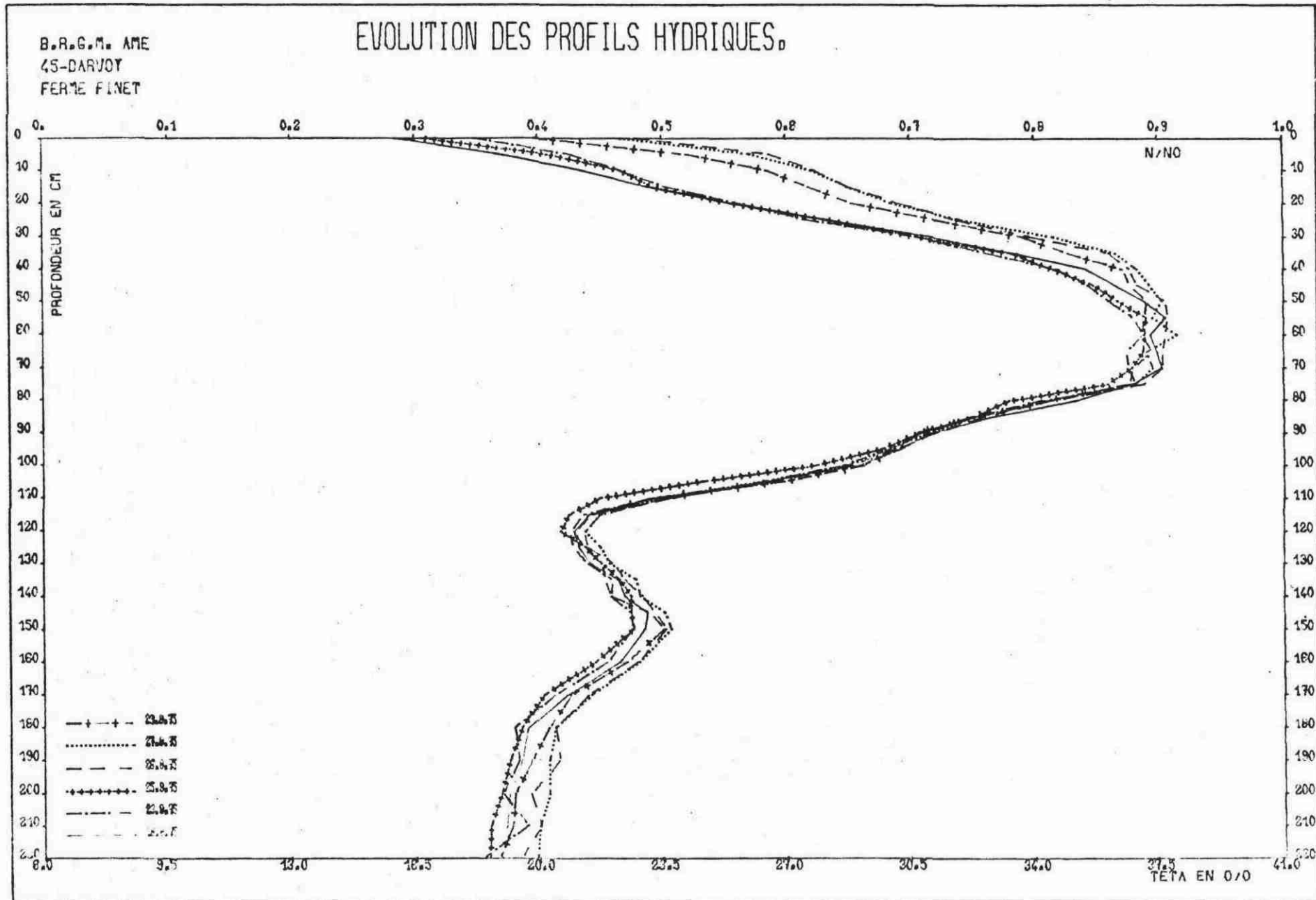


Figure 3f

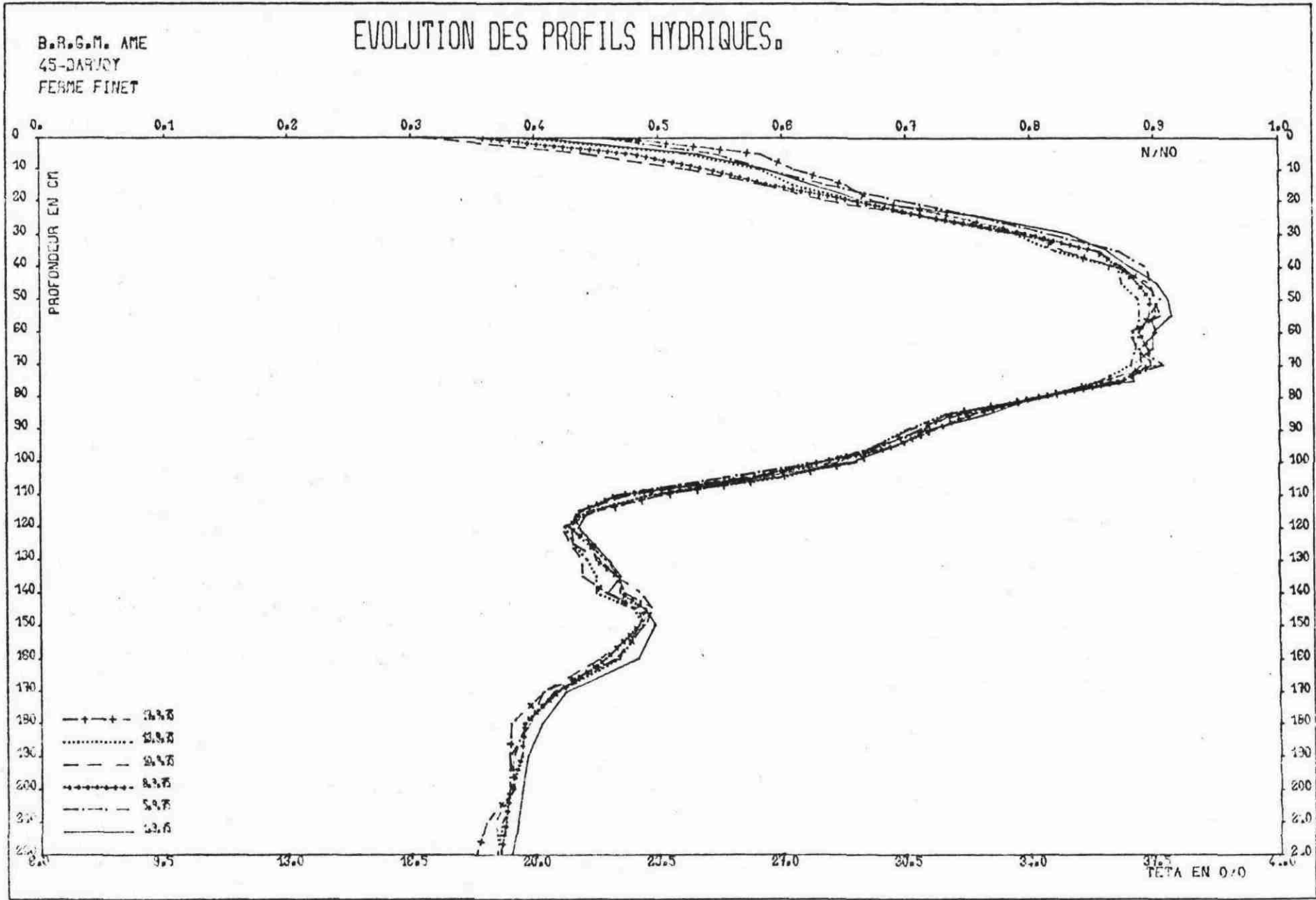
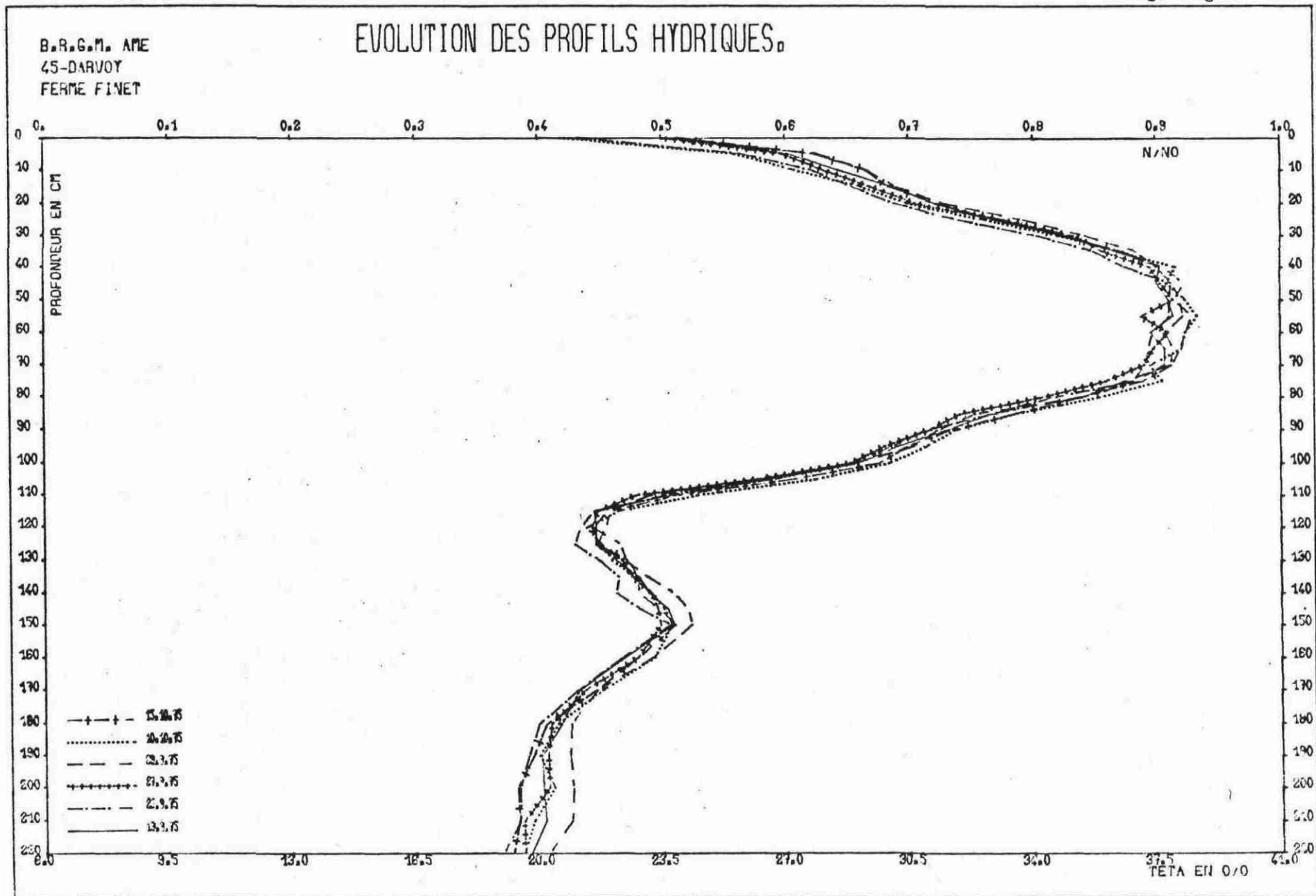


Figure 3g



### 3.4.1.3. Discussion des résultats

L'observation des profils hydriques établis l'un le 30-7-1975 à 10 h avant irrigation, l'autre le 30-7-1975 à 19h (figure 3d), montre une augmentation de teneur en eau tout le long du profil. Ceci tend à prouver que l'eau s'infiltré très vite dans ce terrain.

Le 30-7-1975, l'apport d'eau sur la parcelle est de 720 l. On observe qu'il s'infiltré 500 litres en 45 minutes, puis qu'il reste environ 3 cm sur la parcelle.

Or, le calcul de la variation du stock d'eau dans un parallépipède de 4 m<sup>2</sup> sur 2 m 20, entre le 30-7 au matin et le 30-7 au soir indique une variation de volume de 135 litres.

Il semble donc qu'une grande partie de l'eau apportée serait inefficace pour la tranche de terrain comprise entre la surface et la cote 2 m 20. Une faible partie de l'eau se déplacerait par les pores en période estivale, tandis que la majeure partie se déplacerait par des fissures. Ces fissures et fentes très nombreuses sont visibles à la surface de la parcelle dès le mois de juin. Ce phénomène est très gênant car il rend difficile l'application des lois de l'écoulement dans les milieux poreux à l'ensemble du volume d'expérience.

### 3.4.2. Mesure des succions

#### 3.4.2.1. Mesure des gradients de potentiel et détermination du sens de l'écoulement

Le programme "SUCRE" a été mis au point pour permettre le calcul, à partir des mesures enregistrées à la sortie des tensiomètres, des succions, des potentiels, des gradients de potentiel. En outre, il indique le sens de l'écoulement, ce dernier étant déduit du signe du gradient de potentiel.

Ce programme comporte trois options, correspondant à trois modes de lecture des données :

- utilisation d'un appareillage scanivalve avec un seul capteur de pression et enregistrement des mesures sur papier. Les données sont lues sur cartes perforées.
- utilisation de plusieurs capteurs placés dans le terrain et enregistrement des mesures sur bandes magnétiques. Les mesures sont reportées sur cartes perforées pour être introduites dans le programme "SUCRE".
- utilisation de plusieurs capteurs placés dans le terrain et enregistrement sur bande magnétique. Les lectures des données pour le programme "SUCRE" se font directement sur fichier disque.

C'est cette dernière option qui était choisie pour cette étude.

On donne en page 41 le programme "SUCRE" et à la suite du programme un exemple des renseignements fournis à la sortie.

#### 3.4.2.2. Profils de potentiel

Les profils de potentiel sont tracés automatiquement par le programme "MAIS".

Nous donnons ci-après, en exemple, un certain nombre de profils, lesquels sont relevés à 16 h. On constate que le tracé ne débute qu'à 60 cm à partir du 5 juin : ceci est dû au fait qu'à cette date le capteur situé à 20 cm dans le sol ne donne plus de signal. Il n'a pas été possible d'établir des profils de potentiel au-delà du 25 août, d'autres capteurs s'étant révélés défectueux à partir de cette date.

IV 360N-FO-479 3-8                    MAINPGM                    DATE 29/09/79                    TIME 18.14.

```

C
DIMENSION H(30),Z(30),SUC(30),DZ(30),GRA(30),SENS(30),POT(30)
DIMENSION LETIT(20),PPO(10),IPOT(30)
DIMENSION JABEL9(32),ENREG(28),NBJOMO(12)
COMMON/DISQUE/JZONE,ZONE(4800)
DATA SENS1,SENS2,SENS3/'INF.', 'EQUI', 'EVAP'/
DATA LFC,IMP/1.3/
DATA NBJOMO/31,28,31,30,31,30,31,31,30,31,30,31/
JZONE=4800
NFICH9=9
READ 1005,LETIT,NBMESU,{Z(I),I=1,NBMESU}
1005 FORMAT (20A4, / 15, (T6,15F5.0))
PRINT 1020, LETIT, {Z(I),I=1,NBMESU}
1020 FORMAT (1H1,20X,20A4///(1H,23X,10F10.0))
READ 1030,LOPTIO,IPERF
1030 FORMAT(2I5)
IF(IPERF.EQ.1) PUNCH 1035
1035 FORMAT('PROGRAMME SUCRE. DEBUT DES CARTES PERFOREES.')
DO 20 I=2,NBMESU
J=I-1
20 DZ(J)=Z(I)-Z(J)
NBGRA=NBMESU-1
IF(LOPTIO-2) 40,60,100

```

C  
C    LOPTIO =1    LECTURE DES DONNEES SUR CARTES

```

C
40 READ(LEC.1040,END=550)JOUR,MOIS,NAN,LHEUR,MINUT,DIST,{H(I),I=1,
1 NBMESU}
1040 FORMAT(5I2,(T11,14F5.0))
DO 50 I=1,NBMESU
SUC(I)=H(I)-DIST-Z(I)
POT(I)=-SUC(I)-Z(I)
50 IPOT(I)=POT(I)+0.5
GO TO 200

```

C  
C    LOPTIO=2 LECTURE SUR CARTES A PARTIR DES MESURES SOPHIS.

```

C
60 READ(LEC.1040,END=550)JOUR,MOIS,NAN,LHEUR,MINUT,{PPO(I),
1 I=1,NBMESU}
GO TO 145

```

C  
C    LOPTIO = 3    LECTURE SUR FICHER DISQUE.

```

C
100 READ 1100,JABEL9(1),JABEL9(2),NOGIF9,NOBOB,IPDEB,IPAS
1100 FORMAT(2A4,2X,4I5)
CALL OUVEFF(NFICH9,IP9,JABEL9,NOGIF9,LGENR9,0)
LP9=2
105 CALL LIREFF(NFICH9,LP9,81105,NUBOB,4,ENREG,16,NAN,4,MOIS,4,
1 JOUR,4,LHEUR,4,MINUT,4,LTEMPM,4,LTEMP9,4)
LTEMPA=LTEMPM*IPAS
LP9=LP9+1
CALL LIREFF(NFICH9,LP9,81115,ENREG,36,NBENRE,4,DHEUR,4,DMINUT,4)
IF(NOBOB.EQ.NUBOB) GO TO 120
LP9=LP9+5+NBENRE
GO TO 105
1105 PRINT 1110,NOBOB

```

V 360N-FQ-479 3-8                    MAINPGM                    DATE 29/09/79                    TIME 18.14.

```
1110 FORMAT( 7H BOBINE,13,12H NON TROUVEE)
      GO TO 500
1115 PRINT 1120,LP9
1120 FORMAT(34H LECTURE EN DEHORS DU FICHIER ,IP=,15)
      GO TO 500
120 IF(IPDEB.NE.1) MINUT = MINUT + (IPDEB-1)*LTEMPM
      IF((INAN-NAN/4*4).EQ.0) NBJOMO(2)=29
      IPDEB=LP9+3+IPDER
      IPPIN=LP9+3+NBBENRE
      IP=IPDEB
130 CALL LIREFF(NFICH9,IP,&1115,IETA,4,PP0(2),4,PP0(3),4,PP0(4),4,
1PP0(5),4,PP0(1),4)
      IF(IP.EQ.IPDEB) GO TO 132
      MINUT=MINUT+LTEMPA
132 LHEUR=LHEUR+MINUT/60
      JOUR=JOUR+LHEUR/24
      IF(JOUR.LE.NBJOMO(MOIS)) GO TO 135
      JOUR=JOUR-NBJOMO(MOIS)
      MOIS=MOIS+1
      IF(MOIS.LE.12) GO TO 135
      MOIS=1
      NAN=NAN+1
135 LHEUR=LHEUR-(LHEUR/24*24)
      MINUT=MINUT-(MINUT/60*60)
140 IF(IETA.NE.0) GO TO 300
145 DO 150 I=1,NBMESU
      SUC(I)=PPO(I)*10.
      POT(I)=-SUC(I)-Z(I)
150 IPOT(I)=POT(I)+0.5
200 CONTINUE
      DO 220 I=2,NBMESU
      J=I-1
220 GRA(J)=(POT(I)-POT(J))/DZ(J)
      DO 250 I=1,NBGRAS
      IF(GRA(I)) 230,235,240
230 SENS(I)=SENS1
      GO TO 250
235 SENS(I)=SENS2
      GO TO 250
240 SENS(I)=SENS3
250 CONTINUE
      PRINT 1260, JOUR,MOIS,NAN,LHEUR,MINUT,(SUC(I),I=1,NBMESU)
1260 FORMAT(1H0,2(I2,'/'),I2,I3,'H',I2,' SUCCIONS ',10F10.2)
      PRINT 1262,(POT(I),I=1,NBMESU)
1262 FORMAT(1H ,15X,'POTENTIELS',10F10.2)
      PRINT 1264,(GRA(I),I=1,NBGRAS)
1264 FORMAT(1H ,15X,'GRADIENTS ',F14.2,9F10.2)
      PRINT 1266,(SENS(I),I=1,NBGRAS)
1266 FORMAT(1H ,15X,'SENS',10X,10(6X,A4))
      IF (IPERF.EQ.1)PUNCH 1261,JOUR,MOIS,NAN,LHEUR,MINUT,
1 IPOT(I),I=1,NBMESU)
1261 FORMAT(5I2,(T2),12I5))
      IF(LOPTIO-2) 40,60,300
300 IP=IP+IPAS
      IF(IP.LE.IPPIN) GO TO 130
500 CALL FERFFF(NFICH9,'SAUV',JABEL9)
```

TV 360N-FO-479 3-8

MAINPGM

DATE 29/09/75

TIME 18.14.

```
550 IF(IPERF.EQ.1) PUNCH 1550
1550 FORMAT('PROGRAMME SUCRE. FIN DES CARTES PERFOREES.')
```

STOP  
END



## STATISTIQUE EXPERIMENTALE DE DARVOY CALCUL DES GRADIENTS DE POTEN

			20.	60.	80.	100.	120.
5/75	CF35	SUCCIONS	8.00	142.10	70.00	29.16	141.67
		POTENTIELS	-28.00	-202.10	-150.00	-129.16	-261.67
		GRADIENTS	-4.35	2.61	1.04	-6.63	
		SENS	INF.	EVAP	EVAP	INF.	
5/75	12F35	SUCCIONS	-40.00	142.10	77.78	29.16	125.00
		POTENTIELS	20.00	-202.10	-157.78	-129.16	-245.00
		GRADIENTS	-5.55	2.22	1.43	-5.79	
		SENS	INF.	EVAP	EVAP	INF.	
5/75	CF35	SUCCIONS	16.00	150.00	85.56	29.16	166.67
		POTENTIELS	-36.00	-210.00	-165.56	-129.16	-286.67
		GRADIENTS	-4.35	2.22	1.82	-7.88	
		SENS	INF.	EVAP	EVAP	INF.	
5/75	12F35	SUCCIONS	8.00	150.00	85.56	29.16	166.67
		POTENTIELS	-28.00	-210.00	-165.56	-129.16	-286.67
		GRADIENTS	-4.55	2.22	1.82	-7.88	
		SENS	INF.	EVAP	EVAP	INF.	
5/75	CF35	SUCCIONS	40.00	157.89	85.56	21.87	141.67
		POTENTIELS	-60.00	-217.89	-165.56	-121.87	-261.67
		GRADIENTS	-3.95	2.62	2.18	-6.99	
		SENS	INF.	EVAP	EVAP	INF.	
5/75	12F35	SUCCIONS	32.00	157.89	93.33	14.58	141.67
		POTENTIELS	-52.00	-217.89	-173.33	-114.58	-261.67
		GRADIENTS	-4.15	2.23	2.94	-7.35	
		SENS	INF.	EVAP	EVAP	INF.	
6/75	CF35	SUCCIONS	72.00	165.79	93.33	14.58	175.00
		POTENTIELS	-92.00	-225.79	-173.33	-114.58	-295.00
		GRADIENTS	-3.34	2.62	2.94	-9.02	
		SENS	INF.	EVAP	EVAP	INF.	
6/75	12F35	SUCCIONS	-72.00	134.21	93.33	14.58	100.00
		POTENTIELS	52.00	-194.21	-173.33	-114.58	-220.00
		GRADIENTS	-6.16	1.0+	2.94	-5.27	
		SENS	INF.	EVAP	EVAP	INF.	
6/75	CF35	SUCCIONS	56.00	157.89	93.33	21.87	183.33
		POTENTIELS	-76.00	-217.89	-173.33	-121.87	-303.33
		GRADIENTS	-3.55	2.23	2.57	-9.07	
		SENS	INF.	EVAP	EVAP	INF.	
6/75	12F35	SUCCIONS	-8.00	150.00	101.11	21.87	141.67
		POTENTIELS	-12.00	-210.00	-181.11	-121.87	-261.67
		GRADIENTS	-4.95	1.44	2.96	-6.99	
		SENS	INF.	EVAP	EVAP	INF.	
6/75	CF35	SUCCIONS	8.00	165.79	93.33	21.87	200.00
		POTENTIELS	-28.00	-225.79	-173.33	-121.87	-320.00
		GRADIENTS	-4.94	2.62	2.57	-9.91	
		SENS	INF.	EVAP	EVAP	INF.	
6/75	12F35	SUCCIONS	-32.00	150.00	93.33	21.87	150.00
		POTENTIELS	12.00	-210.00	-173.33	-121.87	-270.00

Figure 5a

B R G M A M E  
45 DARVOY  
FERME FINET

# EVOLUTION DES PROFILS DE POTENTIEL

(Profils mesurés à 16 h)

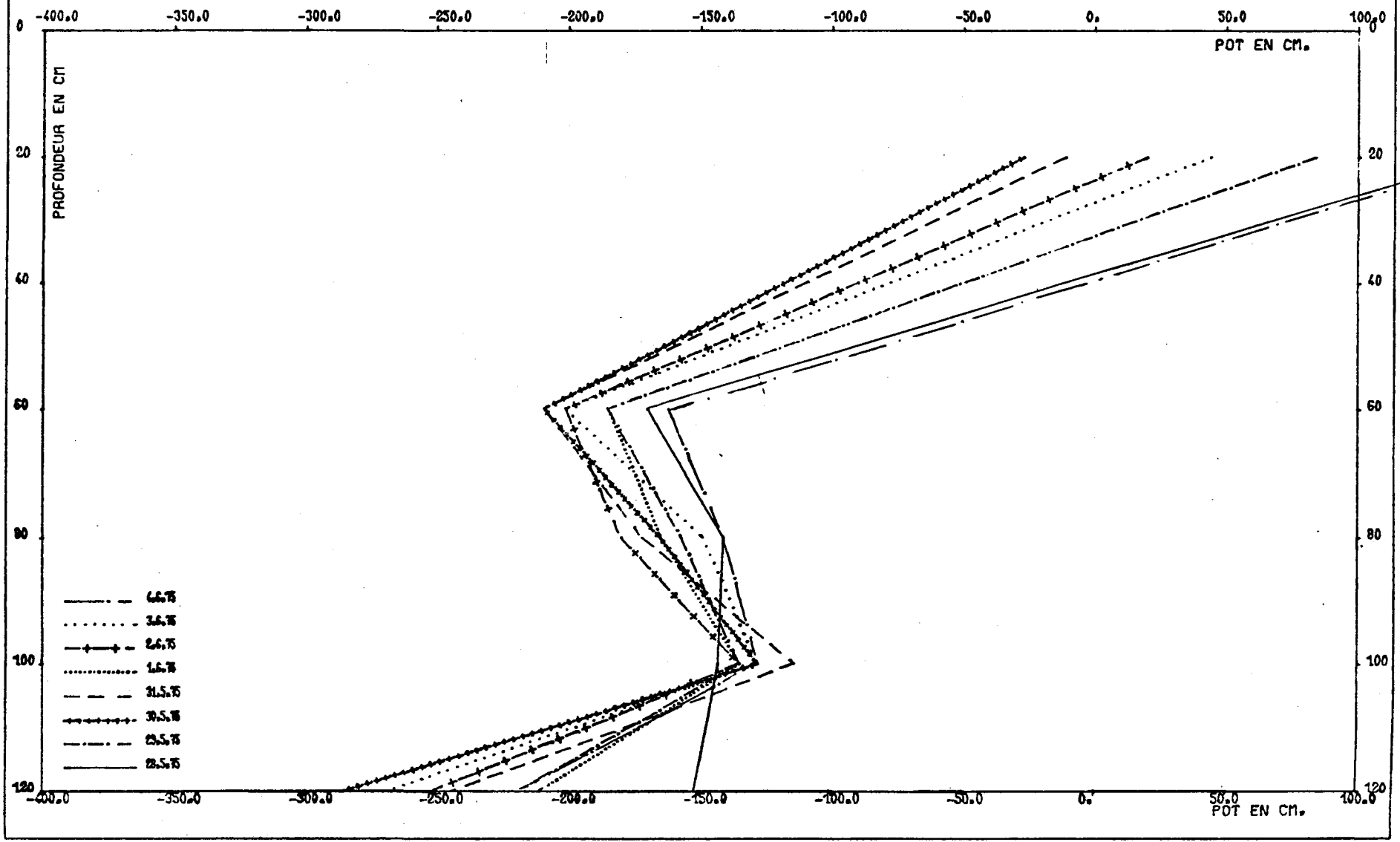


Figure 5b

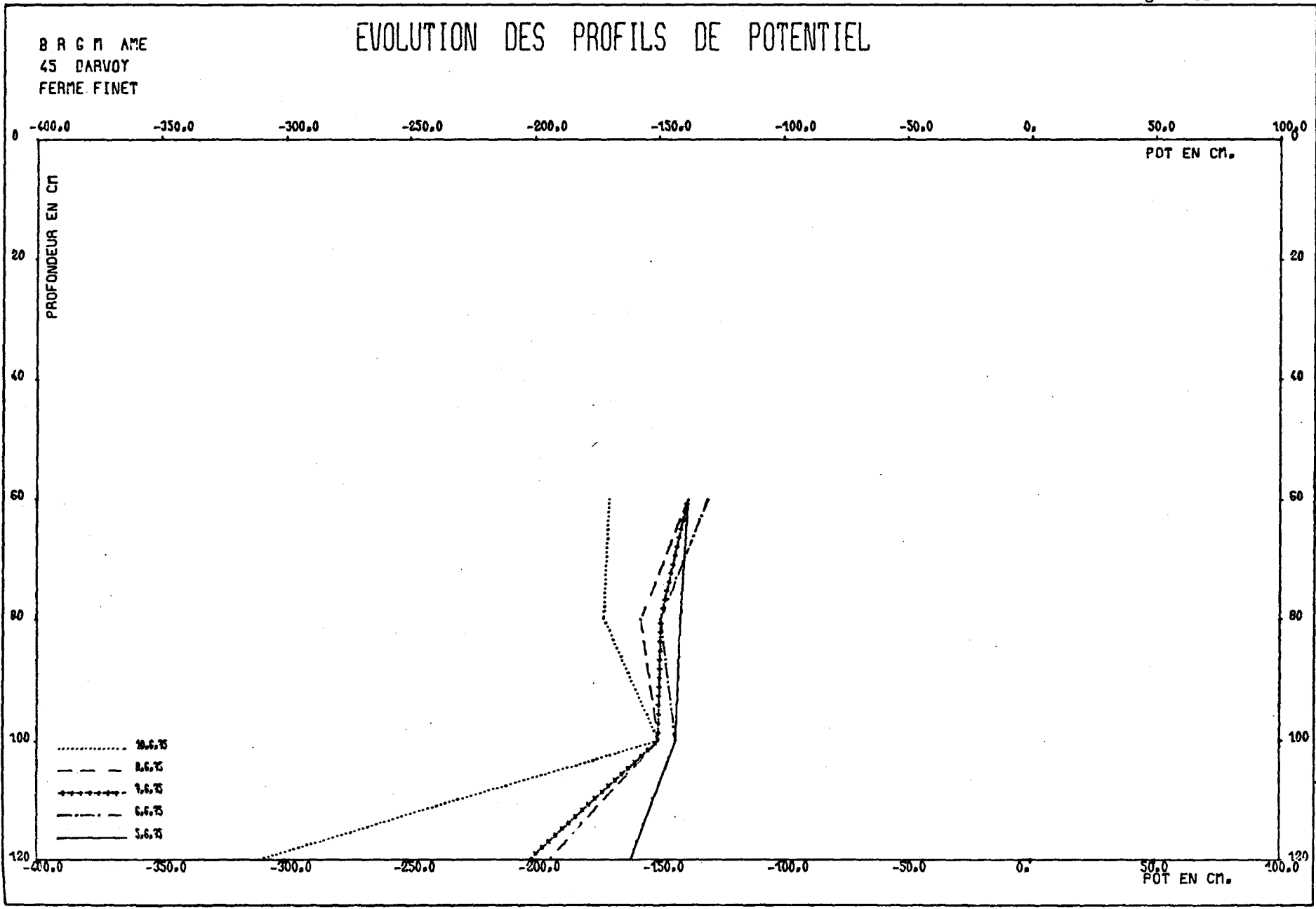
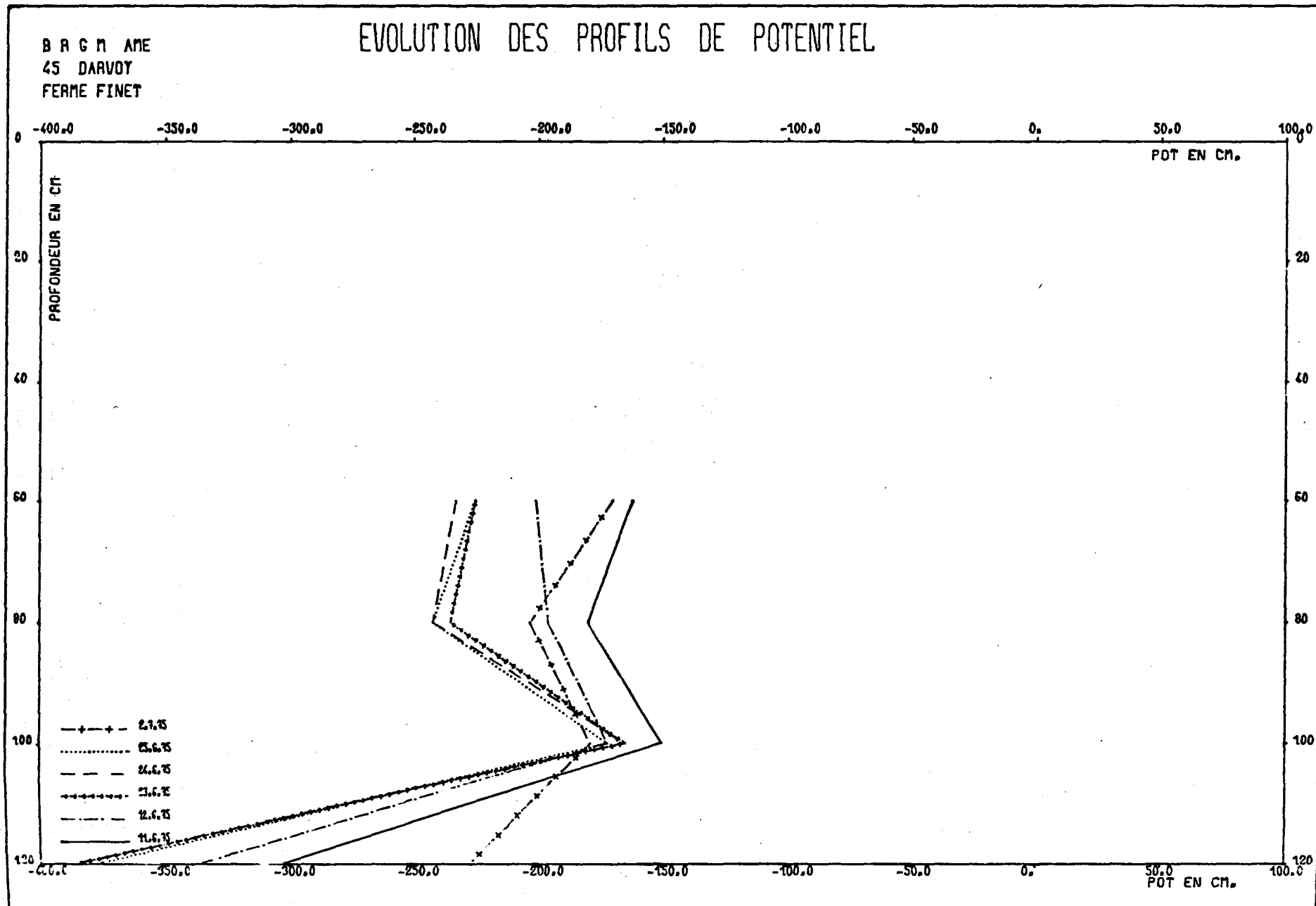


Figure 5c



B R G M A M E  
45 DARVOY  
FERME FINET

# EVOLUTION DES PROFILS DE POTENTIEL

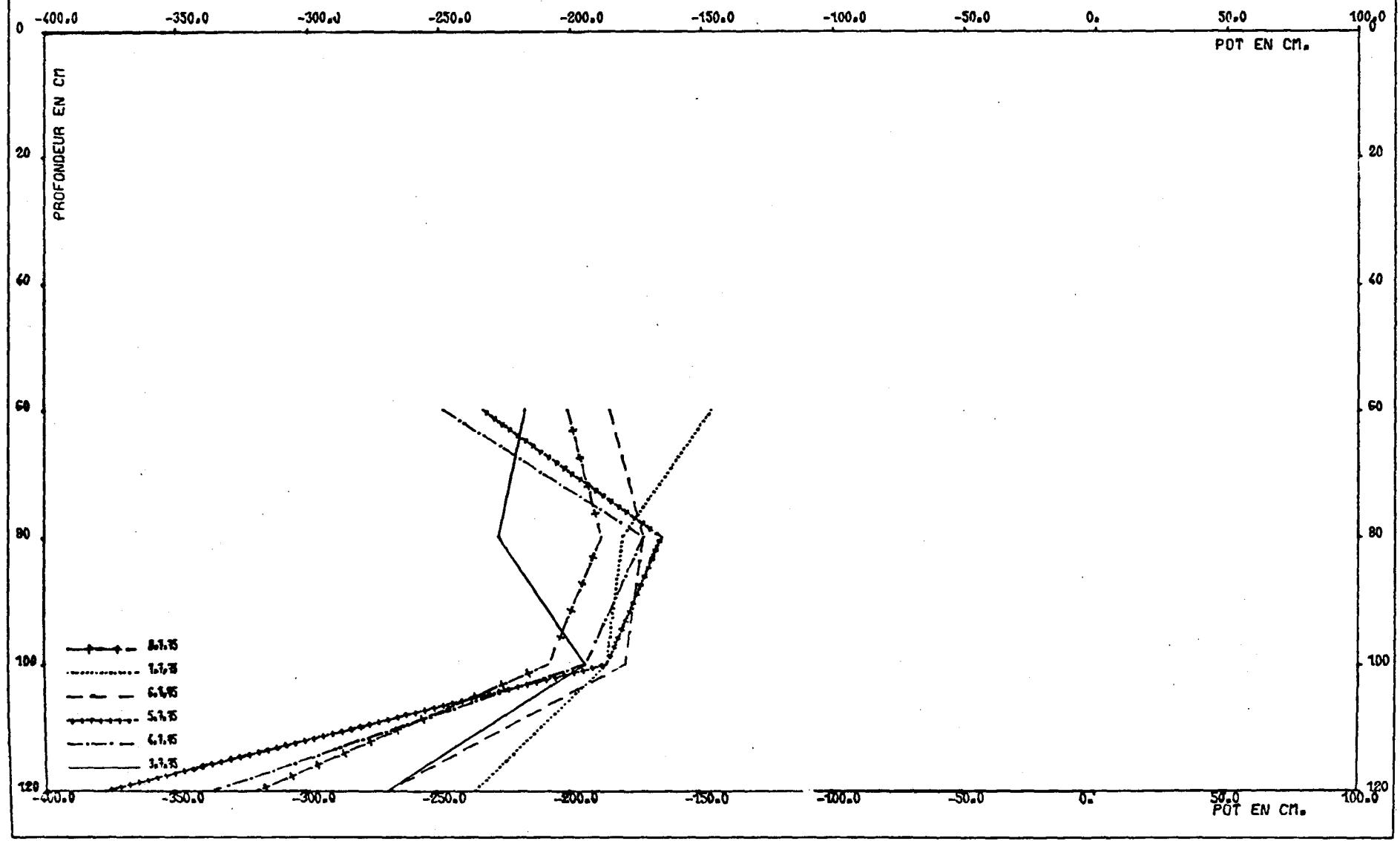


Figure 5e

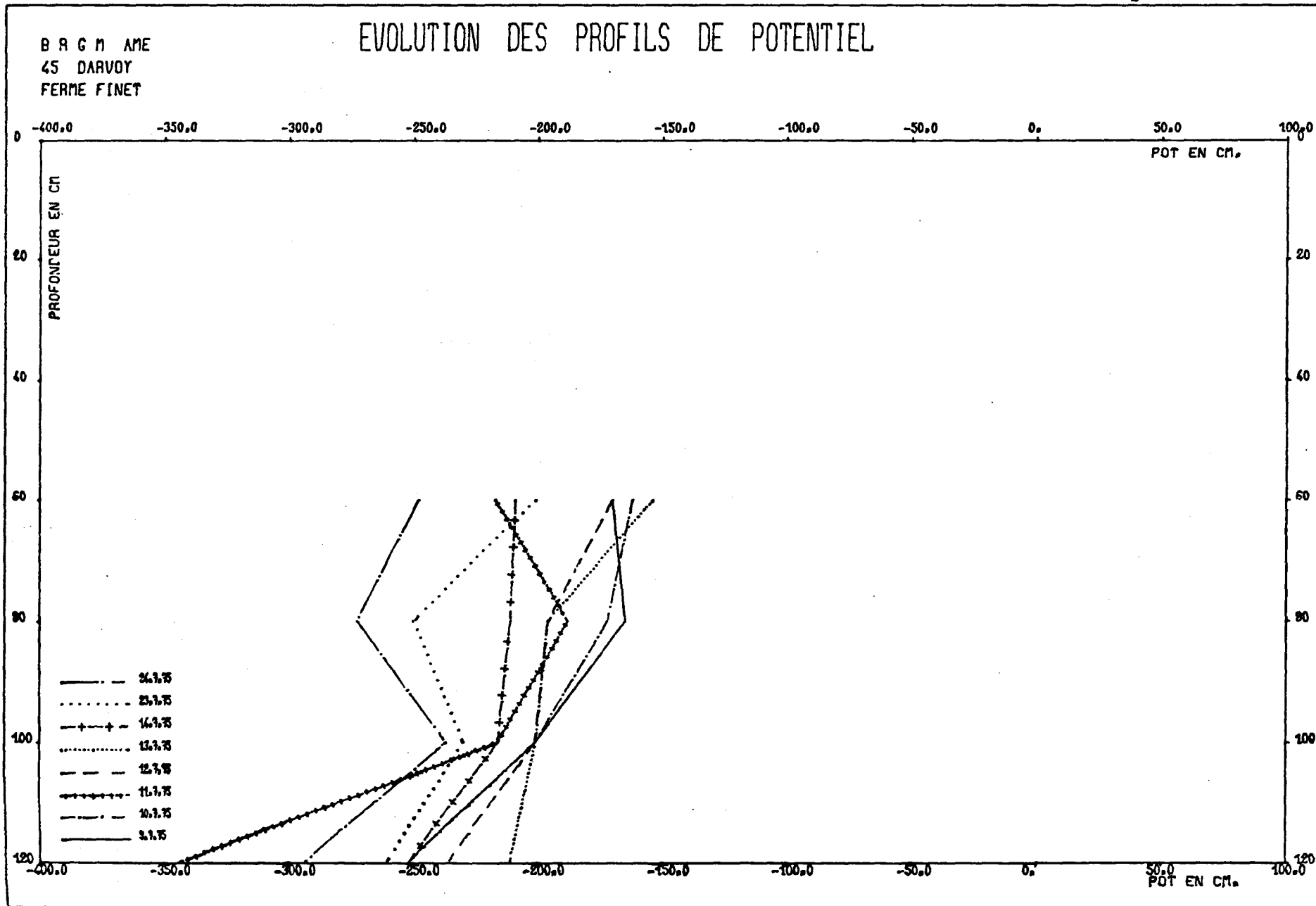


Figure 5f

B R G M A M E  
45 DARVOY  
FERME FINET

# EVOLUTION DES PROFILS DE POTENTIEL

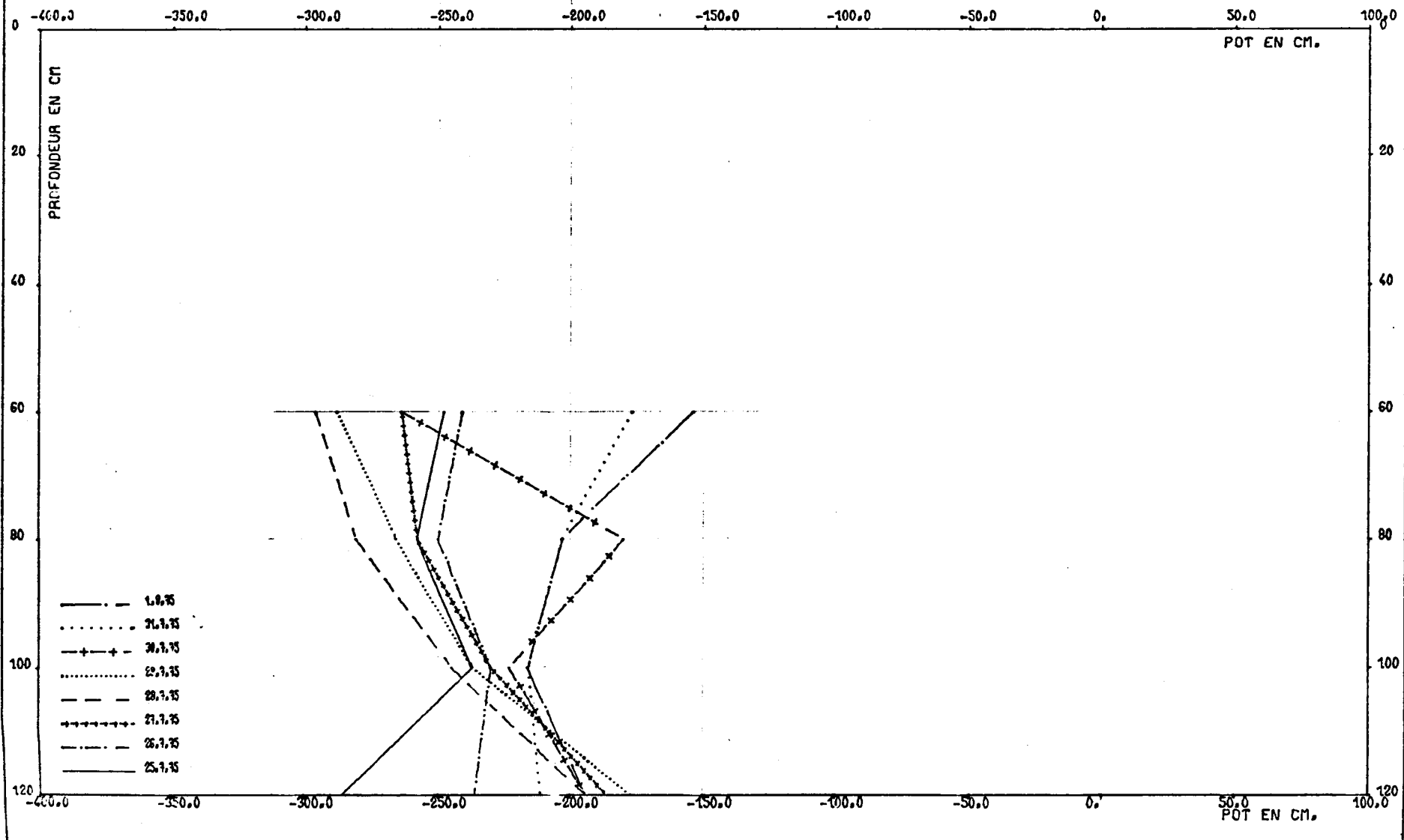


Figure 5g

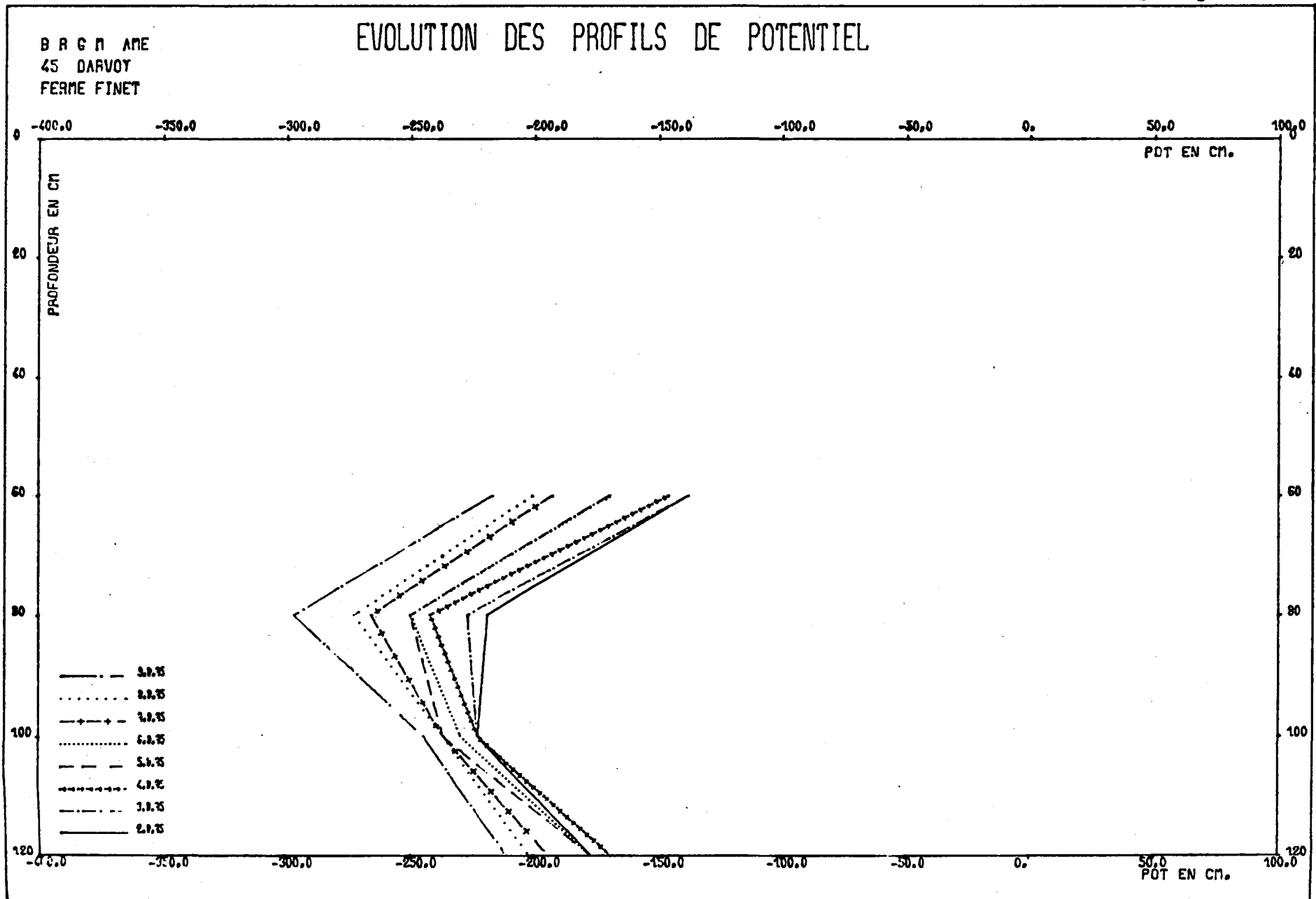




Figure 5h

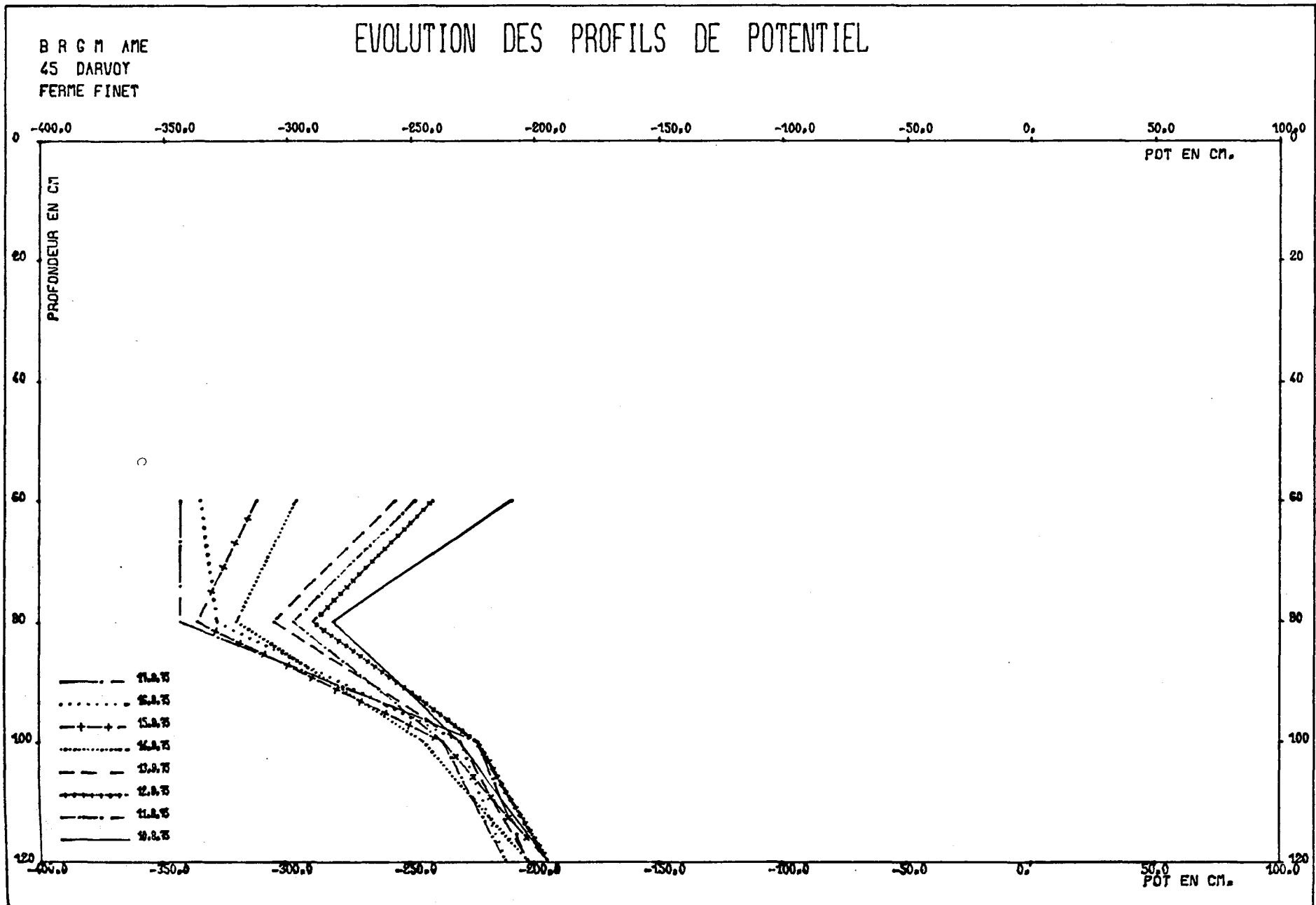
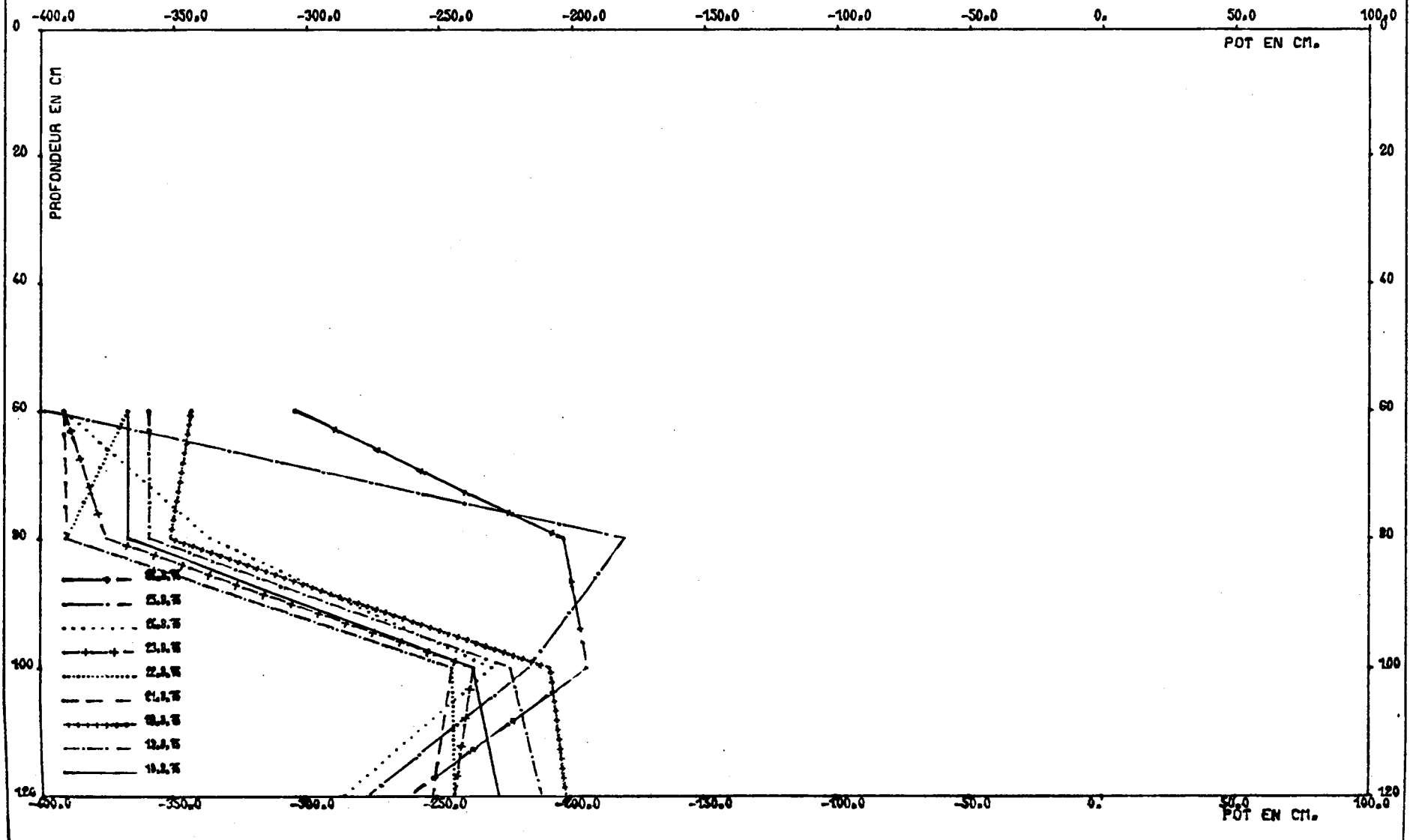


Figure 51

B R C M A M E  
45 DARVOY  
FERME FINET

# EVOLUTION DES PROFILS DE POTENTIEL



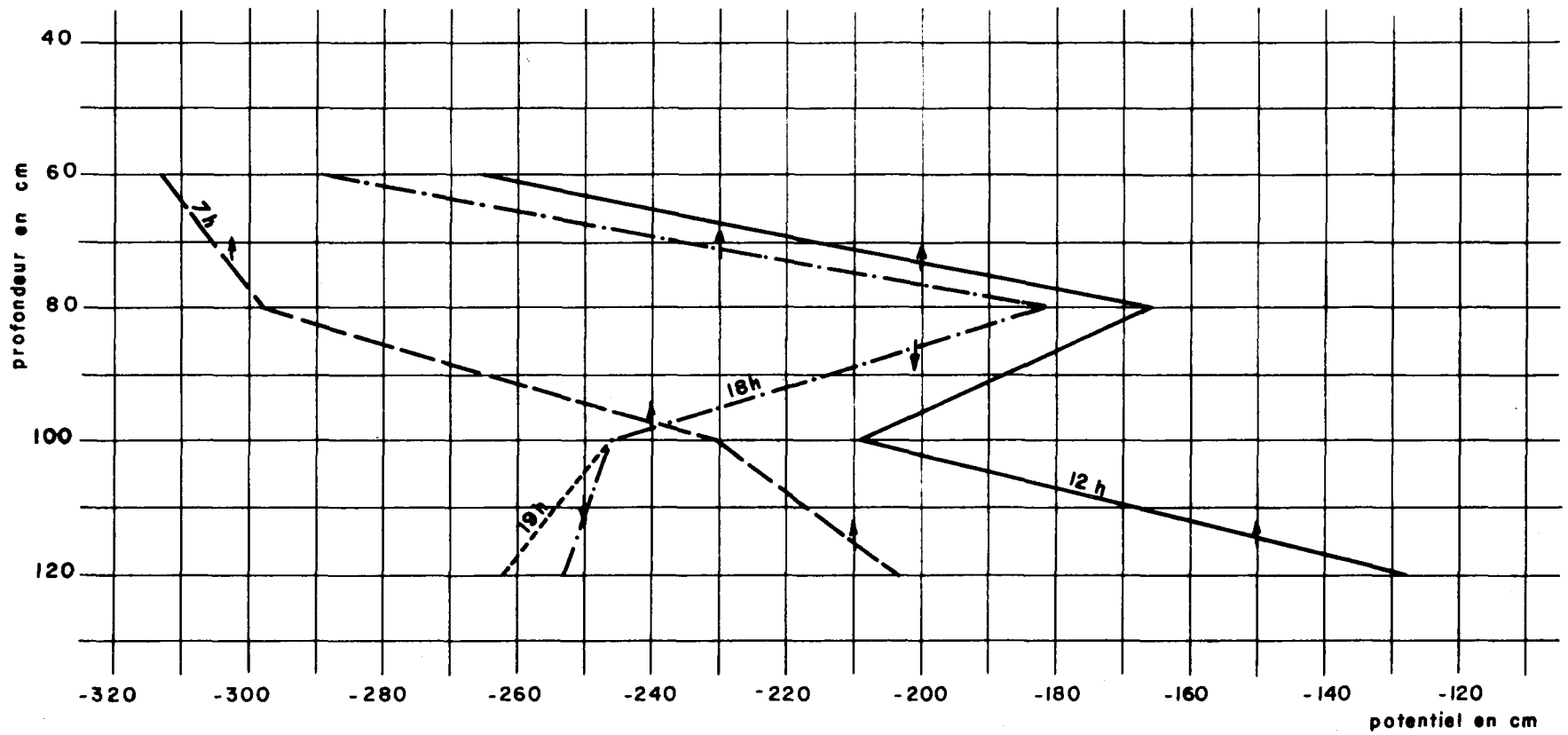


Fig. 6a . PROFILS DE POTENTIEL le 30-7-1975

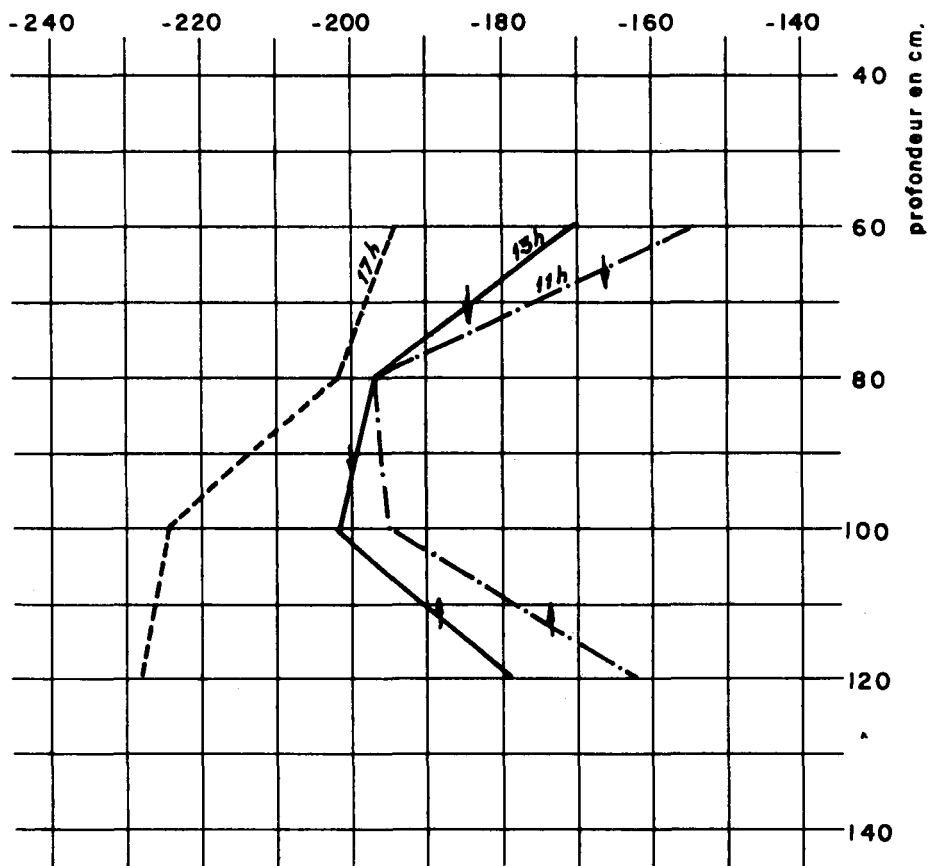
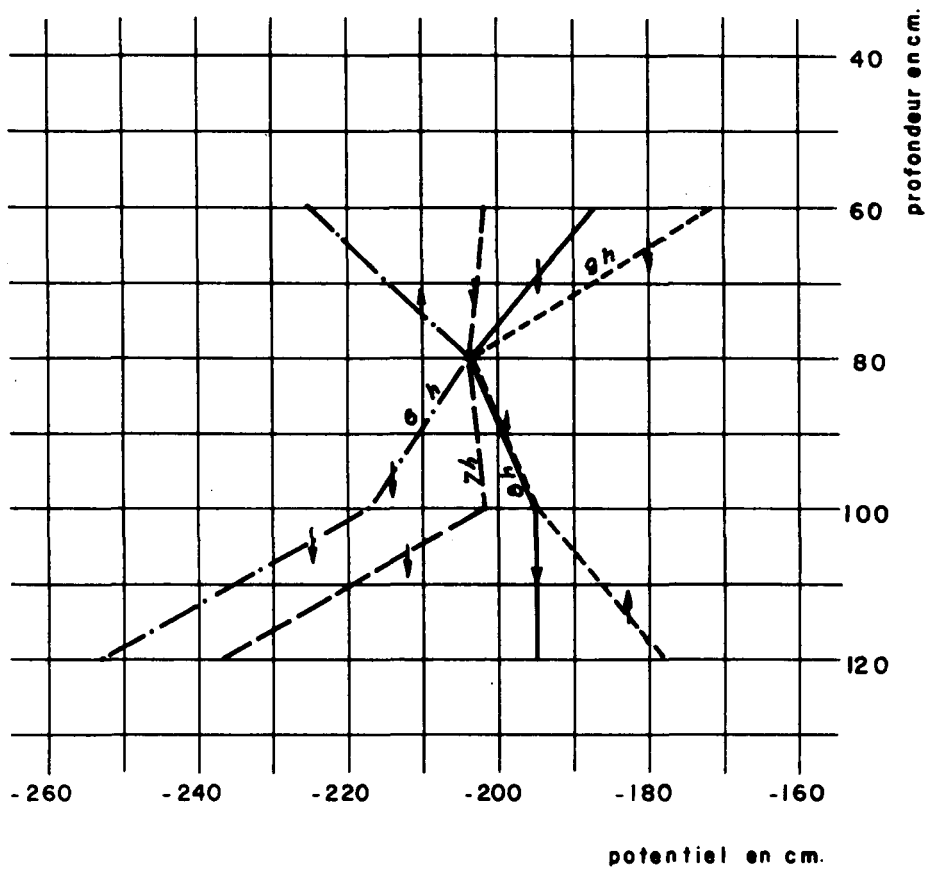


Fig. 6b - PROFILS DE POTENTIEL le 31-7-1975

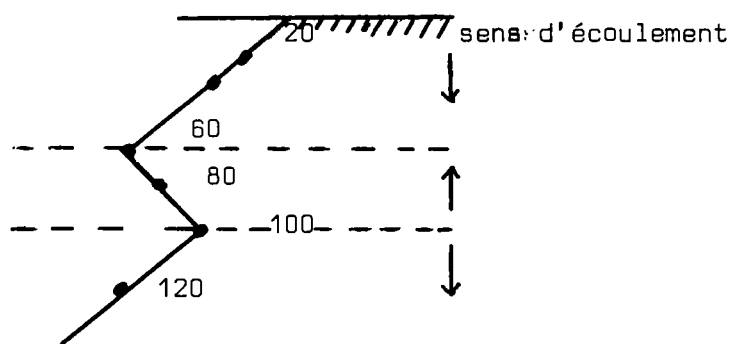
### 3.4.2.3. Discussion des résultats

L'examen des profils de potentiel et le calcul des gradients devraient permettre de localiser une zone de flux nul, c'est-à-dire une zone où se produit une inversion du sens de l'écoulement. Ceci n'est que très rarement le cas pendant cette période de mesure. On observe en général deux points de flux nul. Dans la période comprise entre le 28 mai et le 5 juin, on note un point de flux nul à 60 cm, un autre à 100 cm. Au-dessus de 60 cm et au-dessous de 100 cm, les flux sont descendants, dans la couche intermédiaire ils sont ascendants. Les profils tracés le 30-7 et le 31-7 (figures 6a et 6b) après un important apport d'eau sur le terrain rendent bien compte de l'état transitoire des potentiels. On n'observe que pendant de très brefs instants un profil d'infiltration sur toute la tranche de terrain comprise entre 60 et 120 cm.

L'observation des profils établis pendant la période d'expérimentation semble indiquer que la couche 80-100 cm, c'est-à-dire la couche argileuse, se comporte comme un réservoir qui libère de l'eau soit vers le haut, soit vers le bas.

### 3.4.3. Calcul des flux et des perméabilités.

Le calcul des flux et des perméabilités à certaines dates a été tenté. Pour une période au cours de laquelle on observe deux points de flux nul, avec un profil de potentiel de ce type :



ce calcul n'a pas été possible. En effet, si partant de l'apport d'eau amené en surface entre deux mesures à la sonde on calcule le flux sortant de la couche 0-20 cm, ce flux entre dans la couche

20-60 cm. La variation de stock dans cette couche devrait correspondre au flux entrant puisqu'à 60 cm on se trouve en présence d'un plan de flux nul et que, par conséquent, rien ne traverse ce plan en direction du bas. Or, ceci n'est jamais le cas : il entre plus d'eau dans la couche qu'elle n'en stocke ; donc, il doit nécessairement sortir un certain flux.

Ceci ne peut s'expliquer que par des infiltrations par les fissures. Le calcul des flux a été fait pour une période où les profils sont d'évaporation jusqu'à 120 cm. C'est le cas par exemple entre le 28-7-1975 et le 30-7-1975.

On ne dispose pas de tensiomètre sous cette cote, et on ignore si le point de flux nul est descendu plus bas que cette cote. On a supposé qu'il descendait jusqu'à 1 m 50. Partant de ce point, on estime les débits qui traversent les couches dans le sens ascendant au-dessus de 150 cm et descendants au-dessous de 150 cm.

On a ainsi calculé :

0- 20	q = 0,0088 cm/h
20- 60	q = 0,0055 cm/h
60- 80	q = 0,0048 cm/h
80-100	q = 0,0046 cm/h
100-120	q = 0,0028 cm/h
120-150	q = 0,0006 cm/h
150-220	q = 0,0029 cm/h

Les perméabilités correspondantes sont :

60- 80	K = $1,4 \cdot 10^{-8}$ m/s
80-100	K = $5,8 \cdot 10^{-9}$ m/s
100-120	K = $3 \cdot 10^{-9}$ m/s

Il n'est pas possible de les calculer dans les autres couches pour lesquelles il n'y a pas de mesures de gradients.

On a répété le calcul des flux et des perméabilités pour la période comprise entre le 30-7 au soir et le 31-7 au cours de laquelle l'eau s'infiltré tout le long du profil. Le calcul donne les résultats suivants :

0- 20	q = 0,005 cm/h	
20- 60	q = 0,020 cm/h	
60- 80	q = 0,029 cm/h	K = 3,05.10 <sup>-7</sup> m/s
80-100	q = 0,033 cm/h	K = 5 .10 <sup>-8</sup> m/s
100-120	q = 0,029 cm/h	K = 6 .10 <sup>-8</sup> m/s
120-150	q = 0,040 cm/h	
150-220	q = 0,071 cm/h	

Au cours de ces deux intervalles de temps, la teneur en eau moyenne était sensiblement la même, soit :

- $\theta = 35,3\%$  entre 60 et 80 cm
- $\theta = 30,9\%$  entre 80 et 100 cm
- $\theta = 24,4\%$  entre 100 et 120 cm

Ceci signifie qu'il n'est pas possible d'établir une courbe  $K(\theta)$  à partir des mesures de perméabilités déduites des mesures sur le terrain. La teneur en eau ne varie pas suffisamment.

On a tenté d'établir la courbe  $\psi(\theta)$  en laboratoire, mais ceci n'est pas très aisé car l'échantillon se rétracte. De nouveaux essais sont en cours.

...

#### 3.4.4. Mesure des teneurs en nitrate

1ère expérience : 3-6-1975

La quantité de  $\text{NO}_3\text{K}$  en solution déversée en surface correspond à  $152 \text{ g NO}_3^-$  (1,9 g/l).

La figure 7a représente - un profil de teneur en  $\text{NO}_3^-$  établi 24 heures après le début de l'expérience, soit le 4-6-1975  
et - un profil de teneur en  $\text{NO}_3^-$  établi 9 jours après le début de l'expérience, soit le 12-6-1975.

Les teneurs portées sont celles obtenues après déduction du "bruit de fond" c'est-à-dire de la teneur en  $\text{NO}_3^-$  avant expérience. Il n'a jamais été observé de déplacement vertical d'un pic de nitrate, au cours du temps, comme c'est le cas en milieu poreux homogène et comme le voudrait la théorie.

On observe une zone de plus forte concentration stable située entre 30 et 90 cm.

Le profil établi le 12-6-1975 montre non pas un déplacement des pics, mais une diminution d'amplitude des pics.

Le graphique de concentration en  $\text{NO}_3^-$  dans l'eau du sol indique que, lors des premiers prélèvements c'est-à-dire 24 heures après l'expérience, la plus grande partie du  $\text{NO}_3^-$  apporté s'est déjà infiltrée. Les concentrations diminuent très brutalement à une profondeur donnée (figure 8, page 67).

...



Tentative de calcul d'un bilan de masse

- calcul du volume d'eau contenu dans un parallélépipède de 4 m<sup>2</sup> sur 1 m 20, à partir des teneurs en eau mesurées à la sonde.

Les quantités de nitrate mesurées et rapportées à ce volume d'eau conduisent à une quantité totale de nitrate six à sept fois supérieure à celle que l'on a apportée.

- calcul des variations de stock d'eau dans chaque couche entre le 3-6-1975 et le 4-6-1975.

Les quantités de nitrate mesurées le 4-6 et rapportées à ces volumes d'eau aboutissent à une quantité totale de nitrate dans l'eau du sol égale à 6,7 g. Un mois et demi plus tard, elle est de 0,12 g.

Deux déductions apparaissent :

- l'infiltration de la solution de nitrate est extrêmement rapide : moins de 24 heures.

- Cette infiltration se fait vraisemblablement en grande partie par les fissures dans ce type de sol.

On peut supposer que seule une partie de l'eau très mobile véhicule le soluté.

Ceci est confirmé par le fait que les courbes de potentiel établies toutes les heures le 3-6 et le 4-6 ne montrent pas d'inversion de sens d'écoulement. Le premier point de flux nul reste situé à 60 cm jusqu'au 5-6 à 11 heures. Or, les profils de concentration en  $\text{NO}_3^-$  établis le 4-6 nous montrent bien une teneur en  $\text{NO}_3^-$  plus importante à 70 et 90 cm, alors qu'on devrait retrouver le  $\text{NO}_3^-$  entre la surface et 60 cm.

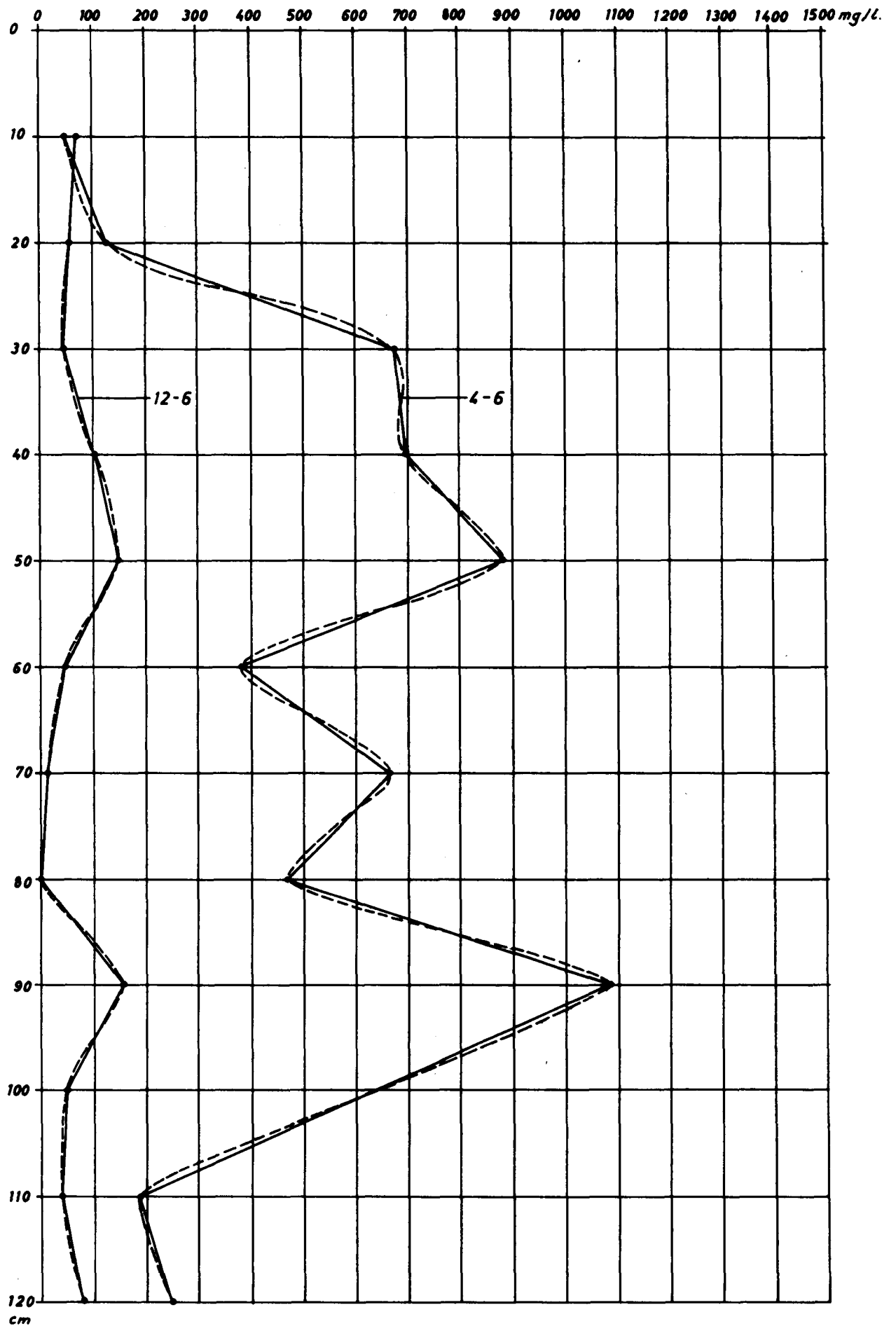


Figure 7a

Première expérience : 3.6.1975

152  $\text{B NO}_3^-$  (1,9 g/l)

L'eau s'infiltré donc par des fissures ou le long des tubes de prélèvement quand il y a des retraits du terrain.

Notons qu'une analyse de  $\text{NO}_3^-$  sur une carotte du terrain prélevée fin juin fait apparaître des quantités très faibles de  $\text{NO}_3^-$  qui n'est donc pas fixé sur le terrain (tableau 3, page 17).

### 2ème expérience

La quantité de  $\text{NO}_3\text{K}$  en solution déversée en surface correspond à  $580\text{g NO}_3^-$  (2,9 g/l).

La figure 7b représente : - un profil de concentration en  $\text{NO}_3^-$  établi 24 heures après le début de l'expérience, soit le 27-8,

- un profil de concentration établi neuf jours plus tard, soit le 5-9.

On observe plusieurs pics de concentration : à 10 cm, puis à 50 et 70 cm, comme dans le cas de la première expérience. Le 5-9, l'amplitude des pics a notablement diminué et on peut admettre que le deuxième pic s'est déplacé de 70 à 90 cm.

Comme dans l'expérience précédente, le graphique des concentrations en  $\text{NO}_3^-$  dans l'eau du sol montre une diminution très brutale des concentrations due à une infiltration quasi-instantanée.

### Calcul d'un bilan

- calcul des variations de stock d'eau dans chaque couche entre le 26 et le 27-8.

Les quantités de nitrates mesurées le 27-8 et rapportées à ces volumes indiquent une quantité totale de nitrate dans l'eau du sol de 8,1 g.

...

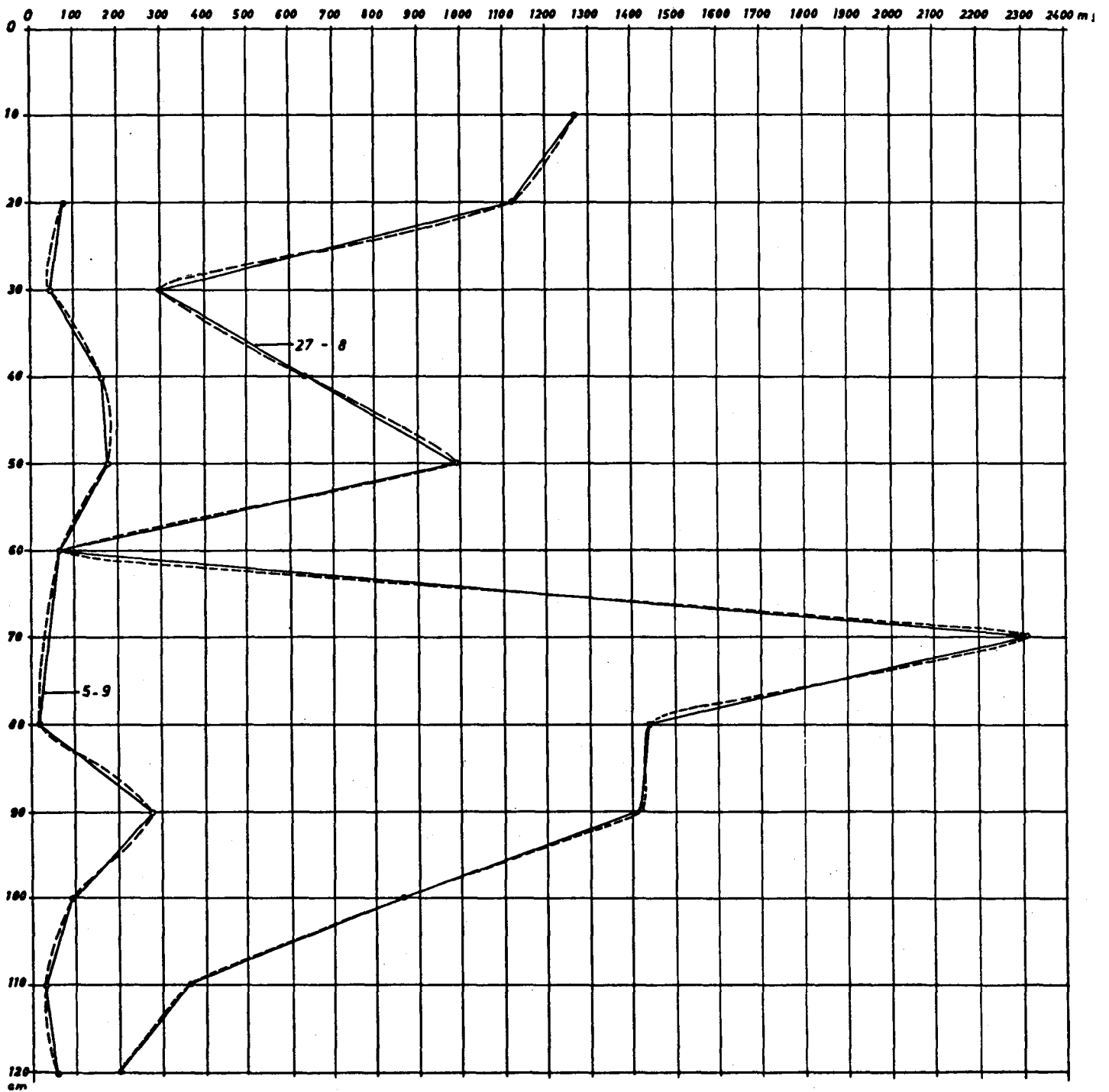


Figure 7b

Deuxième expérience : 26.8.1975

580 g  $\text{NO}_3^-$  (2,9 g/l)

Au bout d'un mois, cette quantité est de 1,3 g. On aboutit aux mêmes conclusions que lors de la 1ère expérience :

- la majeure partie des nitrates apportés s'infiltré instantanément par les fissures.

Ceci est en accord avec le phénomène observé la veille de l'expérience : apport de 1 000 litres d'eau dont seuls 120 litres apparaissent dans la variation du stock.

- une fraction de l'eau contenue dans le sol participe au transport des sels en solution. Ce transport est rapide ; on peut considérer qu'au bout d'un mois et demi les nitrates présents dans le sol sont passés sous la cote 1 m 20. Le  $\text{NO}_3^-$  n'a pas été dosé sur le sol après cette deuxième expérience.

### 3ème expérience

La quantité de  $\text{NO}_3\text{K}$  en solution est cette fois apportée par arrosage de la parcelle. Cette quantité est de 180 g  $\text{NO}_3^-$  (6 g/l).

La figure 7c représente : - un profil de concentration en  $\text{NO}_3^-$  établi le 26-9, soit 24 heures après le début de l'expérience,

- un profil de concentration établi le 27-9, soit 48 heures après le début de l'expérience,

- un profil établi le 15-10, soit 19 jours plus tard.

On observe également une succession de pics entre 10 cm et 120 cm. Par contre, on ne voit à aucune date se déplacer les pics de nitrate ; on observe seulement une diminution d'amplitude des pics de concentration.

...

La quantité totale de  $\text{NO}_3^-$  mesurée et rapportée à la variation du stock d'eau entre le 25-9 et le 26-9 est de 27,9 g ; le 15-10, cette quantité est de 3,5 g.

Le rapport de cette quantité restant dans l'eau du sol à la quantité initiale est plus important que lors des deux premières expériences. Ceci est peut-être lié au mode opératoire, c'est-à-dire au fait que l'on a arrosé la parcelle.

Quoi qu'il en soit, la majeure partie des nitrates apportés a disparu au cours des premières 24 heures.

Une carotte de sol a été prélevée en octobre, soit un mois et demi après le début de l'expérience. Les résultats des dosages de  $\text{NO}_3^-$  indiquent des quantités négligeables (tableau 6).

	$\text{NO}_3^-$ g/l extrait des échantillons sol	$\text{NO}_3^-$ g/l dans eau du sol avant expériences
0- 10 cm	0,036	-
10- 20 cm	0,022	0,022
20- 30 cm	0,022	0,027
30- 40 cm	0,020	-
40- 50 cm	0,020	0,015
50- 60 cm	0,020	0,022
60- 70 cm	< 0,020	0,034
70- 80 cm	0,020	0,080
80- 90 cm	0,020	0,015
90-100 cm	0,020	0,017
100-110 cm	0,020	0,013
110-120 cm	0,020	0,018
120-125 cm	0,020	0,018

Tableau 6

On ne peut donc pas dire que le nitrate est resté piégé (modèle GAUDET-VACHAUD /5/). Ceci est très net si l'on compare les teneurs en nitrate extraites des échantillons de terrain et celles mesurées dans les bougies poreuses avant les expériences.

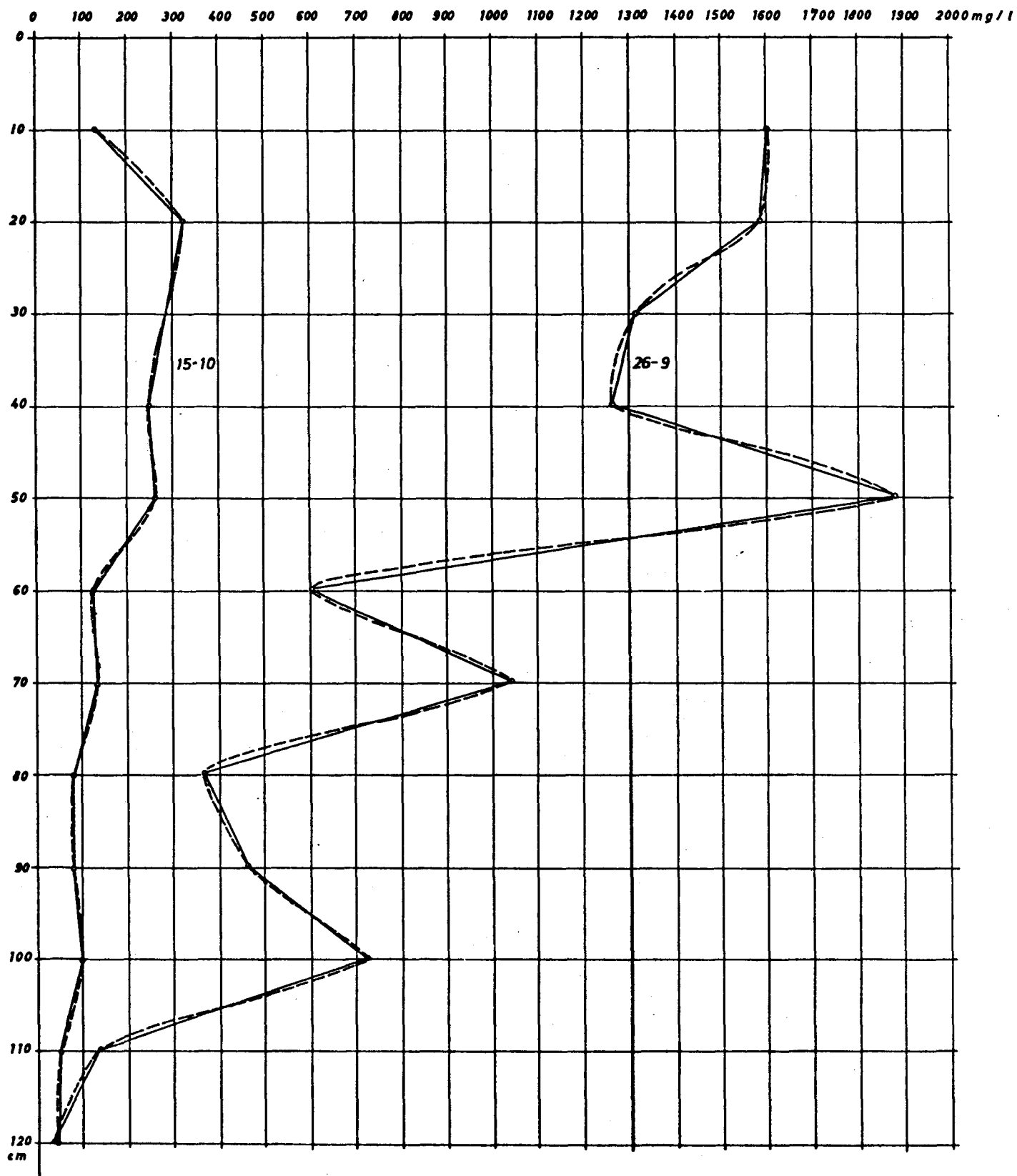


Figure 7c

Troisième expérience : 25.9.1975

180 g NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (6 g/l)

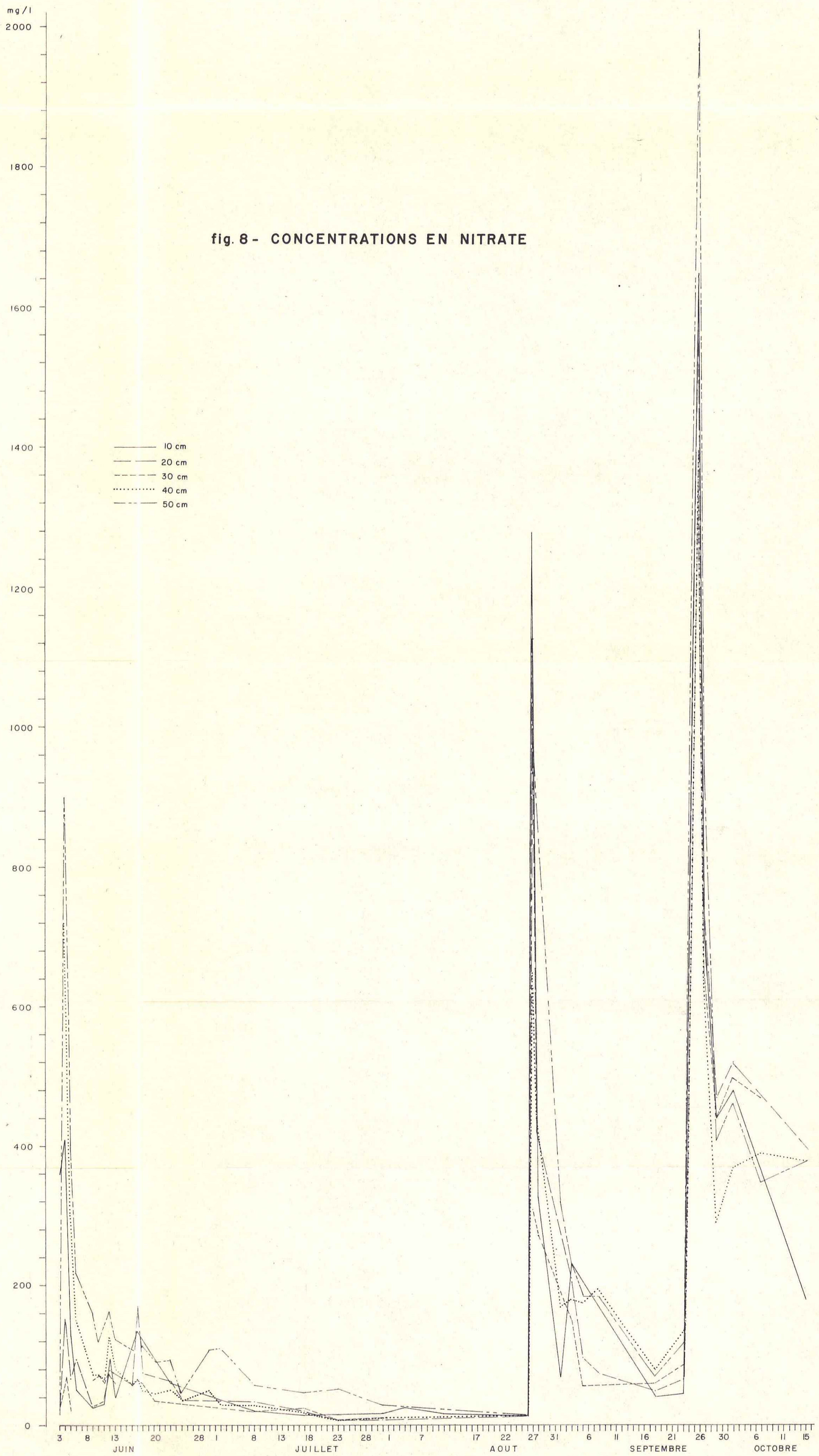
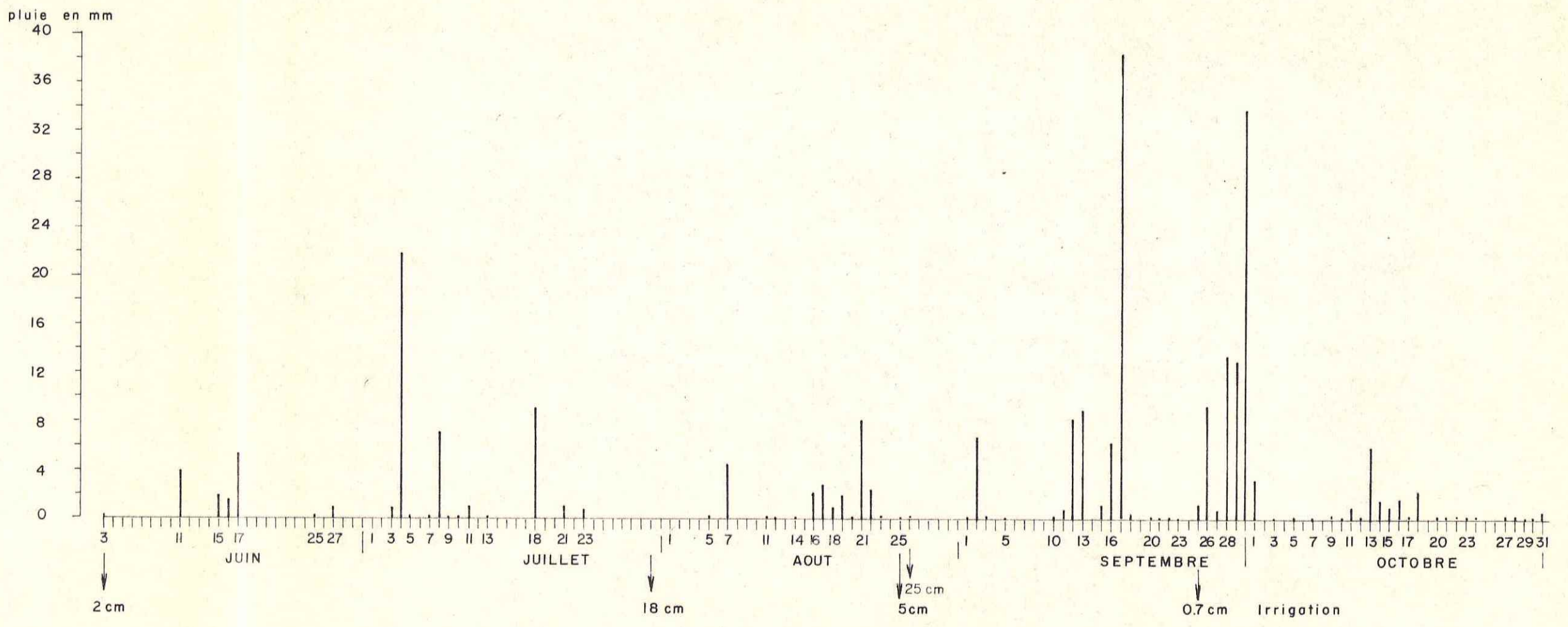


fig. 8 - CONCENTRATIONS EN NITRATE



#### Dosage du nitrate dans la nappe

Des prélèvements d'eau dans un piézomètre situé au Nord de la parcelle étaient analysés par intermitences.

Le 3/6/75, soit 24 heures avant la première expérience, le taux de  $\text{NO}_3^-$  était déjà voisin de 40 mg/l. Ce taux passe très vite à 55 mg/l, ce qui est supérieur au seuil admissible (45 mg/l).

Ce taux de  $\text{NO}_3^-$  baisse en fin juillet, mais ne semble pas remonter après la deuxième expérience qui a lieu le 28 août (figure 9).

Par contre, on note une nette remontée après la troisième expérience, début octobre.

Ces résultats sont délicats à interpréter car ils ne sont pas reproductibles. Les teneurs en nitrate sont faibles en septembre, alors qu'elles étaient très fortes en juin-juillet. La relation entre ces variations de teneurs dans la nappe et les quantités de nitrate répandues en surface est difficile à établir.

#### 3.4.5. Discussion des résultats

- Les résultats obtenus dans cette étude sont très différents de ceux que l'on avait obtenus lors des deux études précédentes, l'une sur un sol formé de sables moyens et grossiers (à Orléans), l'autre sur un sable des Landes (Saucats). Dans ces deux cas, on observait un front d'avancement du nitrate. Le pic de concentration en  $\text{NO}_3^-$  mettait deux à trois mois pour atteindre la profondeur 100 cm, suivant qu'il était poussé par la pluie ou par l'irrigation. (/1/ et /8/).

...

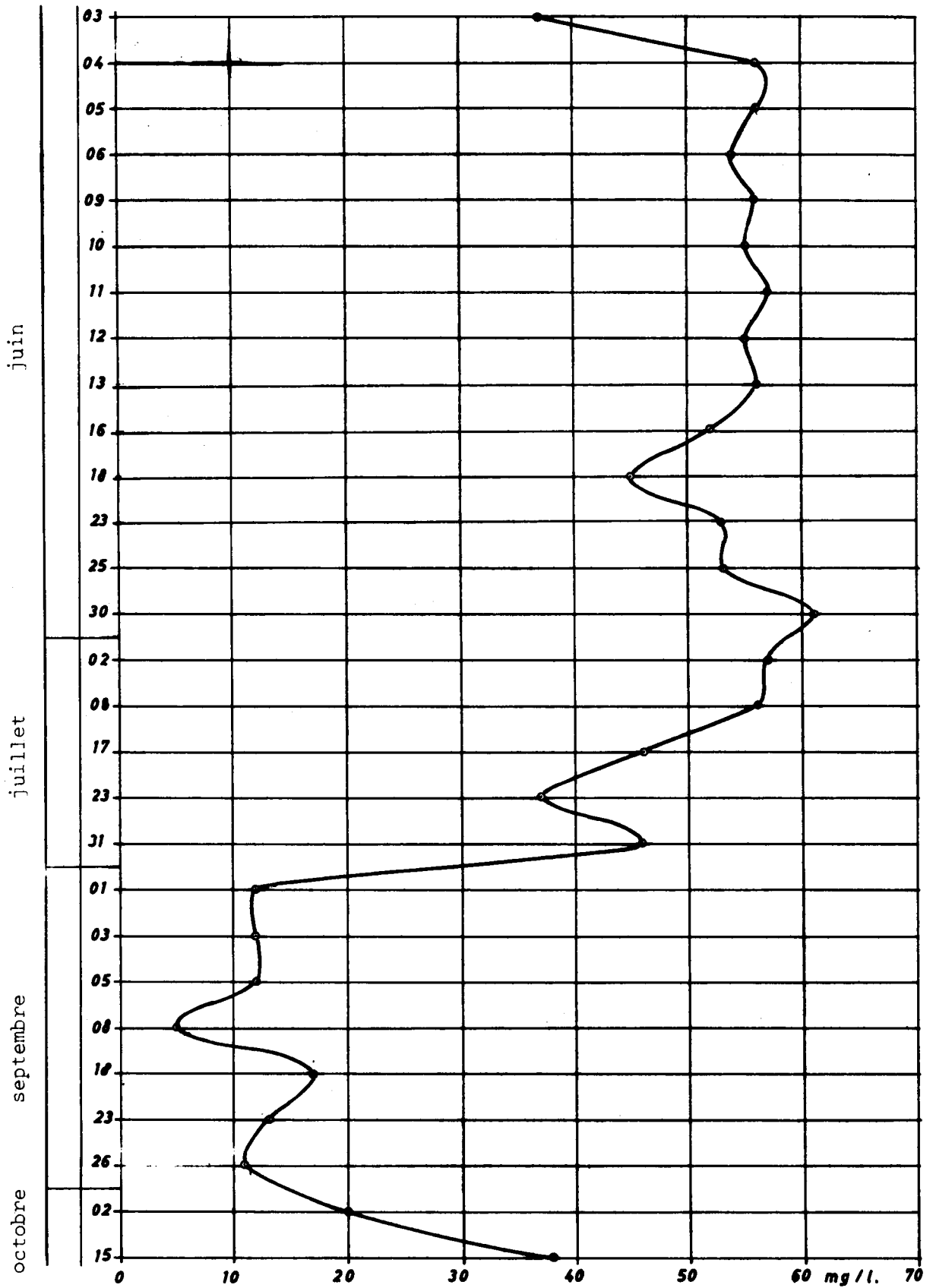


Figure 9 : PIEZOMETRE : CONCENTRATION EN NO<sub>3</sub><sup>-</sup>

Dans le cas présent, la majeure partie du traceur disparaît dans les premières 24 heures et ceci vraisemblablement par des fuites ou des fissures.

Une faible partie de la concentration initiale se retrouve distribuée dans la partie du profil comprise entre 0 et 100 cm, et disparaît au bout d'un temps souvent inférieur à un mois, sans que l'on puisse mettre en évidence un déplacement des concentrations. Par ailleurs, rien n'est fixé sur le terrain.

- D'un point de vue pratique, il ressort de ces expériences que dans ce type de sol limoneux fréquent en Val de Loire, qui se fend et se craquèle en surface dès l'apparition de la période estivale, le nitrate apporté en surface sous forme de solution s'infiltré extrêmement rapidement en direction de la nappe.

- D'un point de vue théorique, il apparaît que l'étude des phénomènes de transfert dans un sol non saturé de ce type est extrêmement complexe.

#### 4. - ESSAI DE MODELISATION

##### 4.1. Présentation des modèles disponibles

Il existe un certain nombre de modèles plus ou moins complexes, rendant compte de l'infiltration de l'eau en milieu non-saturé.

- Citons le modèle de WIND et VAN DOORME (/3/)

Ce modèle, écrit en fortran, simule l'écoulement vertical de l'eau dans un sol supposé homogène et divisé en un certain nombre de couches d'égale épaisseur. Ce programme comprend deux sous-programmes

mes ; l'un calcule les vitesses d'écoulement, la profondeur de la nappe et la quantité d'eau qui la surmonte ; l'autre sous-programme calcule les teneurs en eau et les tensions induites par les vitesses d'écoulement, après un pas de temps.

- le modèle de H. VAN KEULEN et VAN BEEK (17)

écrit en CSMP (continuous system modeling program) simule l'infiltration de l'eau dans un sol non homogène, c'est-à-dire à plusieurs couches. Ce programme calcule la teneur en eau à chaque profondeur, donc le profil hydrique et le potentiel à chaque profondeur.

Il est nécessaire d'introduire dans le programme les courbes  $\psi(\theta)$  et  $K(\theta)$ .

- le modèle de M.G. LE CARDINAL ou modèle "DIFSOL 1", écrit en CSMP,(12)

simule la diffusion de l'eau dans un sol homogène suivant un axe vertical oz.

L'équation utilisée pour cette simulation est la suivante :

$$-\frac{\delta\theta}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta z} \left( D(\theta) \frac{\delta\theta}{\delta z} - K(\theta) \right)$$

Les données à fournir à ce programme sont le profil initial de teneurs en eau, les teneurs en eau maximale et minimale, un tableau des débits à l'entrée en fonction du temps, et aussi un tableau des débits à la sortie s'ils sont imposés, la courbe  $K(\theta)$ .

Ce modèle calcule la teneur en eau à chaque profondeur, donc le profil hydrique, le stock d'eau contenu dans la colonne et la variation de stock.

- un autre modèle de M.G. LE CARDINAL (voir 13), modèle "MULTISOL"

a retenu notre attention. Ce modèle a pour but de simuler la diffusion de l'eau dans une colonne de sol comprenant plusieurs couches de nature différente.

En fait, ce modèle étudie trois couches de sol telles que la première et la troisième soient de nature identique. Les variations de débit à la surface et au fond sont des fonctions du temps. Pour chaque simulation, une sortie graphique est donnée ; elle représente les profils de teneur en eau en fonction de la profondeur pour chaque pas de temps.

- Les modèles de VAN GENUCHTEN et WIERENGA (1/6/)

écrits en CSMP simulent le déplacement d'un soluté dans le sol. Ce modèle est applicable à un transfert sans interaction avec la matrice solide ou avec adsorption.

#### 4.2. Sélection d'un modèle

Dans une première étape, nous avons sélectionné un modèle de simulation de l'écoulement de l'eau dans un sol homogène, ce qui est le cas le plus simple. C'est pourquoi nous avons testé "DIFSOL 1". Il est évident que le modèle de VAN KEULEN et VAN BEEK est mieux adapté à notre problème, car il simule l'infiltration dans un sol hétérogène à plusieurs couches, ce qui est notre cas.

Ce dernier modèle nécessite la courbe  $\psi(\theta)$  qui est établie en laboratoire. Il sera donc testé dès que les données nécessaires auront été recueillies.

#### 4.3. Résultats obtenus

A l'aide de "DIFSOL 1", l'expérience du 30-7-1975 a été simulée. L'apport d'eau sur la parcelle expérimentale était de 720 l d'eau environ au total, ce volume étant apporté en moins d'une heure. On a donc simulé un débit moyen à l'entrée pendant une heure, correspondant à ce volume d'eau, le débit à l'entrée étant nul ensuite. Le

...

débit à la sortie est libre, c'est-à-dire fonction de la gravité, ce qui était le cas. Les essais sont effectués successivement avec deux tableaux  $k(\theta)$ ,; le premier correspond aux perméabilités que l'on a pu déduire des mesures in situ, le deuxième à des perméabilités choisies  $10^3$  fois supérieures aux premières.

La comparaison des profils mesurés et des profils calculés montre que les résultats obtenus par le calcul sont très différents des résultats expérimentaux.

Les profils mesurés indiquent une faible augmentation de la teneur en eau le long du profil, bien que le volume d'eau apporté à la surface soit important.

Les profils calculés, avec les perméabilités de l'ordre de celles mesurées sur le terrain (paragraphe 3.4.3.), montrent que le terrain est instantanément saturé à la surface et que la saturation croît en profondeur, pour atteindre les 40 premiers centimètres au bout de 24 heures.

Ceci suppose une infiltration lente dans le terrain. Les perméabilités ayant été multipliées par  $10^3$ , c'est-à-dire étant de l'ordre de  $10^{-4}$  ou  $10^{-3}$ , on obtient les profils de la figure 11.

La variation du stock d'eau calculé est dans ce cas de 16,7 cm.

La hauteur d'eau apportée en surface est de 18 cm. Rappelons que l'augmentation de stock mesurée n'était que de 3cm au bout de 8 heures, alors que les 18 cm d'eau apportés s'étaient infiltrés en une heure.

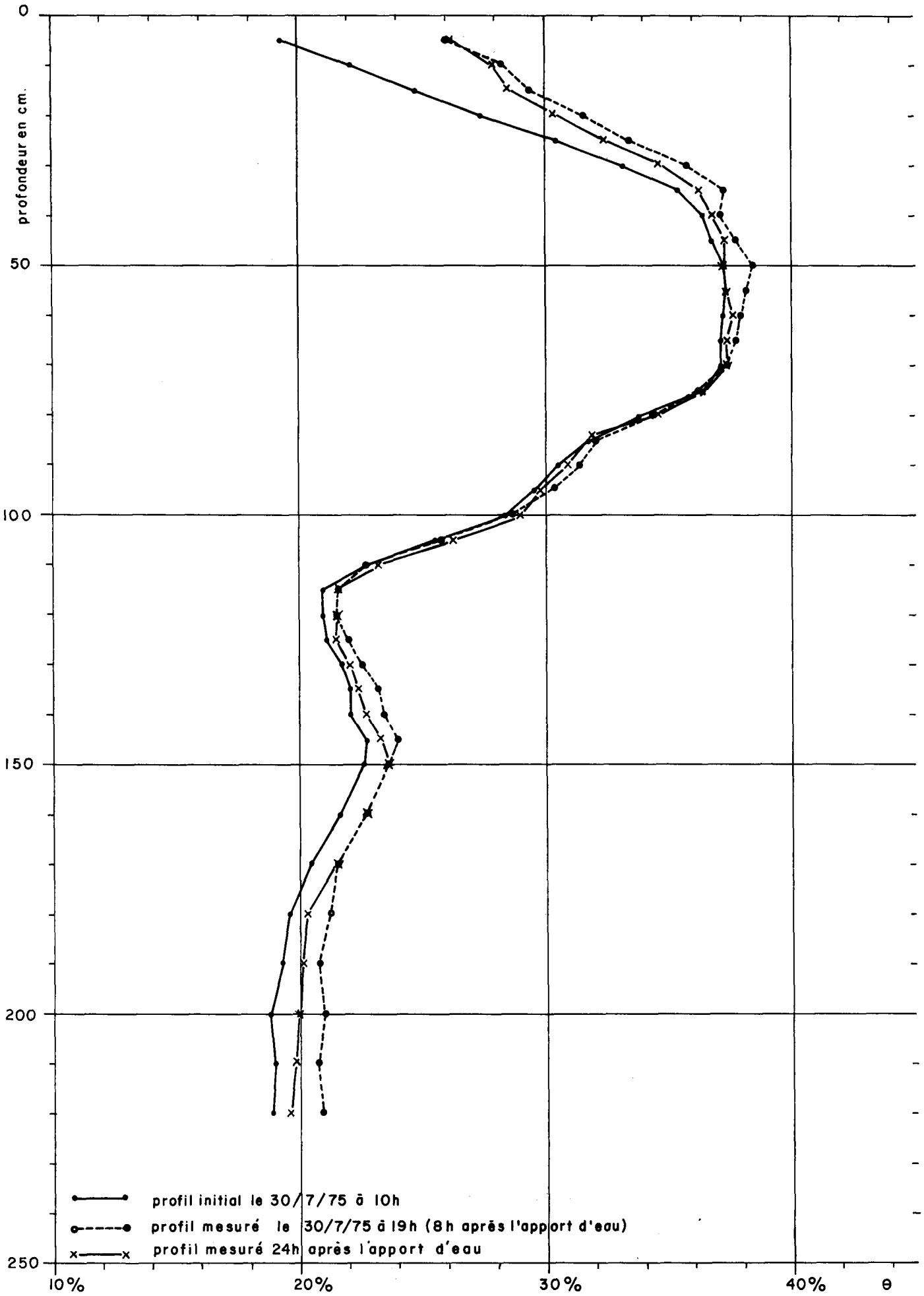


fig. 9 - Profils hydriques mesurés

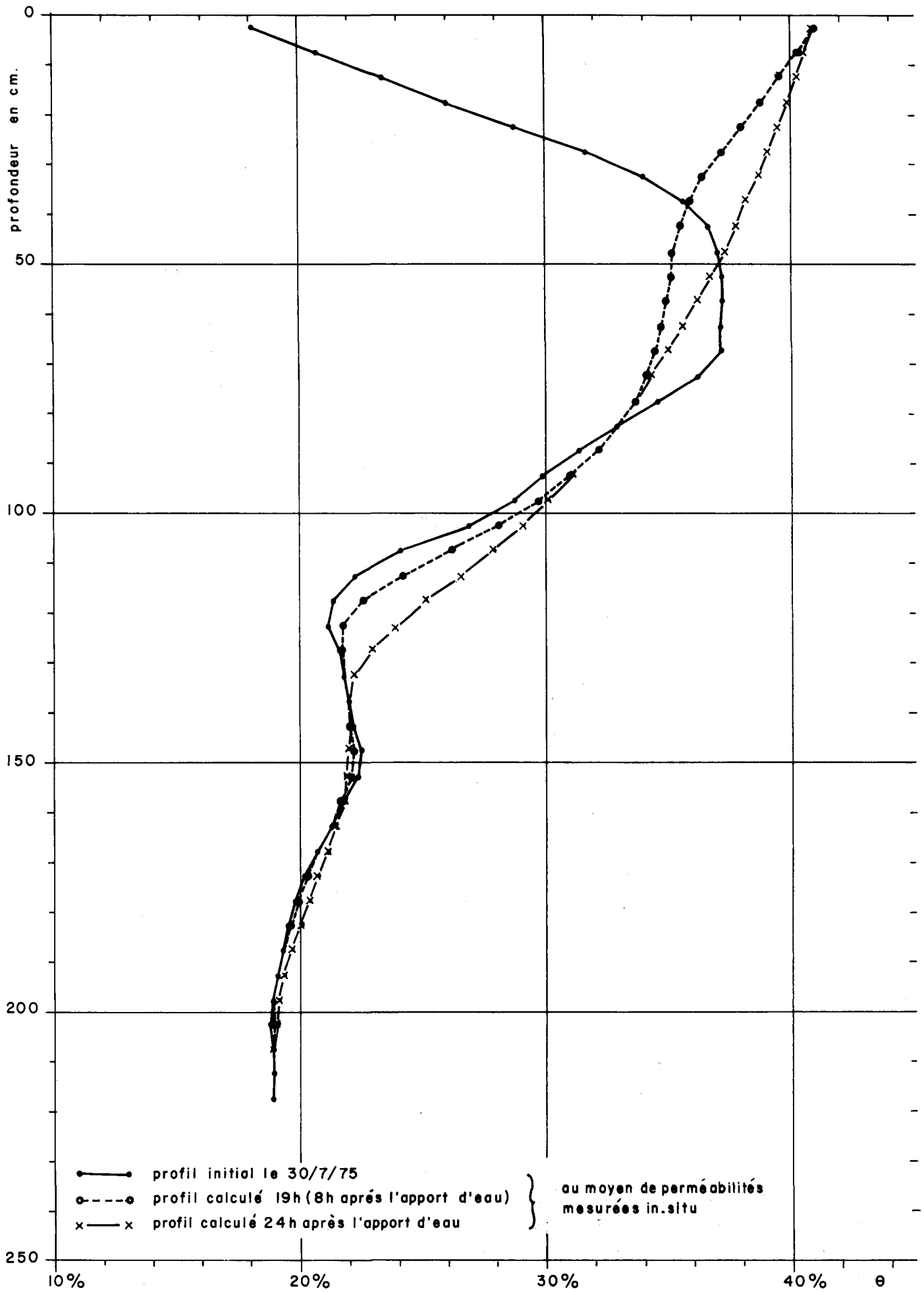


fig.10. Profils hydriques calculés



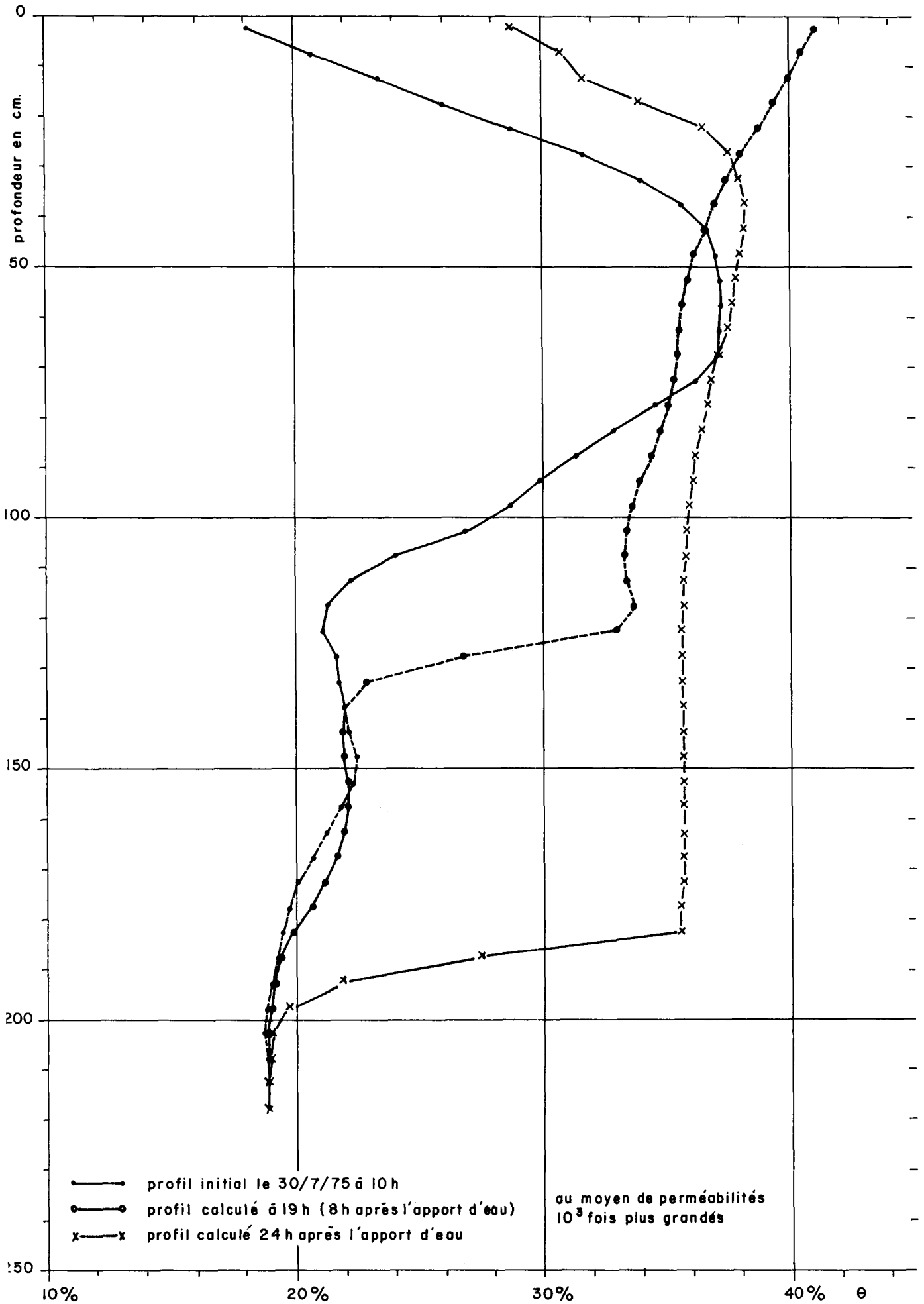


fig. II - Profils hydriques calculés

En conclusion, on peut dire qu'il est très difficile de simuler les écoulements d'eau dans ce type de sol, avec les modèles dont nous disposons.

Il semble que, logiquement, on devrait observer une saturation instantanée en surface et croissant en profondeur en un temps dépendant de la perméabilité, c'est-à-dire que les profils calculés sont ceux que l'on devrait obtenir dans un milieu poreux non rétractable.

La différence entre les profils mesurés et les profils calculés nous paraît être un argument de plus en faveur de l'hypothèse que la plus grande partie de l'eau, et donc des nitrates, s'infiltrer instantanément par des fissures.

Dans une deuxième étape, le modèle de VAN KEULEN sera testé et il y aura lieu de déterminer les variations à apporter à ces différents modèles pour qu'ils prennent en compte l'hétérogénéité des terrains, les variations de perméabilités et autres facteurs propres à chaque site.

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

Il ressort de cette étude qu'un ion polluant, ici en l'occurrence l'ion nitrate, répandu en surface sur certains types de sol, peut atteindre la nappe au bout d'un temps relativement court.

Ces sols, dont un exemple a été rencontré, contrairement à ce qui était attendu, sur le site expérimental retenu pour l'étude, se manifestent par un comportement hydrodynamique très différent de celui des sols sableux qui avaient fait jusque là l'objet de nos expériences et de celles décrites dans la littérature.

Il semble que cette différence de comportement soit essentiellement due à l'apparition de fentes de retrait en période sèche. C'est ce phénomène qui rendrait la nappe sous-jacente très vulnérable en période estivale alors que peuvent se produire des pluies très violentes et que certaines parcelles sont soumises à une irrigation périodique.

Cette étude peut avoir deux types de suites :

- sur le plan pratique, il faudrait préciser quels sont exactement les types de sol qui sont l'objet des phénomènes observés. Leur cartographie permettrait alors dans une région donnée - et pour commencer la Beauce dont la nappe révèle des taux en nitrates particulièrement élevés - d'apprécier la vulnérabilité des aquifères sous-jacents ;

- sur le plan théorique, il faudrait rechercher un modèle qui puisse rendre compte des phénomènes particuliers que les modèles proposés pour les milieux poreux continus ne peuvent représenter correctement.

Mais, quel que soit l'objet poursuivi, il faudra évidemment passer par de nouvelles expériences à la fois plus approfondies et variées, tant en ce qui concerne la reconnaissance et le choix des sites que les conditions des essais, qui devront principalement s'étaler sur une période plus longue et se rapprocher des conditions naturelles.

## B I B L I O G R A P H I E

---

- /1/ M. BONNET, A. LALLEMAND-BARRES, A. SAMSON .- Etude de la propagation des nitrates sous cultures de maïs irriguées dans les Landes .- Colloque CENECA, Paris, mars 1976.
- /2/ M.G. LE CARDINAL .- DIFSOL - Modèle de diffusion de l'eau dans un sol homogène .- Rapport C.I.S.I., Cadarache, n° 101.
- /3/ M.G. LE CARDINAL .- MULTISOL - Modèle de diffusion de l'eau dans un sol comportant plusieurs couches de natures différentes .- Rapport C.I.S.I., Cadarache, n° 102.
- /4/ J.F. DAIAN (1971) .- Etude "in-situ" des transferts d'eau dans la zone non saturée : application à une méthode d'estimation du bilan hydrique .- Thèse Dr Ingénieur, Univ. Sc. et méd. Grenoble.
- /5/ J.P. GAUDET (1974) .- Ecoulement transitoire d'eau et de sel dans la zone non saturée .- Thèse, Univ. Sc. et méd. Grenoble.
- /6/ M.Th. VAN GENUCHTEN, P.J. WIERENGA .- Simulation of one-dimensional solute transfer in porous media .- New Mexico State University, Agricultural experiment station, Bulletin 628, novembre 1974.
- /7/ H. VAN KEULEN, C.G.E.M. VAN BEEK .- Water movement in layered soils. A simulation model .- Neth. J. Agri. Sci. 19 (1971) 138-153.
- /8/ A. LALLEMAND-BARRES .- Contribution à l'étude de la propagation des polluants dans la zone non saturée .- O.M.S. Rapport BRGM 73 SGN 396 AME.
- /9/ S.P. WIND et W. VAN DOORME .- A numerical model for the simulation of unsaturated vertical flow of moisture in soils .- Journal of Hydrology, 24 (1975), 1-20.