DEFINITION DES PROPRIETES HYDRODYNAMIQUES DES SOLS DU PERIMETRE SUCRIER D'ANALAIVA

O. ANDRIAMANAMPISOA - S. RANDRIANARISON - M. RANDRIANARISON - M. RANOHARISON

P. MARINI P. VILLEMIN O. JOURDAN

S O M M A I R E

Page

A - PROPRIETES PHYSIQUES ET NEUTRONIQUES DES SOLS.

1 - Profils densité, porosité..... 4

2 - Profils granulométriques..... 4

3 - Propriétés neutroniques..... 9

B - CINETIQUES D'INFILTRATION ET DE RESSUYAGE : Etude des propriétés hydrodynamiques des sols.

I - GENERALITES ET RAPPELS THEORIQUES.

1 - But et principe..... 11

2 - Dispositif expérimental..... 11

3 - Définition des paramètres et méthodes de dépouillement des résultats..... 11

II - ANALYSE DES RESULTATS.

ANALAIVA If 1485..... 14

ANALAIVA If 1700..... 20

ANALAIVA I Défriche..... 25

ANALAIVA Ib 900..... 30

CONCLUSION..... 34

ANNEXES 36

Ce rapport a pour but de présenter et d'analyser les résultats obtenus à ANALAIVA dans le cadre de la Convention 1976.6 Hp passée entre le Laboratoire de Radio-Isotopes et le Centre National de la Recherche Appliquée au Développement Rural.

Il s'agissait de définir les propriétés hydrodynamiques des quatre principaux types de sol décrits par les pédologues sur les 800 hectares correspondant à la première tranche du projet sucrier de la plaine de MORONDAVA.

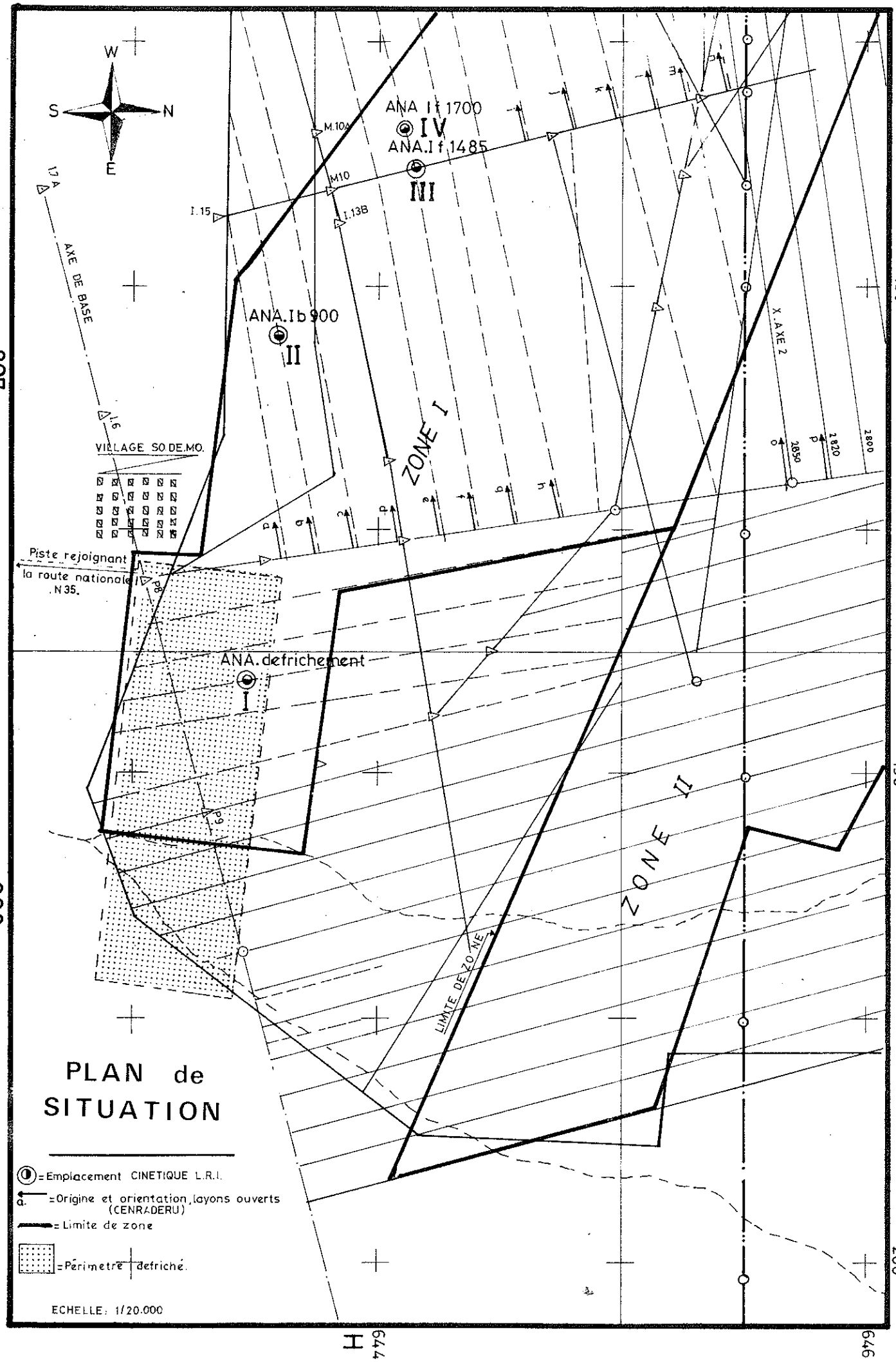
Les techniques utilisées : gammamétriques (densités des sols en place) et neutroniques (mesures de l'humidité) ont été exposées dans un rapport antérieur (1). Nous n'y reviendrons (Cf. page 11) que pour décrire le dispositif central des études cinétiques que nous avons complété par l'adjonction de tensiomètres dont les données combinées à celles de la sonde à neutrons permettent de calculer succion et conductivité hydraulique en fonction de l'humidité.

Pour chaque type de sol, les études cinétiques d'infiltration et de ressuyage ont été répétées en trois points, choisis dans la mesure du possible loin de toute masse végétale importante afin d'éviter au maximum l'influence des systèmes racinaires en place. La répétitivité des données numériques recueillies sur chaque site a confirmé la validité du choix de nos emplacements que nous désignerons successivement (Cf. plan de situation page 2) par :

- ANA. If 1485 A, B, C
- ANA. If 1700 A, B, C
- ANA. I Déf. A, B, C
- ANA. Ib 900 A, B, C

---

(1) Convention de travail LRI/CENRADERU - Rapport de Campagne 1975


W
S
N
E
ANA I f 1700
IV
ANA.I f 1485
III
M.10A
M10
I.15
I.13B
I.7A
AXE DE BASE
I.6
ANA.Ib 900
II
VILLAGE SO.DE.MO.
ZONE I
X.AXE 2
2800
2820
2850
Piste rejoignant
la route nationale
N 35.
ANA. defrichement
ZONE II
LIMITE DE ZONE
PLAN de
SITUATION
=Emplacement CINETIQUE L.R.I.
=Origine et orientation, layons ouverts (CENRADERU)
=Limite de zone
=Périmetre défriché.
ECHELLE: 1/20.000
207
208
196
198
200
644
646
H

A - PROPRIETES PHYSIQUES ET NEUTRONIQUES DES SOLS :

densité, porosité, granulométrie, étalonnage neutronique

1 - Profils densité, porosité

Les densités du sol en place (densités apparentes) ont été mesurées à l'aide du gammadensimètre DR 18 à partir des quatre fosses pédologiques caractéristiques.

Pour les trois premiers, les densités apparentes sèches varient de 1,5 à 1,8 et ont une valeur moyenne de 1,7 que nous avons déjà rencontrée sur les "sables roux" de BEZEZIKA, ANDRANOVORY, TANANDAVA... La porosité totale correspondante est d'environ 37 % dont, nous le verrons plus loin, 64 % en macroporosité, 36 % en microporosité.

En Ib 900, la densité relativement faible en surface passe de 1,6 à 1,8 entre 80 et 100 cm ; la diminution correspondante de la porosité totale (37 à 29 %) s'accompagne d'une augmentation relative de la microporosité. Entre 100 et 160 les mesures n'ont pas pu être faites, le sol trop dur n'ayant pas permis le prélèvement d'un échantillon à la tarière pour la mesure de l'humidité pondérale. Au-delà de cette couche compacte, la densité égale à 1,7 correspond à nouveau à un horizon sableux.

2 - Profils granulométriques

- Les tableaux 1, 2, 3, 4 en annexe regroupent les profils granulométriques représentatifs des 12 points de mesures neutroniques.

- Ci-après nous donnons les valeurs moyennes obtenues sur chaque site (moyenne A, B, C) et leur représentation graphique.

- Dans l'ensemble la texture est assez grossière et caractéristique d'un sol ferrugineux tropical peu lessivé, modal. Cependant, le taux d'argile passe de 8-10 % en If 1485 et If 1700, à 10-16 % en I Défriche et 16-25 % en Ib 900.

Les trois premiers sols sont homogènes sur tout le profil et cette homogénéité dans la texture se traduira par la continuité quasi absolue et la constance de toutes les propriétés hydrodynamiques.

Par contre Ib 900, assez largement représenté sur le périmètre, aura un comportement très différent vis-à-vis de l'eau du fait de la présence d'une couche compacte comprise entre deux horizons sableux, couche dont la profondeur et l'épaisseur varie avec la situation. Sur le profil apparaissent des taches caractéristiques d'une hydromorphie due à la formation temporaire en saison des pluies d'une nappe perchée.

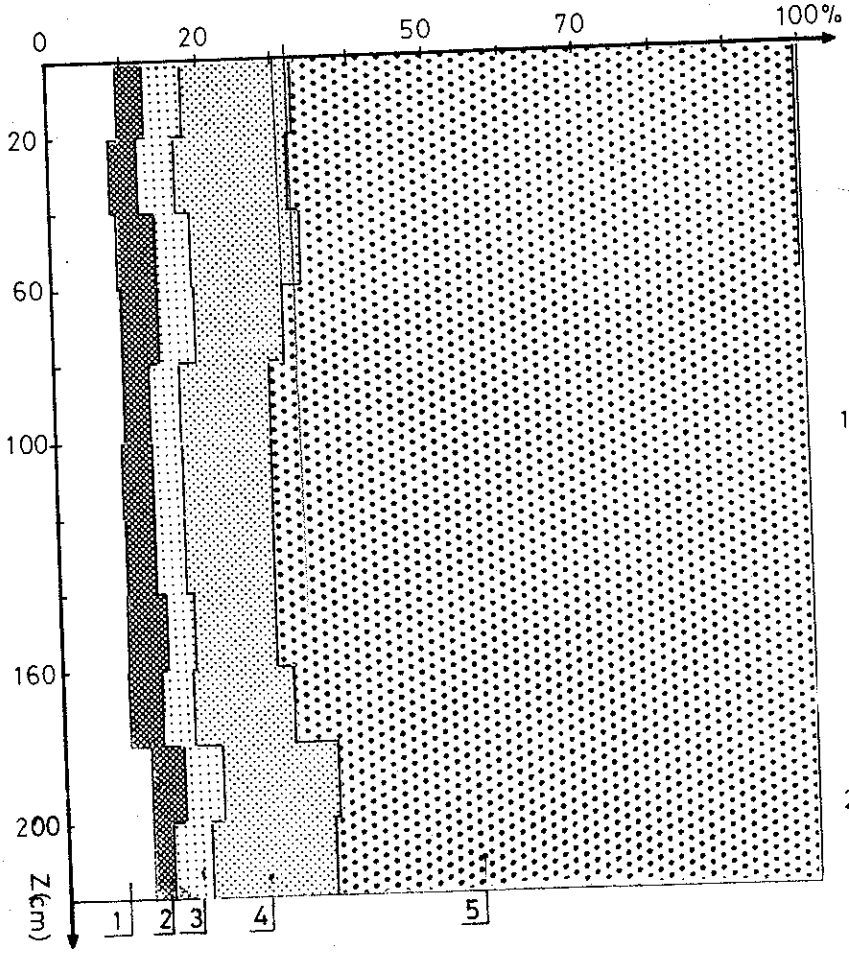


Fig. 2 _ ANA. If 1485 : Diagramme de distribution des particules de terre fine sèchée à 105° .

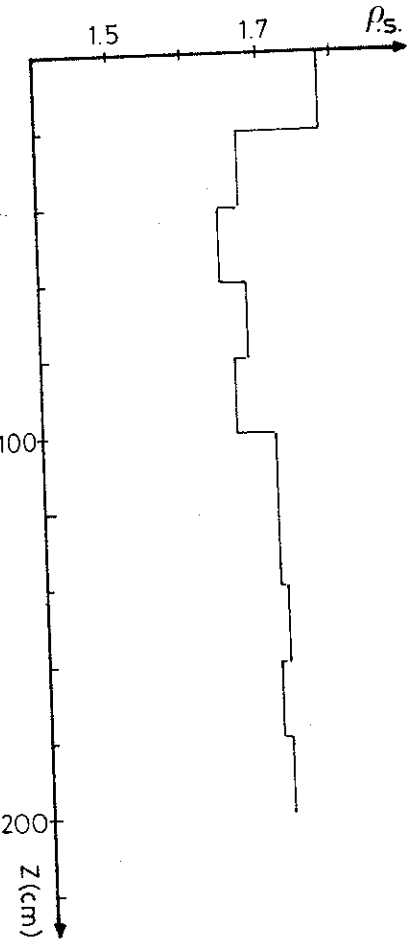


Fig.3 _ ANA.If 1485: Profil des densités apparentes sèches.

TABLEAU.1 _ ANA.If 1485: Analyses granulométriques moyennes.

Profondeur Z(cm)	Argiles [1]	Limons fins [2]	Limons grossiers [3]	Sables fins [4]	Sables grossiers [5]	Matieres organiques [6]
0 _ 20	9,3	3,3	5,1	15,?	67,0	0,63
20 _ 40	8,0	3,8	5,1	15,0	67,7	0 40
40 _ 660	9,5	4,4	4,8	14,7	65,9	0,23
60 _ 80	9,3	4,7	4,4	12,4	68,9	0,18
80 _ 100	9,2	3,3	4,0	11,8	71,0	0,14
100 _ 120	8,6	4,1	4,?	12,1	70,3	
120 _ 140	8,9	3,9	3,6	12,1	71,5	
140 _ 160 160 _ 180	8,7 8,4	5,2 4,5	3,6 4,3	11,0 12,9	72,7 69,4	
180 _ 200 200 _ 220	10,7 10,7	4,9 2,9	5,0 5,0	15,1 16,4	65,3 64,3	

Les valeurs sont exprimées en pourcent de terre fine sèchée à 105°.

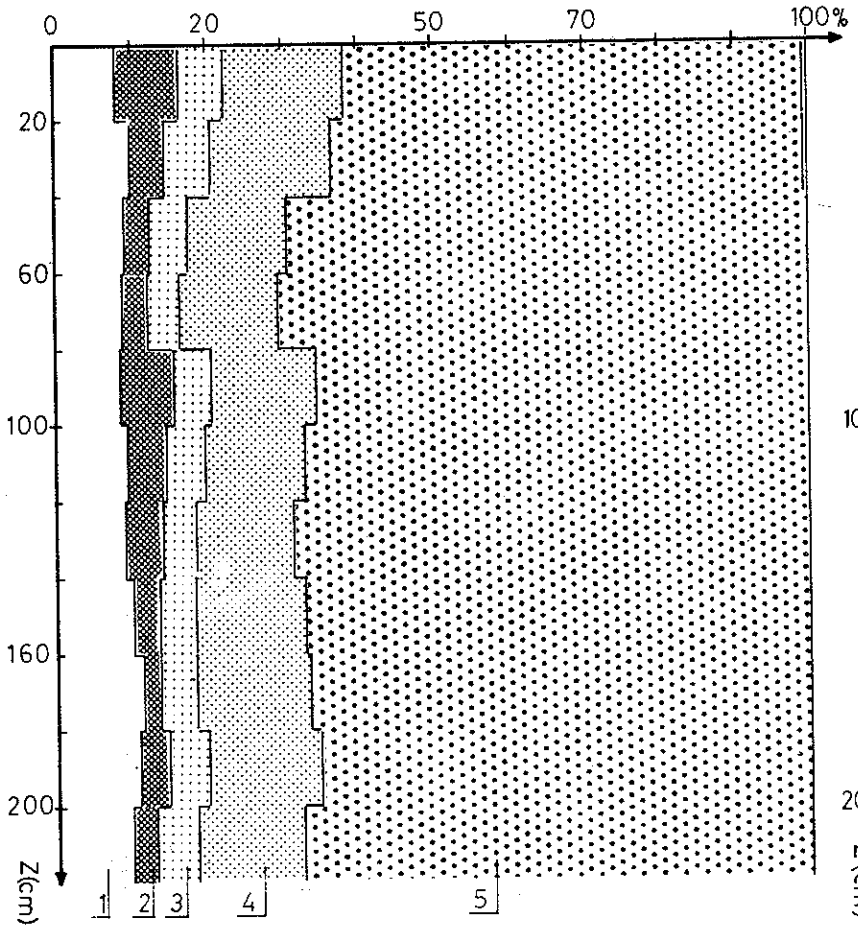


Fig. 4_ ANA. If 1700 : Diagramme de distribution des particules de terre fine sèchée à 105°

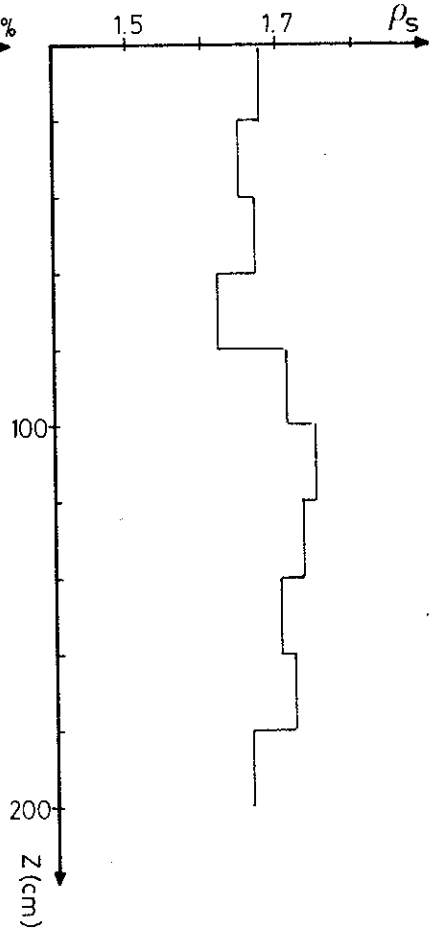


Fig.5_ ANA. If 1700 : Profil des densités apparentes sèches.

TABLEAU.2_ ANA.If1700 : Analyses granulométriques moyennes.

Profondeur Zcm	Argiles 1	Limons fins 2	Limons grossiers 3	Sables fins 4	Sables grossiers 5	Matières organiques 6
0 _ 20	8,1	8,1	6,4	15,9	63,3	0,69
20 _ 40	10,0	4,7	6,1	16,0	63,7	0 48
40 _ 60	9,3	3,3	4,7	13,0	68,5	0,34
60 _ 80	9,0	3,0	4,6	12,3	69,2	0 25
80 _ 100	8,6	6,9	4,9	13,9	66,9	0,13
100 _ 120	9,6	4,7	4,9	13,6	67,5	
120 _ 140	9,0	4,9	4,7	13,0	68,4	
140 _ 160 160 _ 180	10,0 11,?	3,5 2,1	4,9 4,9	13,9 15,1	67,5 66,6	
180 _ 200 200 _ 220	10,8 9,8	3,8 3,1	5,4 5,6	14,8 14,0	65,3 66,3	

Les valeurs sont exprimées en pourcent de terre fine sèchée à 105°.

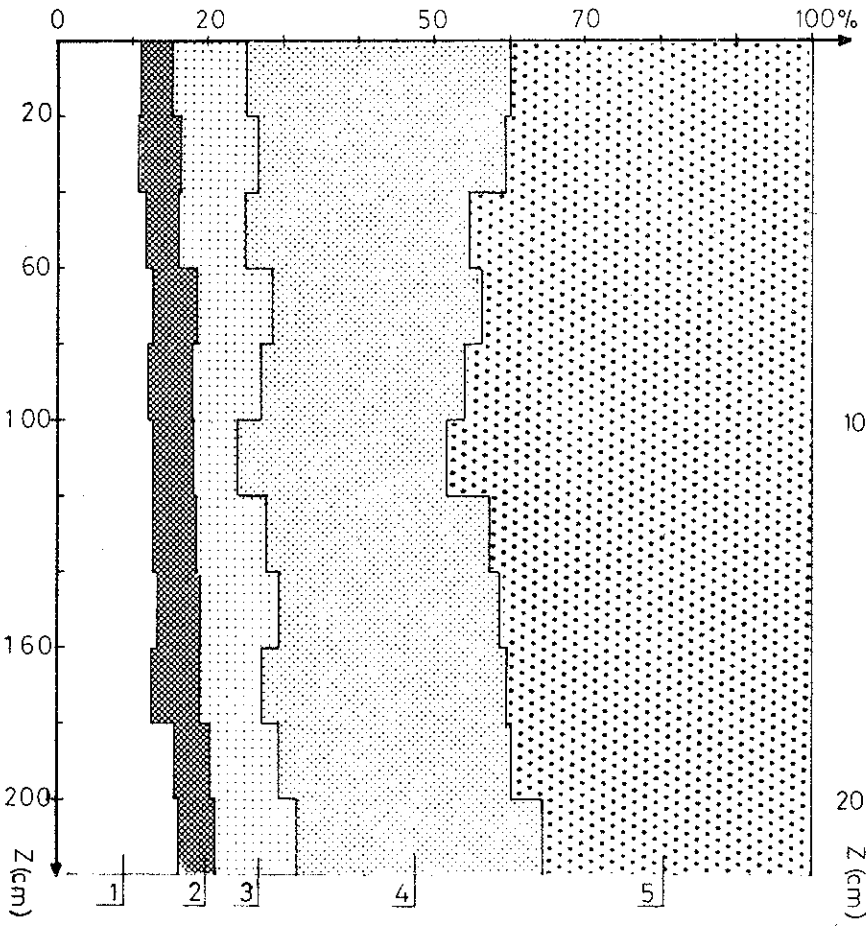


Fig. 6_ ANA. I dèf. : Diagramme de distribution des particules de terre fine sèchée à 105°.

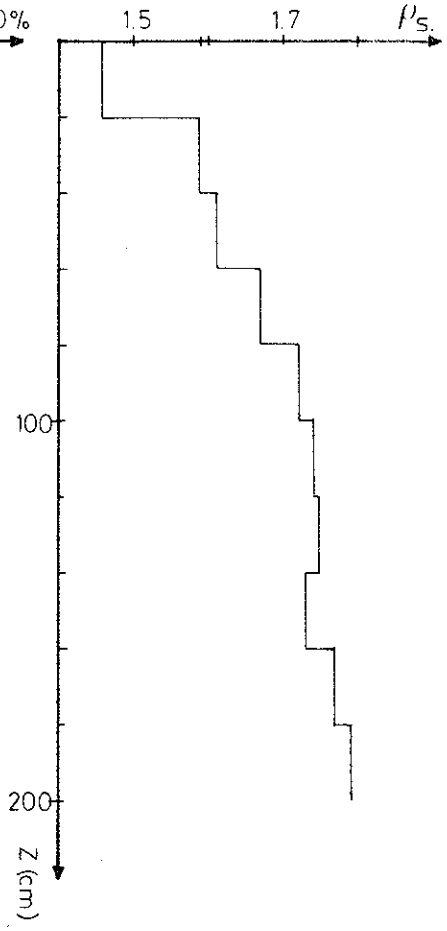


Fig. 7_ ANA I dèf : Profil des densités apparentes sèches.

TABLEAU 3_ ANA. I dèf. : Analyses granulométriques moyennes.

Profondeur Zcm	Argiles 1	Limons fins 2	Limons grossiers 3	Sables fins 4	Sables grossiers 5	Matières organiques 6
0 _ 20						
20 _ 40						
40 _ 60						
60 _ 80						
80 _ 100						
100 _ 120						
120 _ 140						
140 _ 160 160 _ 180						
180 _ 200 200 _ 220						

Les valeurs sont exprimées en pourcent de terre fine sèchée à 105°.

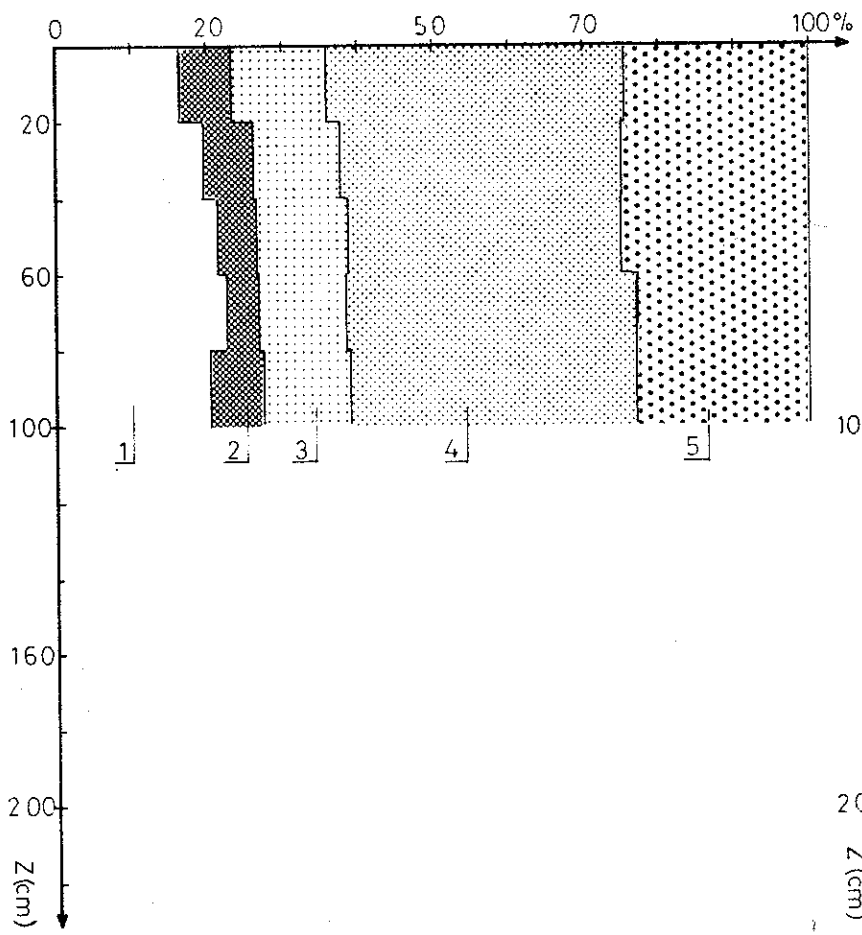


Fig. 8_ ANA. Ib 900 : Diagramme de distribution des particules de terre fine sèchée à 105° .

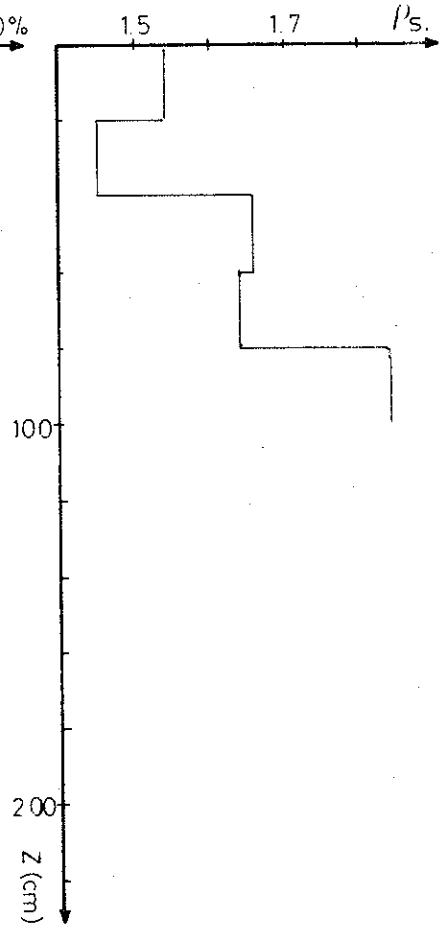


Fig.9_ ANA Ib 900 : Profil des densités apparentes sèches

TABLEAU.4_ ANA.Ib900 : Analyses granulométriques moyennes.

Profondeur Zcm	Argiles 1	Limons fins 2	Limons grossiers 3	Sables fins 4	Sables grossiers 5	Matieres organiques 6
0 _ 20	16,6	6,6	12,8	39,1	[illegible]	[illegible]
20 _ 40	19,7	6,4	[illegible]	37,6	25,6	[illegible]
40 _ 60	[illegible]	5,5	[illegible]	35,9	[illegible]	[illegible]
60 _ 80	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
80 _ 100	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
	Les moyennes n'ont pas été calculées en raison de la variation de texture du sol avec la profondeur étant différente en chaque des sols.					

Les valeurs sont exprimées en pourcent de terre fine sèchée à 105° .

3 - Propriétés neutroniques

Nous entendons par là les coefficients A et B des droites d'étalonnage, de forme générale $N = A H_v + B$, représentatives des pouvoirs absorbant et diffusant de chaque sol vis-à-vis des neutrons. Les valeurs numériques consignées dans le tableau 5, ont été obtenues au Centre d'Etudes Nucléaires de CADARACHE (Service de Radio-Agronomie) sur des échantillons prélevés sur les fosses densité.

Tableau 5 - Coefficients des droites d'étalonnage neutronique

	Horizons	A	B
ANA. If 1485	0 - 10	13,9	47,4
	10 - 40	13,1	- 5,4
	40 - 90	14,0	8,5
	90 - 220	14,1	14,3
ANA. If 1700	0 - 5	12,8	21,0
	5 - 25	13,4	10,9
	25 - 40	14,0	17,3
	40 - 70	12,9	6,9
	70 - 180	13,7	26,7
ANA. I Défrichement	0 - 10	12,6	15,7
	10 - 30	12,6	- 9,5
	30 - 50	13,1	4,2
	50 - 100	12,4	- 0,7
	100 - 220	13,4	12,8
ANA. Ib 900	0 - 10	12,7	13,8
	10 - 25	12,7	11,0
	25 - 55	12,6	5,0
	55 - 80	12,9	19,1
	80 - 110	13,4	51,4
	110 - 150	12,8	35,3

B - CINETIQUES D'INFILTRATION ET DE RESSUYAGE :

Etude des propriétés hydrodynamiques des sols

I - GENERALITES ET RAPPELS THEORIQUES

1 - BUT ET PRINCIPE

Une certaine surface de sol est maintenue sous une charge d'eau constante jusqu'à ce que le profil soit saturé sur une profondeur déterminée. L'étude des processus cinétiques d'infiltration et de ressuyage à l'aide d'humidimètres à neutrons et de tensiomètres permet de définir quelques propriétés hydrodynamiques des sols :

- régimes d'infiltration et de ressuyage,
- infiltrabilité permanente,
- capacité de rétention,
- courbes caractéristiques du sol : succion fonction de l'humidité,
- conductivité hydraulique en fonction de l'humidité.

2 - DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Deux anneaux concentriques en tôle de 2 mm délimitent sur le sol, autour d'un tube d'accès pour sonde à neutrons, des surfaces de 1 m^2 et de 5 m^2, la partie inférieure de ces anneaux étant enterrée de 5 cm.

L'alimentation en eau des deux compartiments est assurée séparément et de telle façon que soit maintenue une charge constante de 3 cm dans tout le dispositif.

Des tensiomètres sont placés dans l'anneau central aux profondeurs de 15, 30, 60, 90, 120 et 150 cm.

3 - DEFINITION DES PARAMETRES ET METHODES DE DEPOUILLEMENT DES RESULTATS

- On suppose que dans le volume de sol situé à l'aplomb de l'anneau central le flux hydrique est unidimensionnel vertical, l'anneau extérieur délimitant une "zone de garde" qui réduit sinon supprime l'écoulement latéral.

La courbe de l'infiltration cumulée peut être établie à partir de la somme dans le temps des volumes d'eau traversant la surface du sol (Z = 0) et s'écoulant dans le profil ou à partir des variations de stock mesurées à la sonde entre les profils hydriques successifs.

A cette représentation, nous préférerons celle du régime (ou débit) d'infiltration en fonction du temps. Egal à la pente $\frac{dq}{dt}$ de la tangente à la courbe d'infiltration cumulée, ce régime dépend, en début d'humectation, de l'humidité initiale du sol ; il décroît ensuite généralement avec le temps pour tendre asymptotiquement vers une constante caractéristique de chaque sol appelée infiltrabilité permanente.

La vitesse d'avancement du front d'humectation, représentative, pour un état hydrique donné de la perméabilité ou conductivité hydraulique est calculée. La cote du front d'humectation en fonction du temps est donnée par la position du point d'inflexion des profils neutroniques.

- Pendant la phase de ressuyage qui commence en fait dès que la charge à la surface s'annule, le sol est recouvert de manière à limiter au maximum l'évaporation et les mouvements d'eau ascendants qui en découlent.

La courbe du ressuyage cumulé est tracée en fonction du temps à partir de la somme des volumes d'eau qui quittent la tranche de sol considérée par percolation. Pour chaque horizon de sol, la courbe représentative du régime de ressuyage fait apparaître deux cinétiques superposées : l'une rapide et l'autre lente, toutes deux de forme exponentielle (*). La première est liée principalement aux écoulements gravitaires, la seconde fait intervenir les forces capillaires. La capacité de rétention est identifiée, pour un horizon donné, à la valeur du compartiment d'eau correspondant à la cinétique lente qui, représentée en coordonnées semi-logarithmiques apparaît sous forme linéaire. La C. R. est alors donnée par l'ordonnée de cette droite à l'origine du ressuyage.

- Un tensiomètre est constitué d'une bougie poreuse remplie d'eau, mise en contact avec le sol à une profondeur donnée. Cette bougie est reliée par un circuit étanche à un système manométrique (colonne de mercure ou manomètre à lecture directe).

L'eau de la bougie a tendance à sortir pour humecter le sol qui exerce sur cette eau une succion. Quand le sol est très humide la succion exercée par le sol est faible et la mise en équilibre est facile. Quand le sol est très sec, l'eau de la bougie est fortement attirée vers l'extérieur. Cette force d'attraction se traduit, dans la bougie, par une dépression qui est transmise au manomètre. Les relations entre la succion et l'humidité sont appelées "courbes caractéristiques du sol".

(*) Marcesse 1967

L'eau du sol se déplace vers les potentiels décroissants : les principales forces responsables du mouvement de l'eau sont dues aux différences (aux gradients) de potentiel de succion et de potentiel gravitaire.

Quand la succion est forte (zone sèche) l'eau des zones plus humides se déplacera vers ces zones sèches.

Quand il n'y a pas de succion, comme dans l'eau libre d'un fleuve, l'eau se déplacera dans le sens des potentiels gravitaires décroissants, c'est-à-dire du haut vers le bas.

Dans le sol, ces deux potentiels coexistent et l'un peut être prépondérant ; par exemple, quand le sol est saturé, la succion est nulle et l'écoulement se fait par percolation (l'écoulement est dit gravitaire). Par contre s'il existe une zone très sèche en surface et une zone humide en profondeur l'eau se déplacera du bas vers le haut (cas de l'évaporation).

Le tensiomètre mesure la succion du sol transmise de la bougie poreuse au manomètre et aussi la pression de l'eau due au potentiel gravitaire par le poids même de la colonne d'eau reliant le manomètre à la bougie.

Le tensiomètre mesure donc le potentiel total. Les mesures tensiométriques étant faites à différentes profondeurs, on peut calculer le gradient de potentiel et partant la direction des déplacements de l'eau.

Exprimé en hauteur d'eau, le potentiel total est noté H. Il est égal à la somme de la succion h et du potentiel gravitaire Z : $H = h + Z$, où Z est compté négativement en-dessous de la surface du sol.

- La quantité d'eau qui se déplace dans un sol est fonction du gradient de potentiel (Cf. plus haut) mais aussi de sa perméabilité ou conductivité hydraulique ; la perméabilité est plus élevée pour un sol sableux qui présente des cavités importantes entre les gros grains de sable que pour un sol argileux où les petites sections de passage pour l'eau créent des frottements importants ; elle est une caractéristique de chaque type de sol et varie en fonction de l'humidité.

Si $\frac{dH}{dZ}$ est le gradient de potentiel, θ l'humidité et Q la quantité d'eau passant à la cote Z (débit ou flux), la loi de Darcy généralisée aux écoulements en milieux non saturés (*) donne

$$Q = - K_\theta \frac{dH}{dZ}$$

d'où $K_\theta = - Q / \frac{dH}{dZ}$

(*) Richards 1931

II - ANALYSE DES RESULTATS

Sur les quatre sites d'observation, les valeurs obtenues en A, B, C pour les différents paramètres sont très voisines. Tandis que l'analyse des résultats numériques portera pour chaque type de sol sur les valeurs moyennes, les graphiques représenteront l'évolution des phénomènes observés à partir des dispositifs expérimentaux complets : répétition "C".

ANALAIVA If 1485

1 - Infiltration

Le front d'humectation avance très régulièrement et avec une vitesse élevée égale à 150 cm/heure.

Le régime d'infiltration a d'emblée sa valeur d'équilibre ou infiltrabilité permanente. Proche des 400 mm/h, il permet la saturation du profil jusqu'à deux mètres en moins d'une heure et demie.

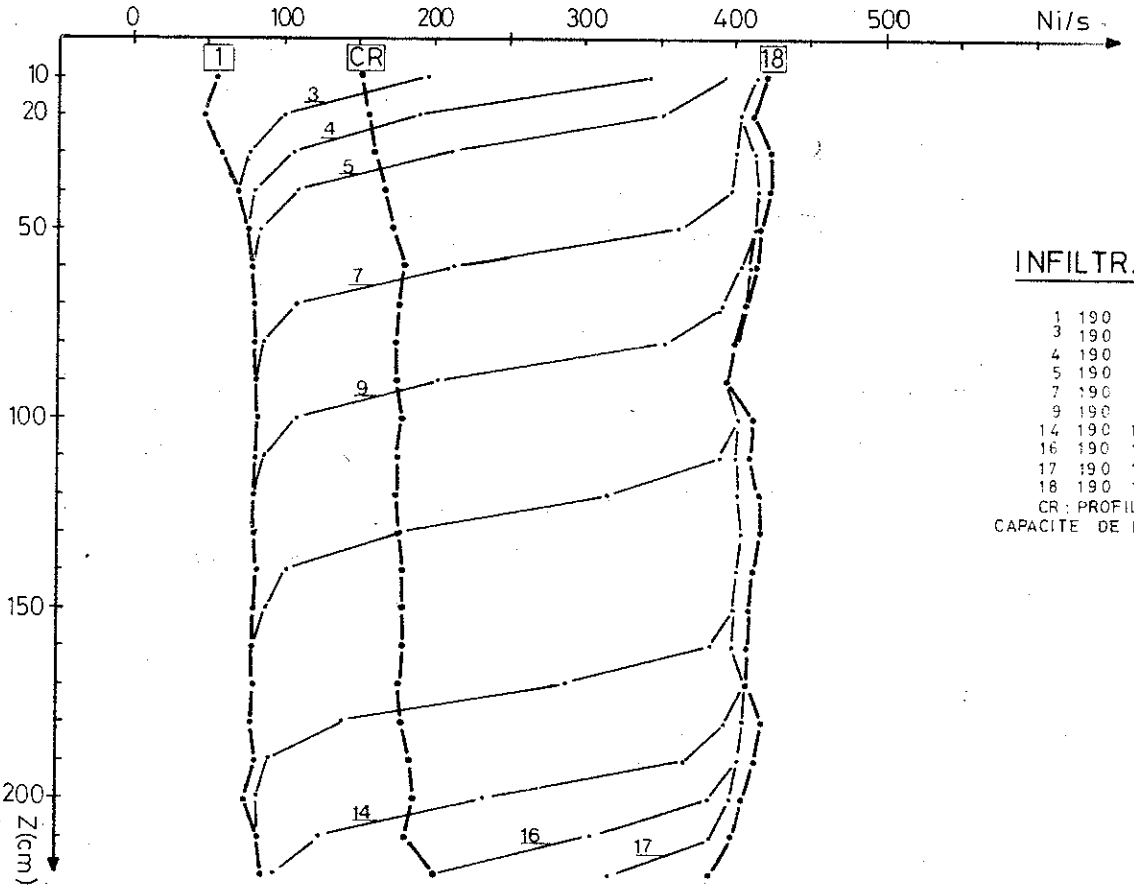
2 - Ressuyage

La phase rapide dure une trentaine d'heures. Dans l'intervalle le stock d'eau est passé entre 0 et 105 cm de 313 à 113 mm ce qui correspond à une macroporosité équivalente de 200 mm.

Le profil à la C.R. étant atteint, les réserves facilement utilisables (R.F.U.) et difficilement utilisables (R.D.U.) sont pour chaque tranche de sol :

Tranche de sol	0-50	50-100	100-200	0-100	0-200
R. F. U.	19,4	18,6	37,4	38,0	75,5
R. D. U.	14,4	11,8	28,1	26,2	54,3
R. U.	33,8	30,4	65,5	64,2	129,7

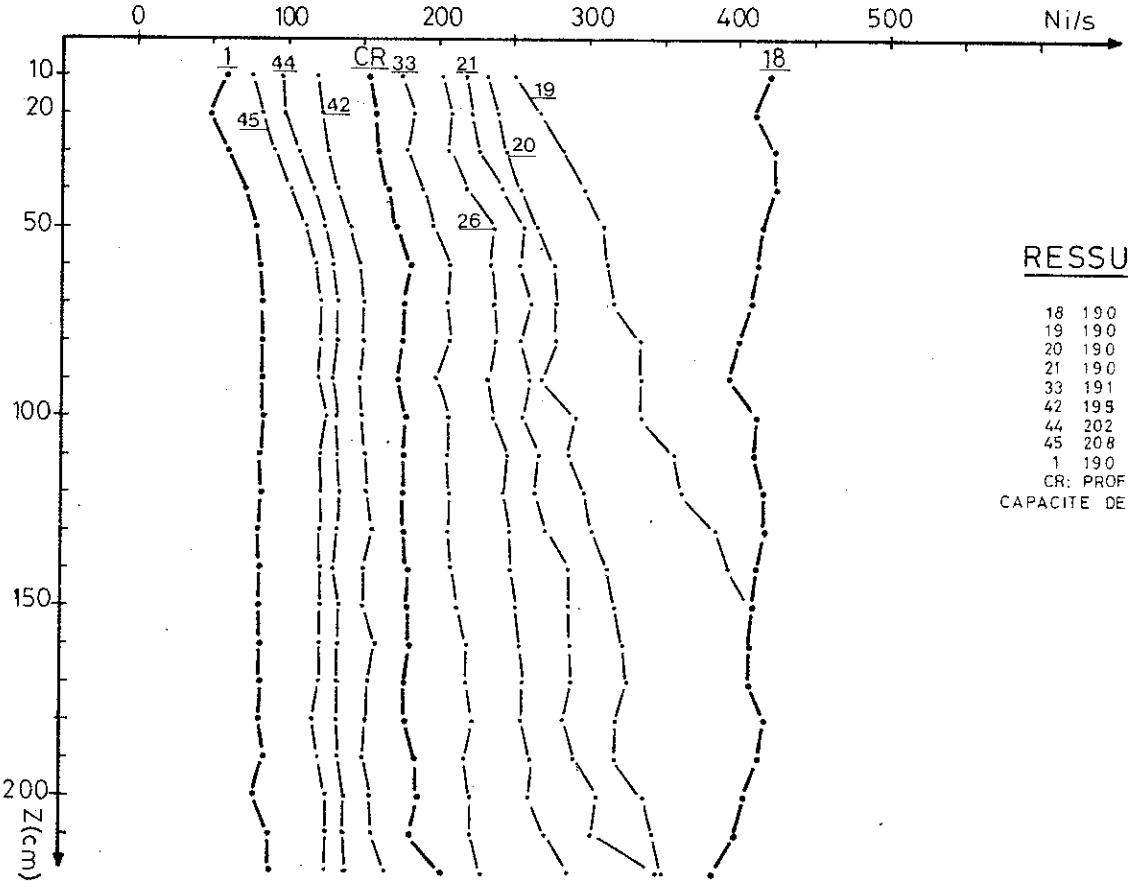
If 1485 - Evaluation par tranche de sol du potentiel de réserves exprimé en mm.



INFILTRATION

1	190	9	H15
3	190	9	19
4	190	9	22
5	190	9	26
7	190	9	36
9	190	9	49
14	190	10	37
16	190	10	48
17	190	10	51
18	190	10	55

CR : PROFIL A LA CAPACITE DE RETENTION



RESSUYAGE

18	190	10	H55
19	190	12	24
20	190	13	01
21	190	13	37
33	191	3	56
42	195	12	00
44	202	11	05
45	208	16	34
1	190	9	15

CR: PROFIL A LA CAPACITE DE RETENTION

Fig.10_ANA.If 1485 : Evolution des profils neutroniques, relevés pendant les phases d'infiltration et de ressuyage.

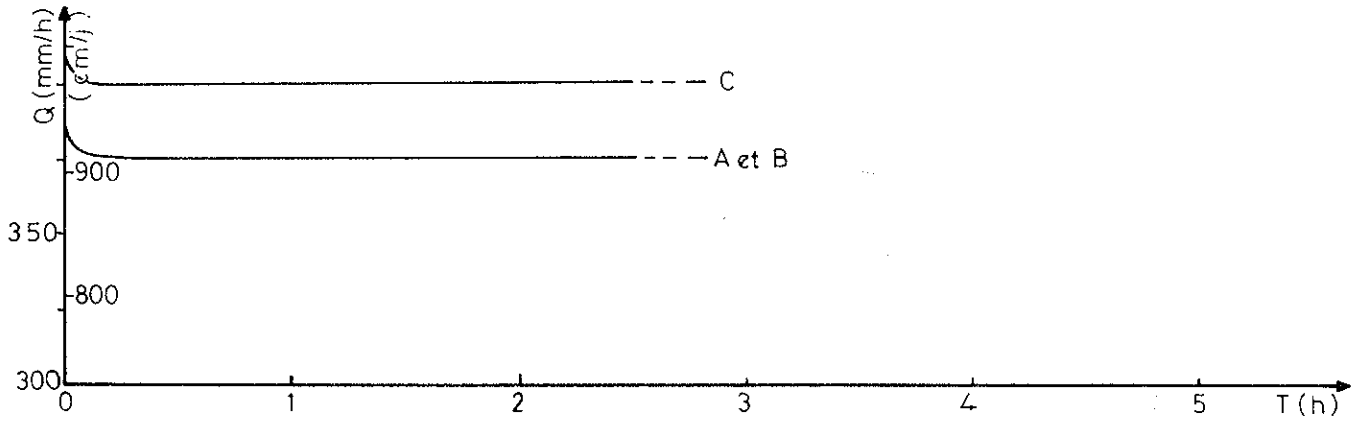


Fig.11 _ ANA.I f 1485 : Régime d'infiltration en fonction du temps. Q = f(T)

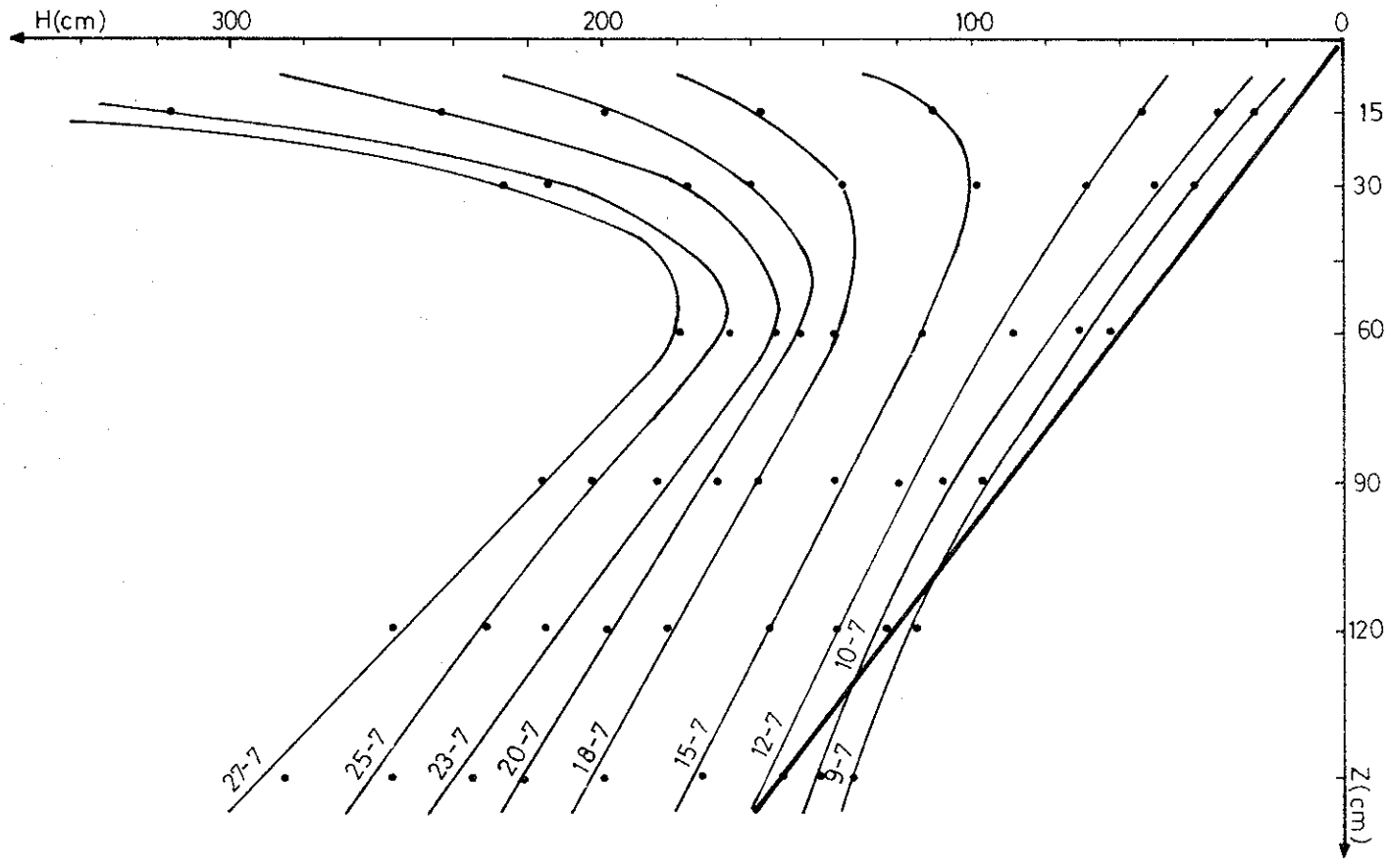


Fig.12 _ ANA.I f 1485 : Variations du potentiel total en fonction de la profondeur. H= f(Z)

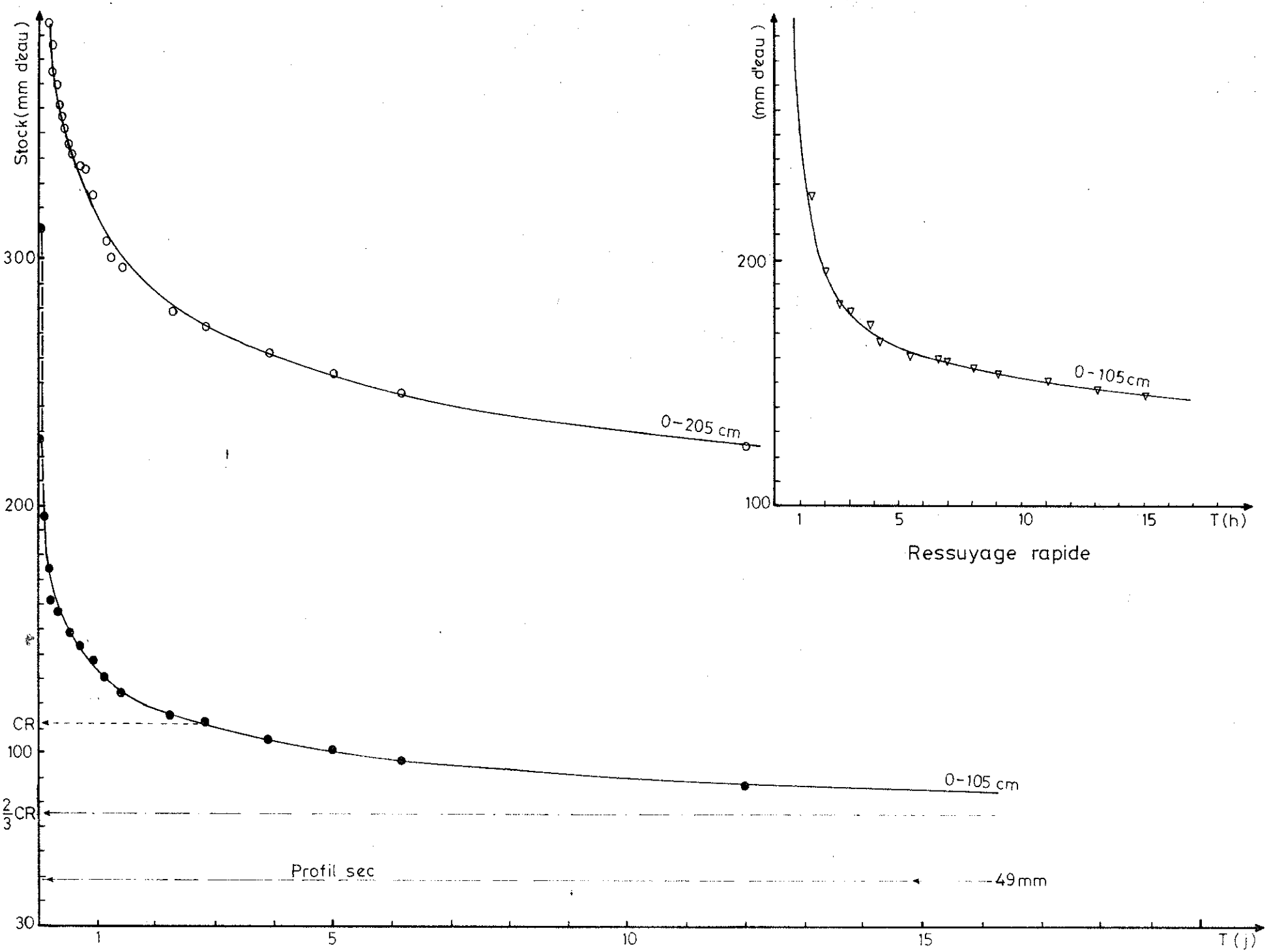


Fig.13_ANA.If 1485 : Régime de ressuyage en fonction du temps. Stock = f(T)

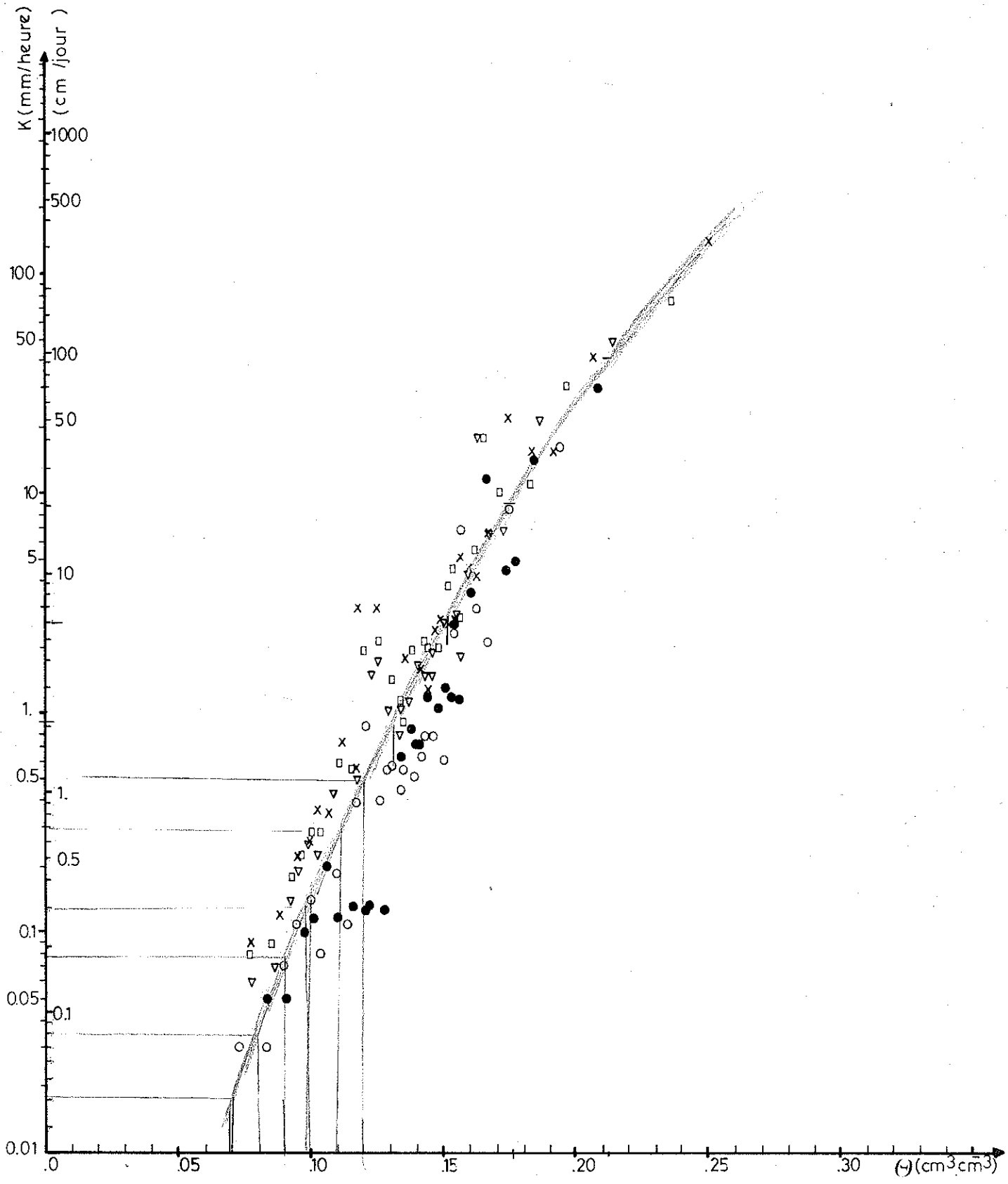


Fig.14_ANA.If 1485 C. : Conductivité hydraulique en fonction de l'humidité. K= f(Θ)

ANALAIVA If 1700

1 - Infiltration

Jusqu'à 1 mètre, la vitesse d'avancement du front d'humectation est très élevée : 150 cm/heure ; elle diminue ensuite pour se stabiliser à 100 cm/h.

La saturation du profil jusqu'à 2 mètres est obtenue en 1 h 40.

2 - Ressuyage

Comme précédemment le régime lent est atteint après 30 heures. A la phase rapide du ressuyage correspond une diminution du stock d'eau égale à 285 - 115 = 170 mm que nous assimilerons à la macroporosité.

A la capacité de rétention les réserves facilement utilisables sont assez faibles : 76,7 mm de 0 à 2 mètres.

Tranche de sol	0-50	50-100	100-200	0-100	0-200
R. F. U.	19,6	19,4	37,7	39,0	76,7
R. D. U.	17,7	16,5	35,6	34,2	69,8
R. U.	37,3	35,9	73,3	73,2	146,5

If 1700 - Evaluation par tranche de sol du potentiel de réserves exprimé en mm.

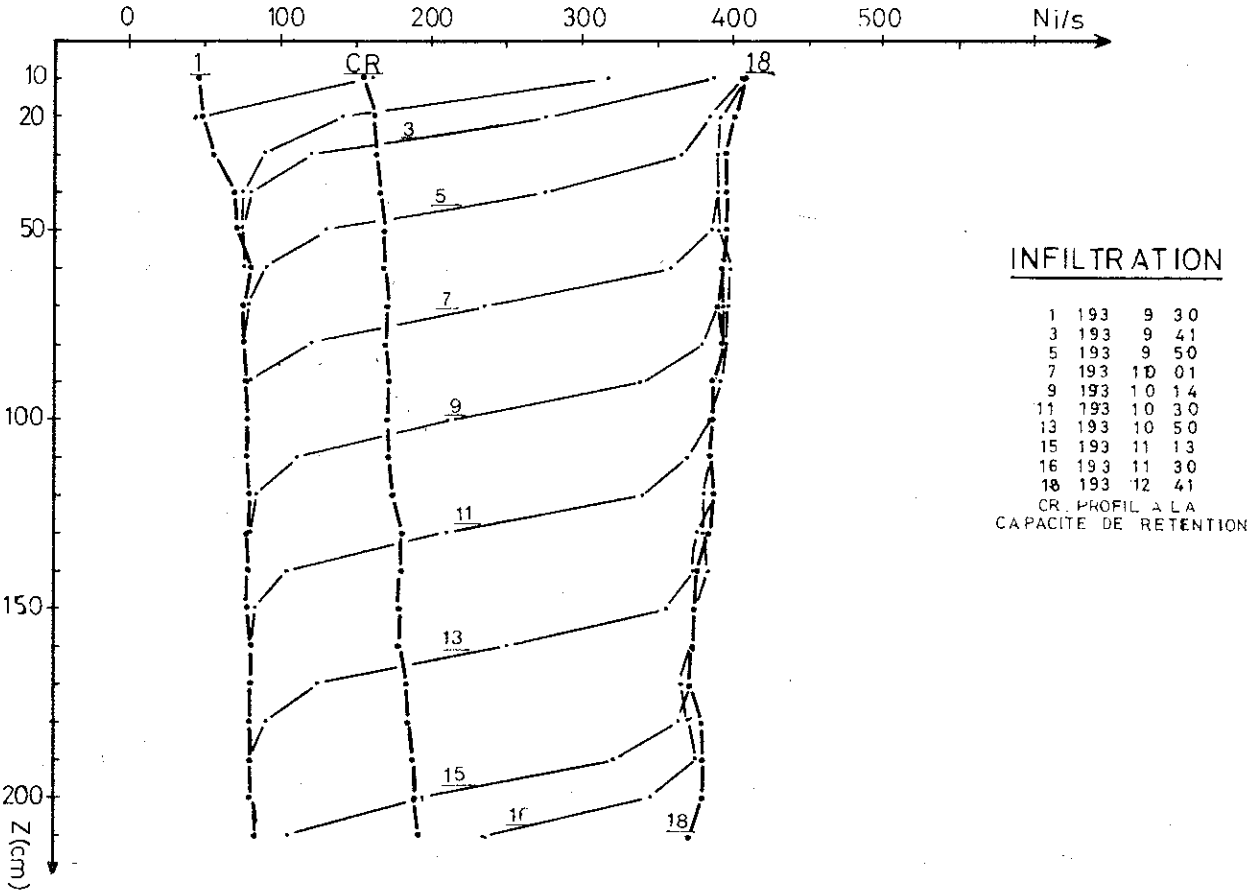
3 - Potentiel total H en fonction de la profondeur Z

En dehors de l'horizon de surface siège d'une évaporation, $\frac{dH}{dZ}$ est voisin de l'unité et K = Q.

4 - Conductivité hydraulique en fonction de l'humidité

Les courbes $K = f(\theta)$ ont une pente plus forte que pour If 1485 au voisinage de la capacité de rétention, moins forte près de la saturation. Les variations sont très rapides quand on passe de la saturation (K égale alors l'infiltrabilité permanente soit 8.400 mm/j) à la capacité de rétention où K varie de 5 à 24 mm/j avec la profondeur, plus faibles pendant la phase lente du ressuyage, K étant compris entre 0,5 et 2 mm/j aux 2/3 de la C.R.

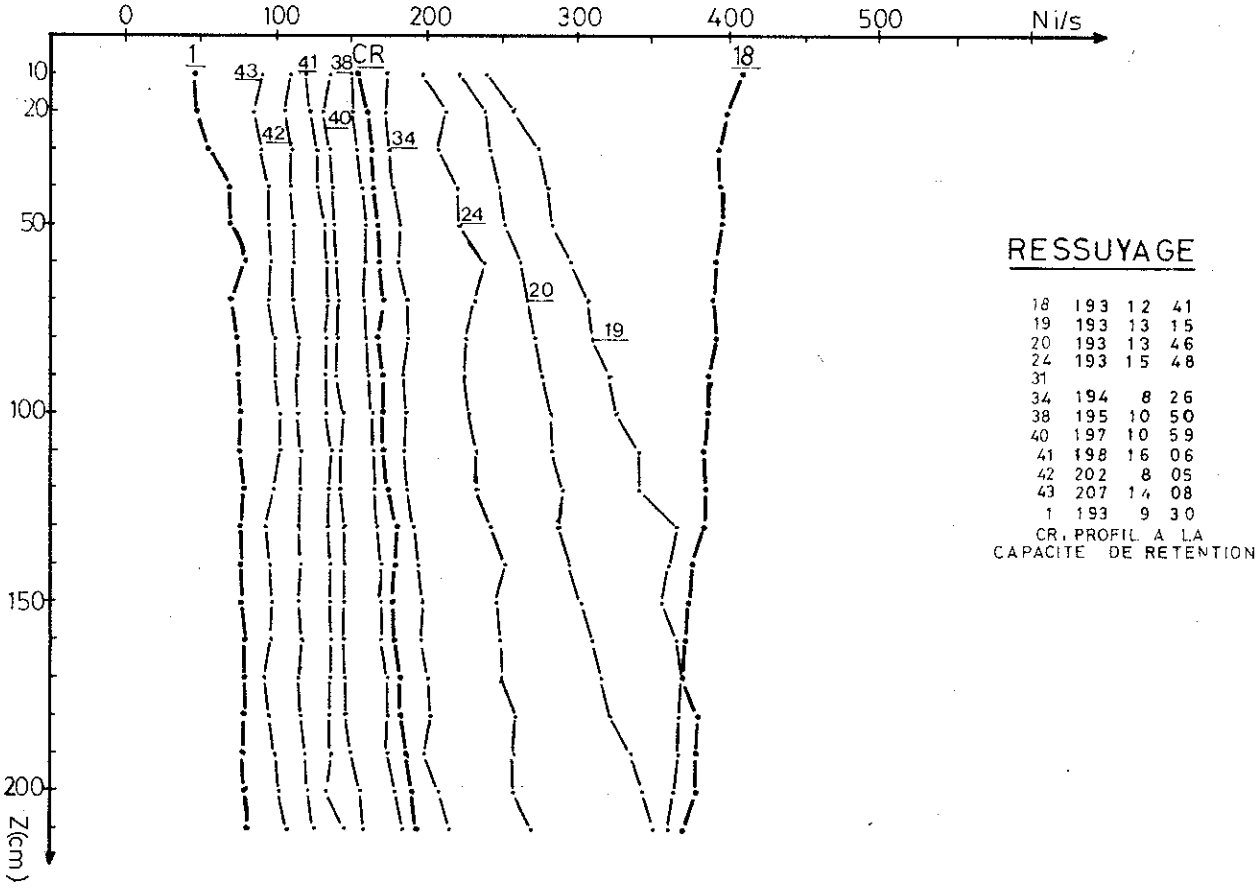
A la C.R., si $\Delta\theta = 3$ %, la conductivité passe de K à 5,5 K.



INFILTRATION

1	193	9	30
3	193	9	41
5	193	9	50
7	193	10	01
9	193	10	14
11	193	10	30
13	193	10	50
15	193	11	13
16	193	11	30
18	193	12	41

CR. PROFIL A LA CAPACITE DE RETENTION



RESSUYAGE

18	193	12	41
19	193	13	15
20	193	13	46
24	193	15	48
31			
34	194	8	26
38	195	10	50
40	197	10	59
41	198	16	06
42	202	8	05
43	207	14	08
1	193	9	30

CR. PROFIL A LA CAPACITE DE RETENTION

Fig.15 _ ANA.If1700: Evolution des profils neutroniques, relevés pendant les phases d'infiltration et de ressuyage.

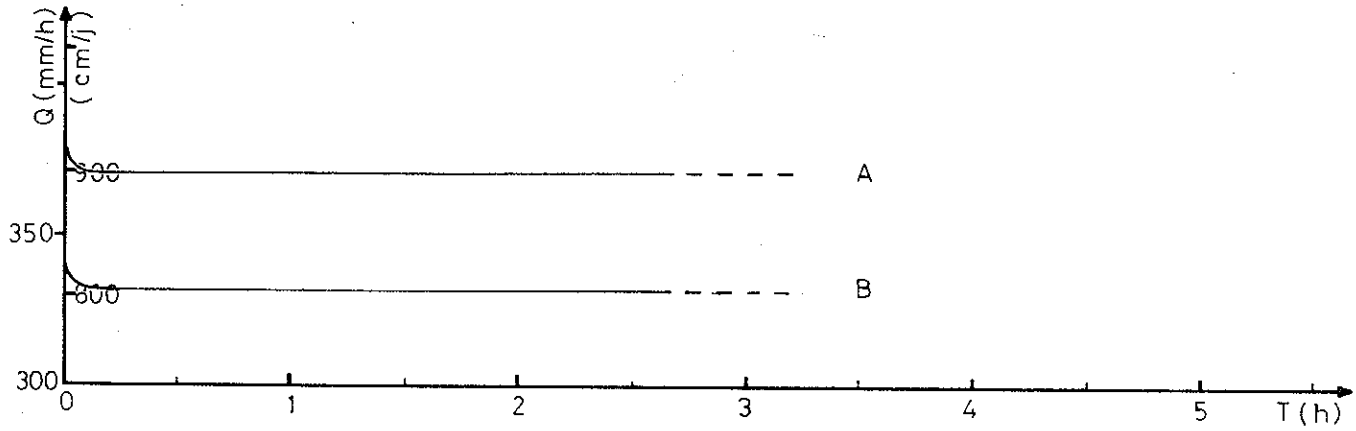


Fig.16_ANA.I f 1700 : Régime d'infiltration en fonction du temps. Q = f(T)

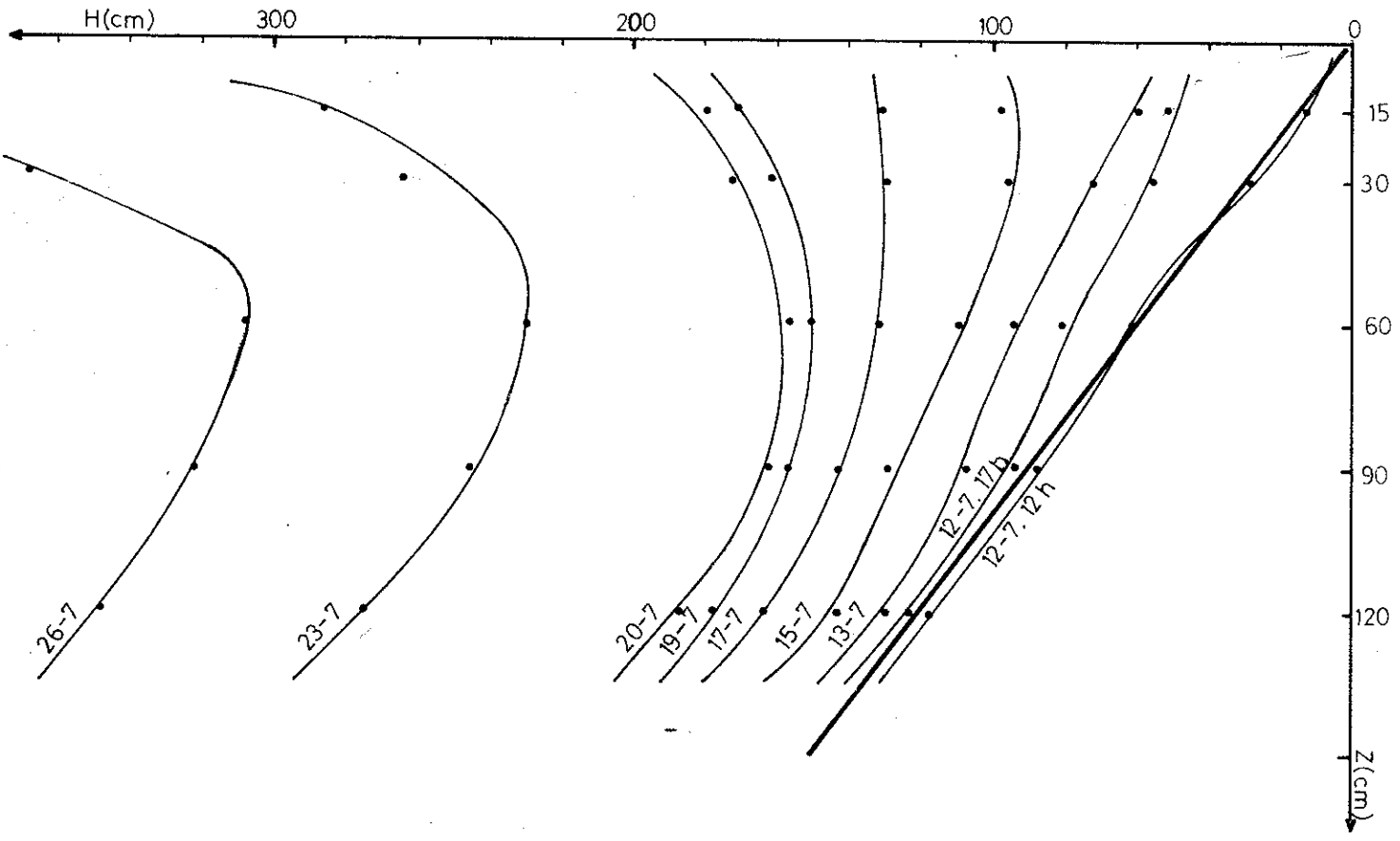


Fig.17 _ ANA.I f 1700 : Variations du potentiel total en fonction de la profondeur H= f(Z)

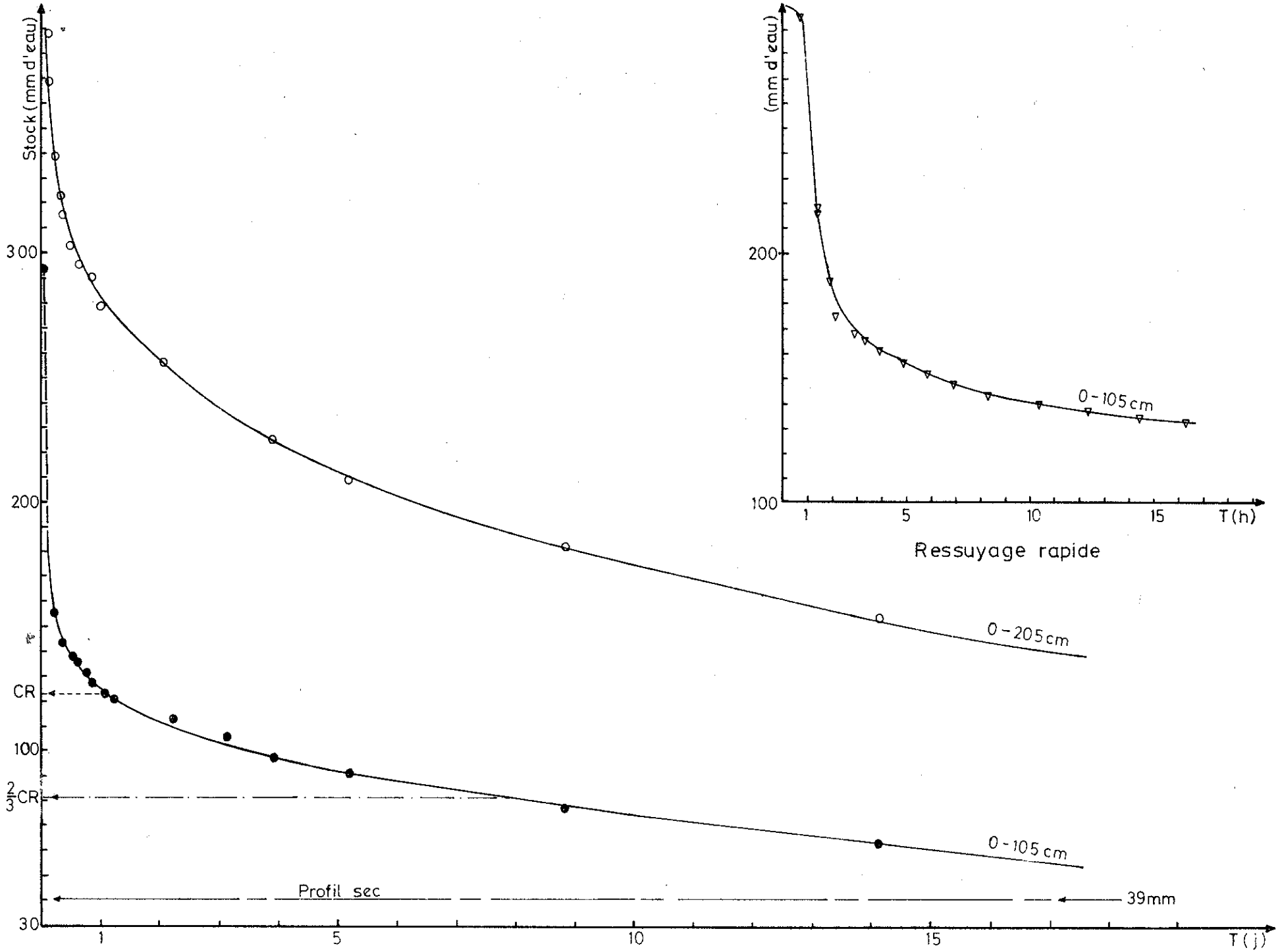


Fig.18_ANA.If1700 : Régime de ressuyage en fonction du temps. Stock = f(T)

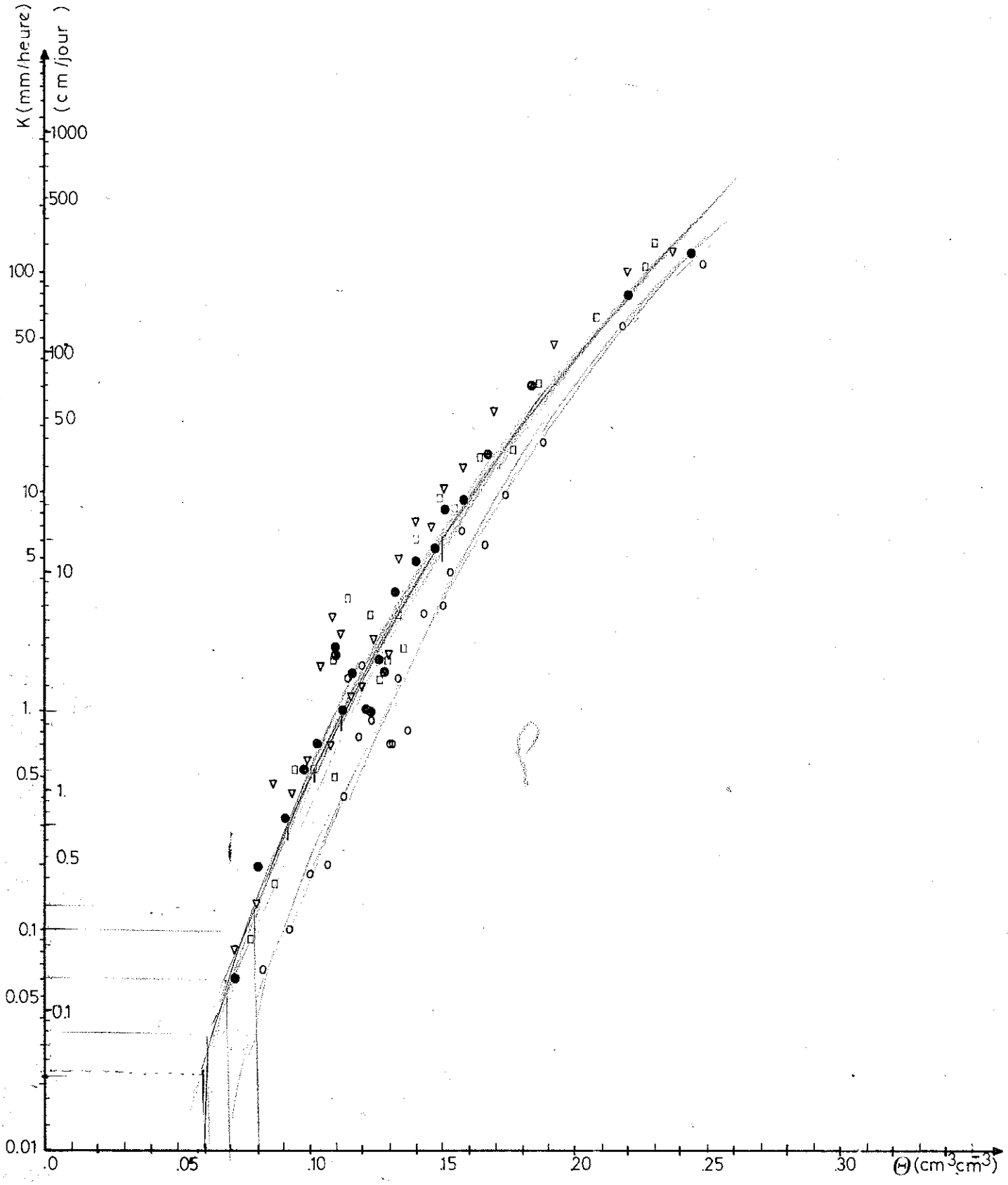


Fig.19_ ANA If 1700 C. : Conductivité hydraulique en fonction de l'humidite. K= f(Θ)

ANALAIVA I Défriche

1 - Infiltration

La vitesse d'avancement du front d'humectation égale à 120 cm/h pendant la première heure diminue ensuite pour atteindre une vitesse constante de 70 cm/h. Le profil est saturé jusqu'à 2 mètres en 2 h 30.

Le régime d'infiltration a d'emblée une valeur élevée : 320 mm/h et stable, c'est l'infiltrabilité permanente.

2 - Ressuyage

La phase rapide va durer 68 heures ; la macroporosité qui correspond à la variation du stock d'eau correspondante est égale à 339 - 165 = 174 mm.

Les réserves facilement utilisables estimées à la C.R. sont légèrement plus importantes que dans les sols précédents mais encore assez faibles.

Tranche de sol	0-50	50-100	100-200	0-100	0-200
R. F. U.	25,4	28,1	54,3	53,5	107,8
R. D. U.	28,5	17,9	37,1	46,4	83,5
R. U.	53,9	46,0	91,4	99,9	191,3

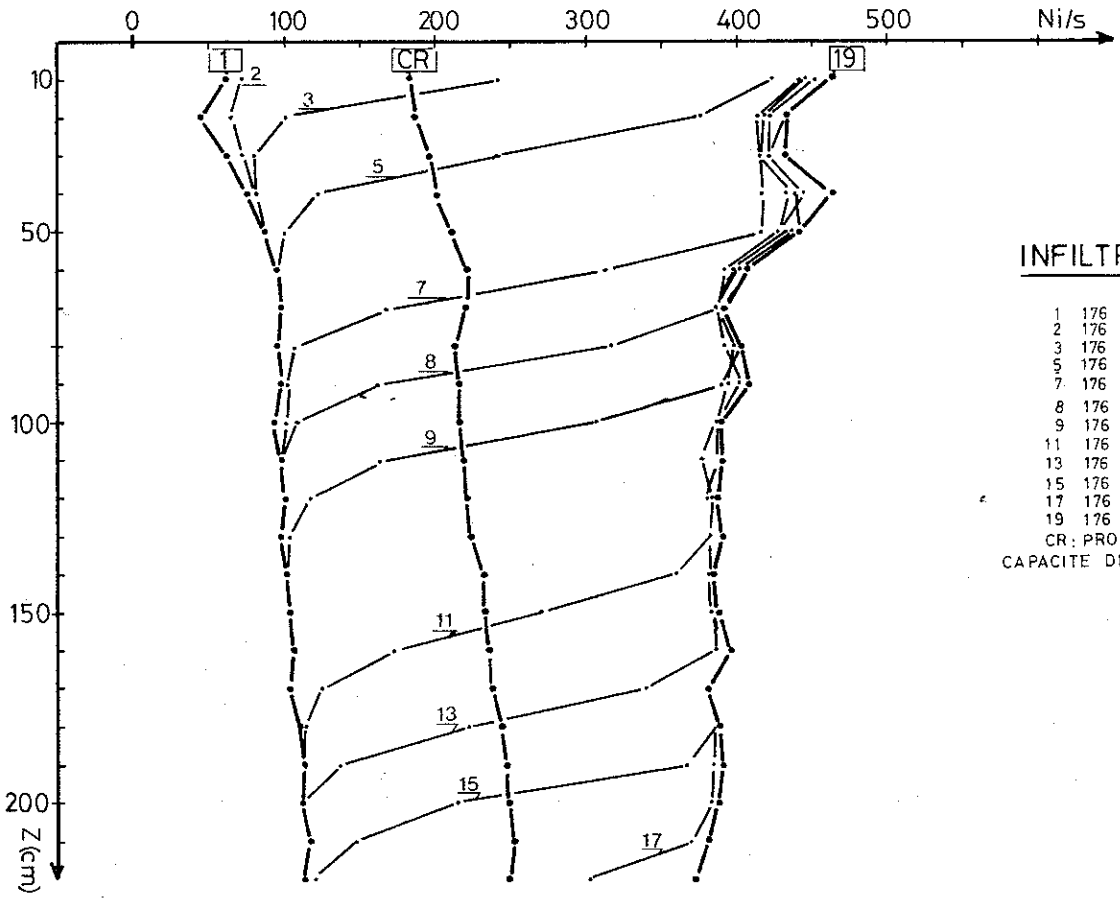
I Défriche - Evaluation par tranche de sol du potentiel de réserves exprimé en mm.

3 - Potentiel total H en fonction de la profondeur

L'évaporation en surface est assez faible et ne concerne que les 30 premiers centimètres. Au-dessous les profils sont parallèles au profil à saturation.

4 - Conductivité hydraulique en fonction de l'humidité

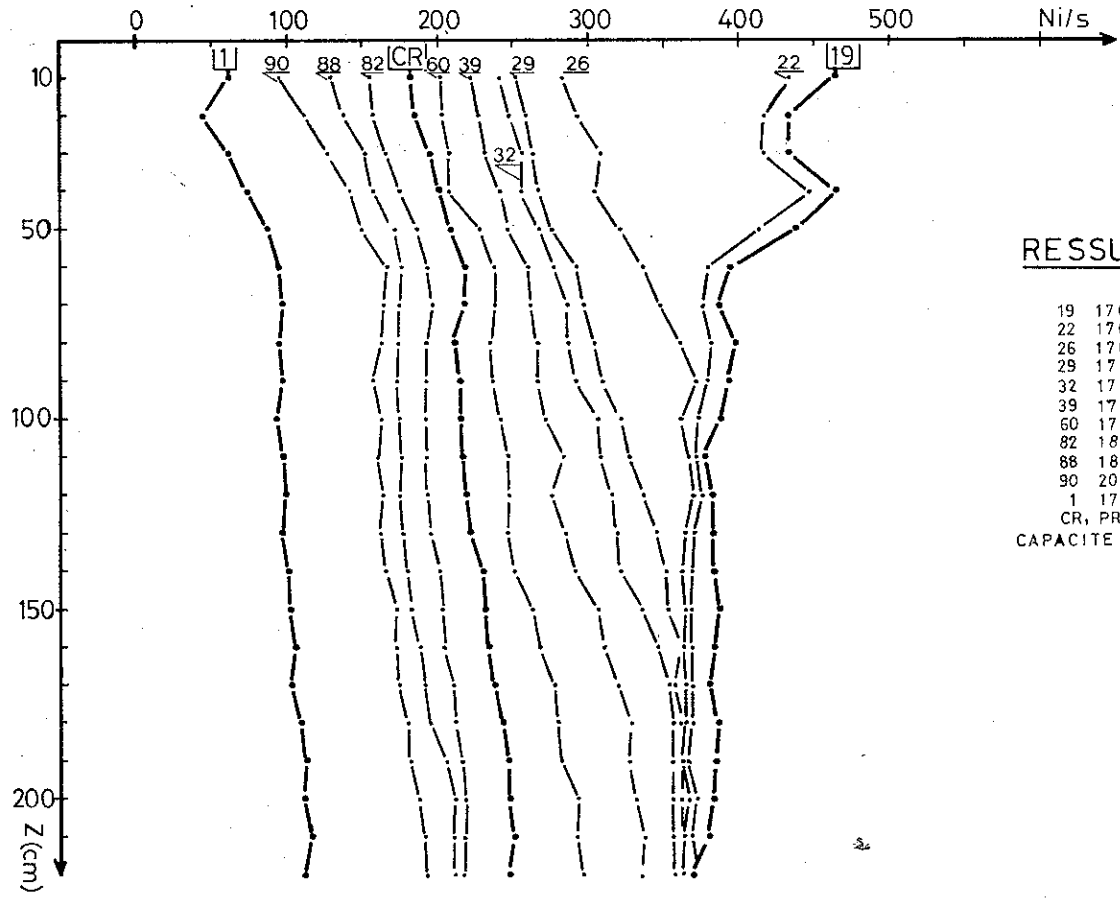
La courbe $K = f(\theta)$ incurvée pour des humidités fortes (de 20 à 30 %) présente une partie linéaire à forte pente. Pendant la phase rapide du ressuyage, la conductivité diminue rapidement avec l'humidité volumique. Egale à 7.700 mm/j quand le sol est saturé, elle varie en fonction de la profondeur de 4 à 10 mm/j à la C.R., de 0,5 à 1 mm/j quand les réserves hydriques correspondent aux 2/3 de la capacité de rétention.



INFILTRATION

1	176	11.50
2	176	11.51
3	176	11.54
5	176	12.02
7	176	12.15
8	176	12.30
9	176	12.41
11	176	13.09
13	176	13.29
15	176	13.56
17	176	14.25
19	176	14.45

CR: PROFIL A LA CAPACITE DE RETENTION



RESSUYAGE

19	176	14	45
22	176	16	14
26	176	17	02
29	176	18	06
32	176	18	54
39	176	21	02
60	177	6	38
82	181	16	37
88	188	8	33
90	203	7	52
1	176	11	50

CR, PROFIL A LA CAPACITE DE RETENTION

Fig.20_ANA.I Déf. : Evolution des profils neutroniques, relevés pendant les phases d'infiltration et de ressuyage.

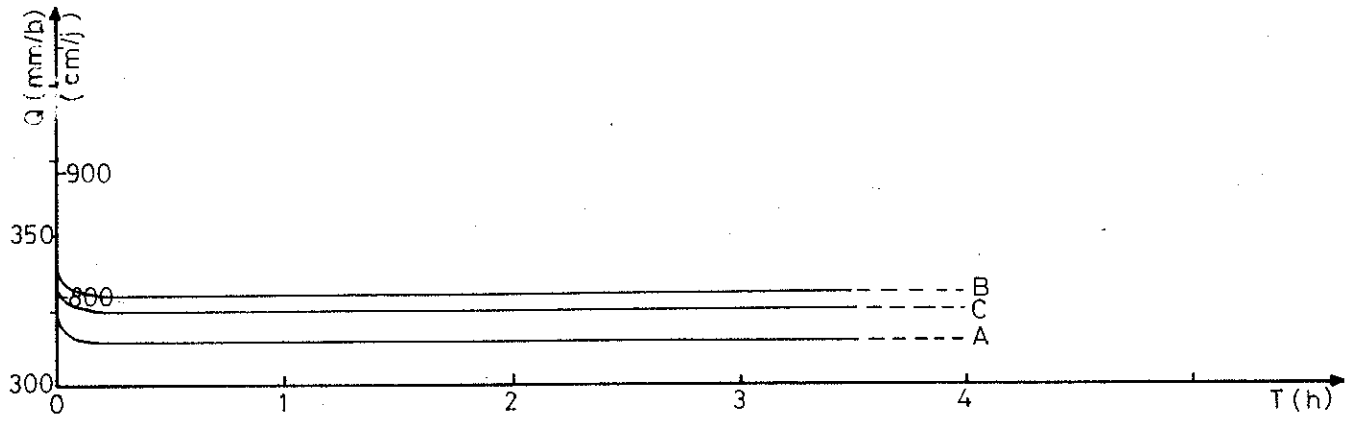


Fig.21_ANA I Déf. :Régime d'infiltration en fonction du temps Q = f(T)

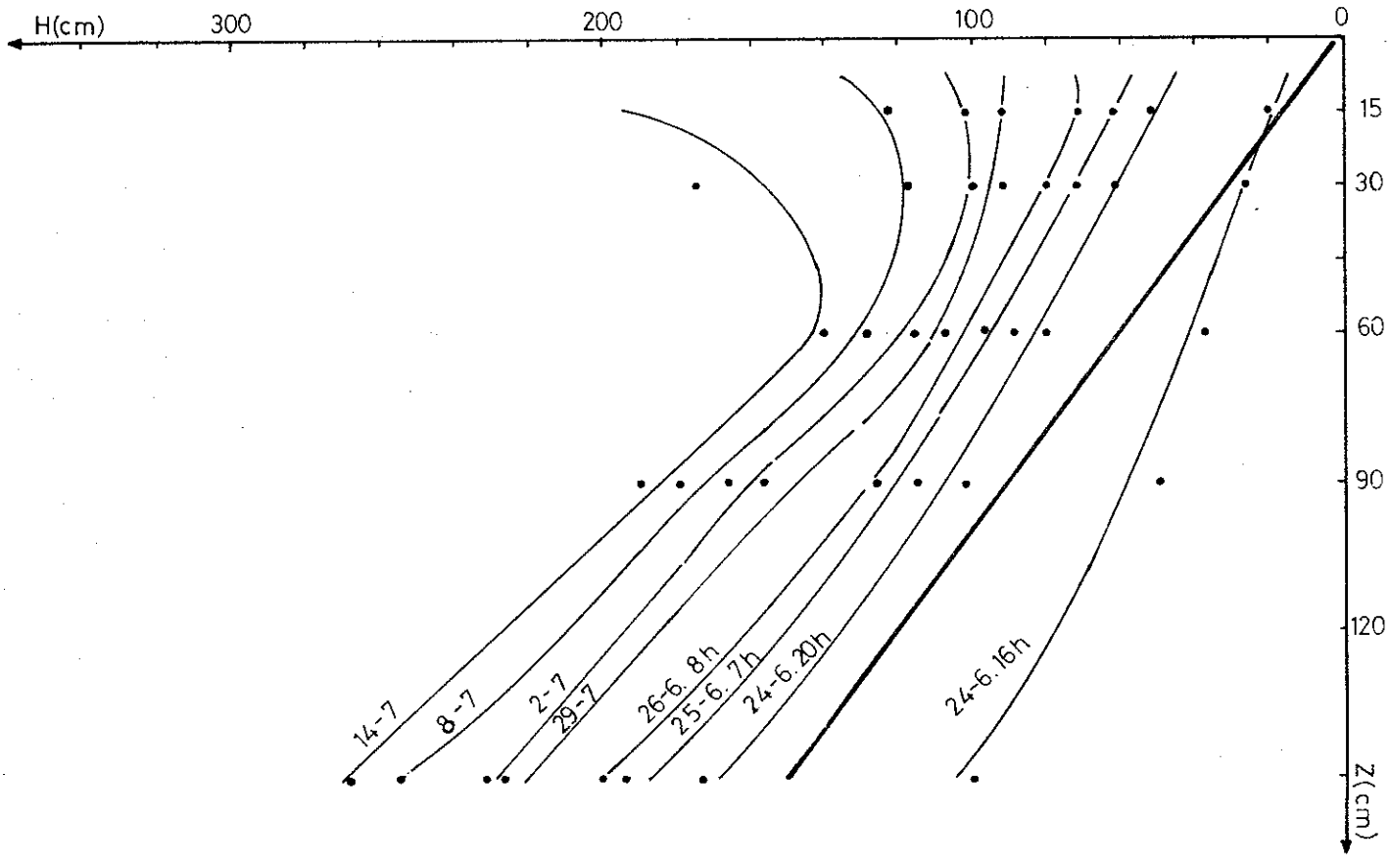


Fig.22_ ANA.I Déf. : Variations du potentiel total en fonction de la profondeur H= f(Z)

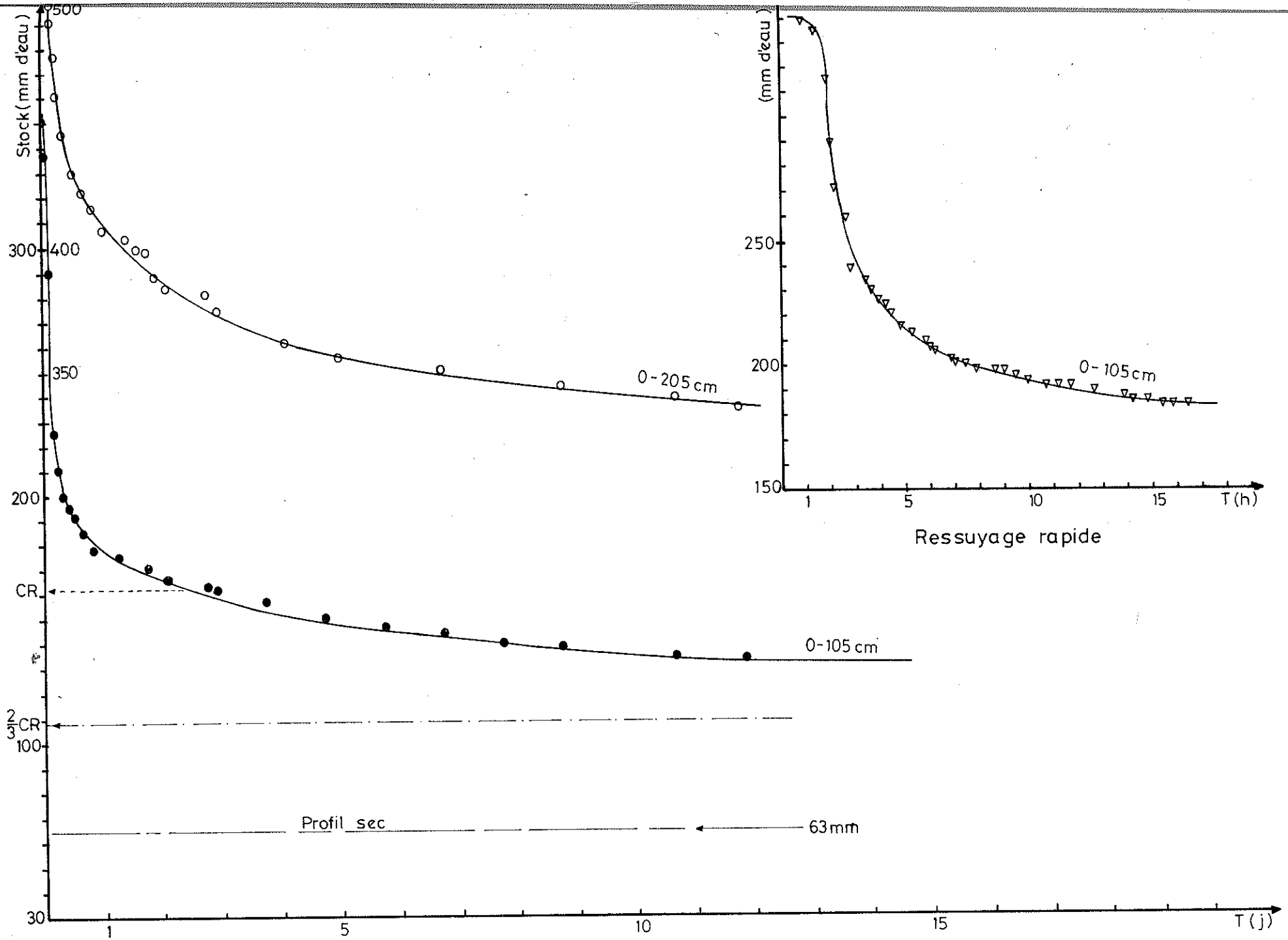


Fig.23_ ANA I Déf. : Régime de ressuyage en fonction du temps . Stock= f(T)

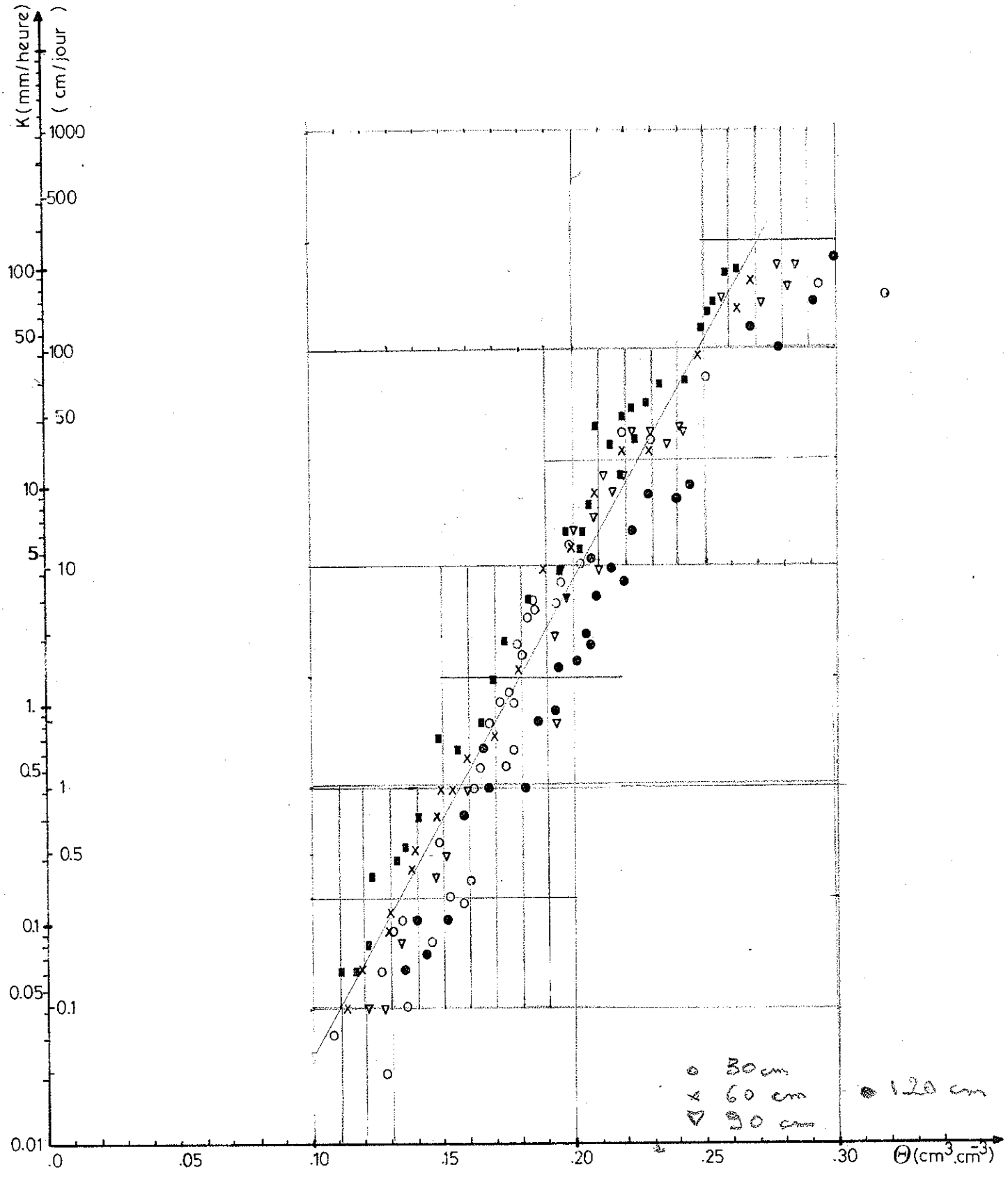


Fig.24_ANA I Déf. : Conductivité hydraulique en fonction de l'humidité. K= f(Θ)

ANALAIVA Ib 900

Alors que les 3 sols précédents, quelque peu différents par leurs propriétés physiques et hydrodynamiques, ont en commun la continuité des phénomènes étudiés sur tout le profil, il n'en est pas de même en Ib 900. En effet, après avoir traversé le premier mètre avec un régime régulier, l'eau rencontre une couche très peu perméable qui va modifier entièrement le comportement hydrique global du sol.

1 - Infiltration

Jusqu'à 1 mètre donc, la vitesse d'avancement du front d'humectation, égale à 65 cm/heure est très régulière et le régime d'infiltration est alors de 130 mm/heure ; cette valeur correspond à l'infiltrabilité permanente qu'aurait le sol si cette couche se prolongeait en profondeur.

En réalité, la charge d'eau étant maintenue constante à la surface du sol, on peut constater que, si le débit reste conséquent, les profils hydriques n'évoluent que très lentement et très peu (vitesse d'avancement du front d'humectation et variations du stock d'eau très faibles). Les tensiomètres le confirmeront, il y a formation d'une nappe perchée et les infiltrations latérales prennent le pas sur les infiltrations verticales. Par suite, on peut facilement concevoir ce qui se passe pendant la saison des pluies et en l'absence de drainage - drainage qui jouerait en milieu infini le rôle de ces infiltrations latérales -.

Les traces d'hydromorphie qui apparaissent sur le profil ont certainement leur origine dans ces nappes qui apparaissent régulièrement, plus ou moins importantes, plus ou moins temporaires suivant la distribution qualitative et quantitative des pluies. Ces sols bien drainés et à condition toutefois que la couche compacte ne soit pas trop proche de la surface peuvent être mis en culture. L'irrigation devra être pratiquée avec discernement : doses assez faibles et fréquence élevée à moduler en fonction de la topographie.

2 - Ressuyage

Dans la couche supérieure du sol à dominance sableuse, l'évolution des profils neutroniques a la même allure que celle observée dans un sol ferrugineux tropical modal. Cependant, les profils tensiométriques verticaux jusqu'au 9ë jour du ressuyage,montrent que la composante verticale du flux d'eau est quasiment nulle et que tout l'écoulement se fait latéralement. Ainsi on ne peut

appliquer les règles habituelles de calcul pour la détermination des phases rapide et lente du ressuyage et donc du profil à la capacité de rétention. Les valeurs que nous donnerons pourtant dans le tableau ci-après pour les réserves - R.F.U., R.D.U. et R.U. - ne sont qu'indicatives. Elles sont des limites calculées en faisant abstraction des restrictions que nous venons d'émettre et doivent être utilisées comme telles.

Tranche de sol	0-50	50-100	0-100
R. F. U.	36,6	40,9	77,5
R. D. U.	38,6	42,2	80,8
R. U.	75,2	83,1	158,3

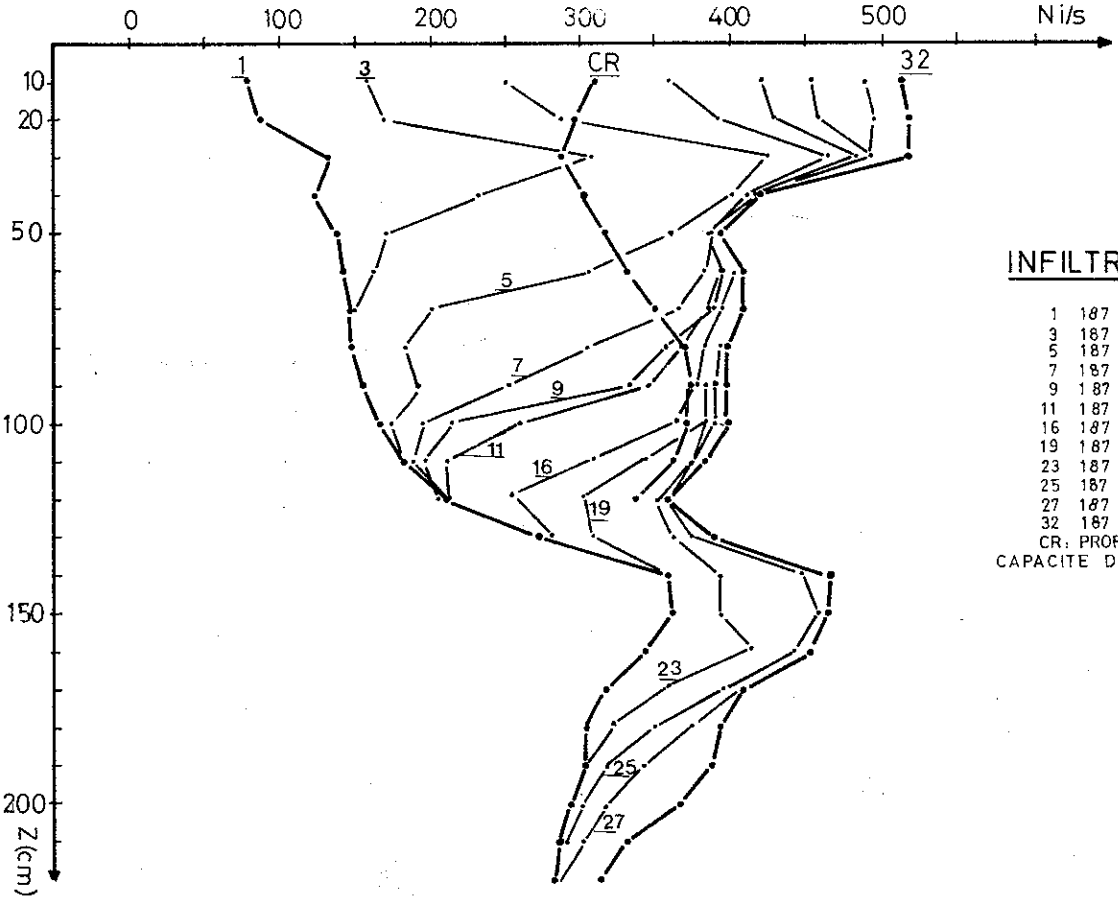
Ib 900 - Evaluation par tranche de sol du potentiel de réserves exprimé en mm.

3 - Potentiel total H en fonction de la profondeur

Quand cesse l'alimentation en eau à la surface, le profil est en charge jusque vers 1 mètre (présence d'une nappe phréatique). Au-delà, les courbes H = f(Z) sont parallèles à la courbe théorique d'un profil à saturation ($H = Z$, $\frac{dH}{dZ} = 1$) et indiquent un écoulement vertical et gravitaire de débit très faible.

La nappe disparaît sur le premier mètre après 30 heures environ. Le ressuyage dans cette couche se poursuit avec un régime de plus en plus faible et presqu'uniquement par des écoulements latéraux, la composante verticale du mouvement d'eau étant pratiquement nulle ($\frac{dH}{dZ} \simeq 0$). Les faibles valeurs de la succion à l'intercouche (niveau 90 cm) sont corroborées par une forte teneur en eau.

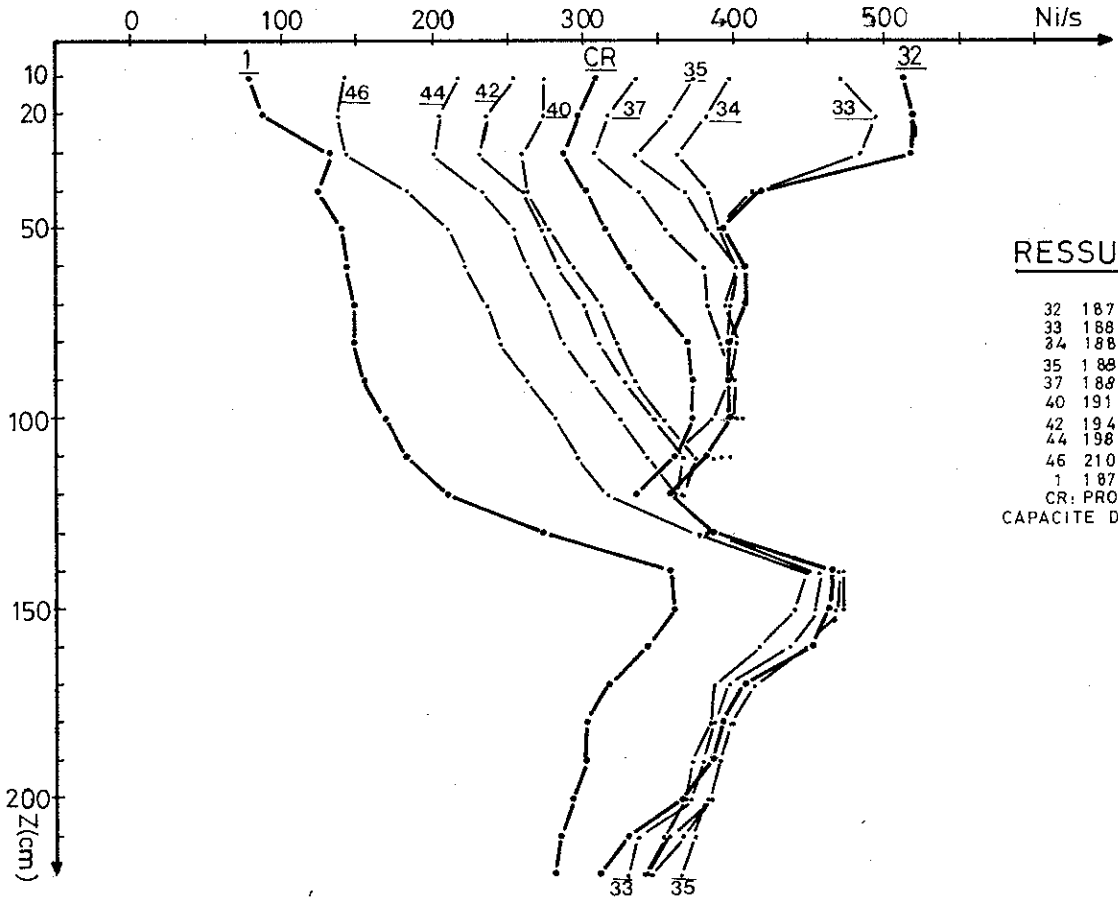
Après 6 jours de ressuyage s'installe un régime d'évaporation, d'abord très lent - les profils tensiométriques sont encore pratiquement verticaux - puis plus rapide. 9 jours plus tard, le point de flux nul se situe au-delà de 1,50 m ce qui indique que des remontées capillaires ont lieu depuis cette profondeur.



INFILTRATION

1	187	8	33
3	187	8	41
5	187	8	55
7	187	9	09
9	187	9	23
11	187	9	32
16	187	10	20
19	187	10	45
23	187	12	45
25	187	14	15
27	187	16	30
32	187	23	28

CR: PROFIL A LA CAPACITE DE RETENTION



RESSUYAGE

32	187	23	28
33	188	3	40
34	188	7	00
35	188	10	13
37	188	17	30
40	191	16	30
42	194	8	17
44	198	13	25
46	210	11	50
1	187	8	33

CR: PROFIL A LA CAPACITE DE RETENTION

Fig.25 _ ANA.Ib 900: Evolution des profils neutroniques, relevés pendant les phases d'infiltration et de ressuyage.

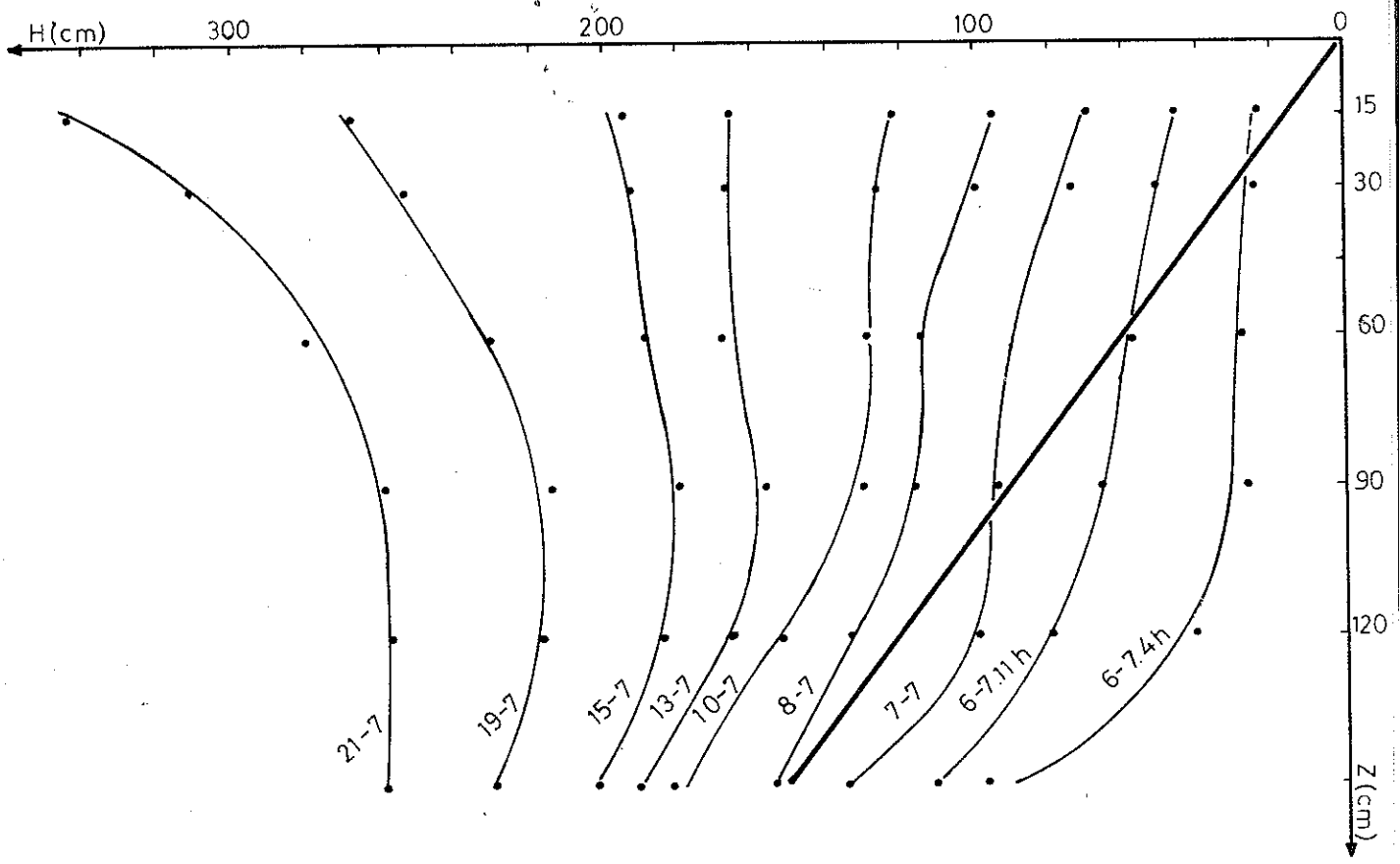


Fig.26_ANA.Ib 900 : Variations du potentiel total en fonction de la profondeur. H = f(Z) .

COURBES CARACTERISTIQUES DES SOLS h = f(θ)

Pendant le ressuyage, les variations de la succion h avec l'humidité θ sont identiques en If 1485 et If 1700, profils dont nous avons déjà pu noter la grande ressemblance. En I Défriche et Ib 900 plus riches en éléments fins, à une même valeur de l'humidité correspondent des valeurs beaucoup plus élevées pour la succion. Dans ces derniers sols l'eau sera plus fortement retenue, assujettie à des mouvements plus lents et l'humidité au point de flétrissement sera plus élevée.

Pour terminer, nous dirons que tout au long de cette étude les données tensiométriques ont parfaitement confirmé celles obtenues avec l'humidimètre à neutrons. Dans les sols à dominance sableuse, au profil homogène, les tensiomètres moins coûteux, plus maniables sont susceptibles, après étalonnage, d'être utilisés sur la base des relations succion-humidité comme système d'alerte à l'irrigation.

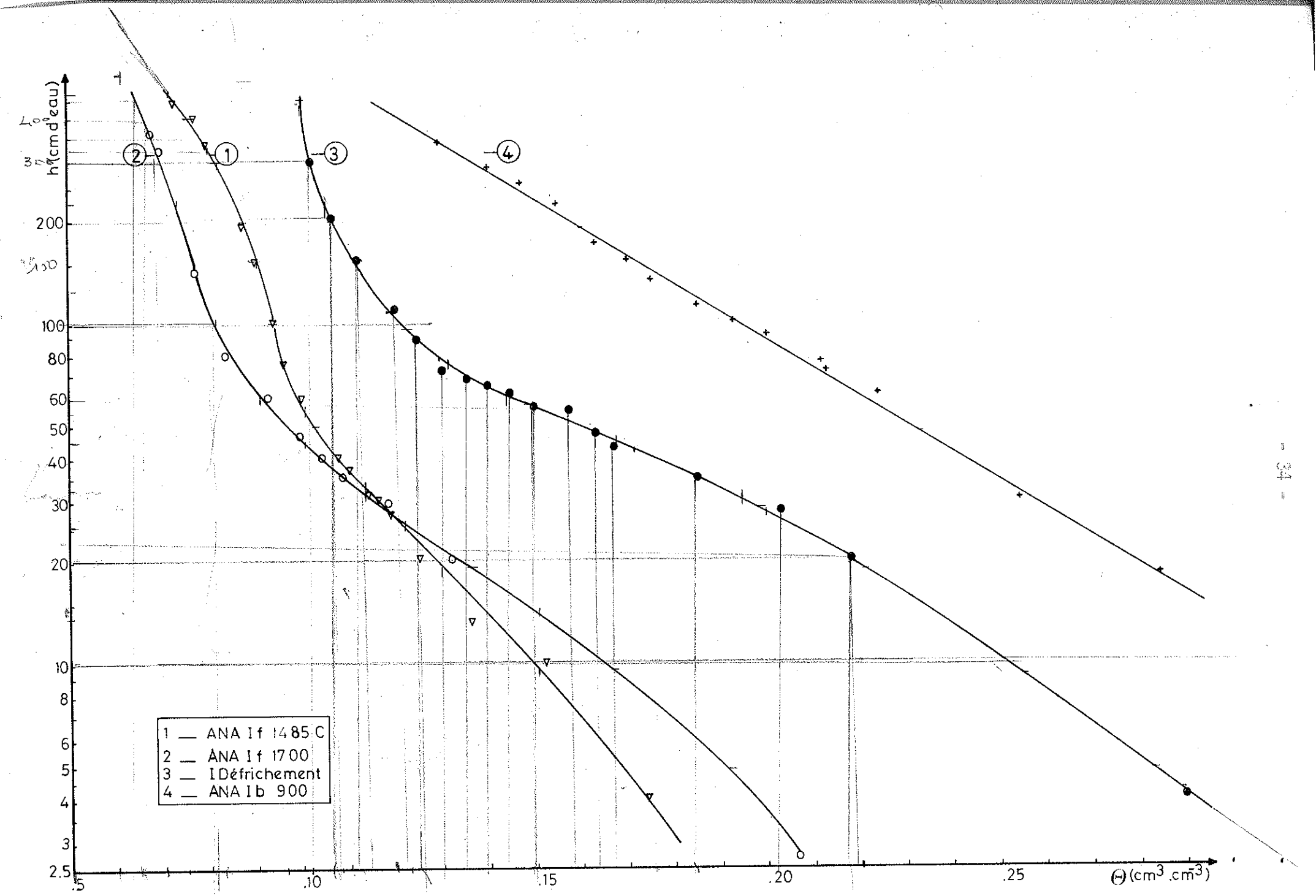


Fig. 27 _ Courbes caractèristiques comparées. $h = f(\Theta)$

CONCLUSION

En fonction de l'ensemble des résultats obtenus on peut classer les sols du périmètre sucrier d'ANALAIVA en deux grandes catégories :

A - Les sols ferrugineux tropicaux peu lessivés modaux ;

B - Les sols caractérisés par la présence d'une couche compacte, très peu perméable, comprise entre deux couches à dominance sableuse.

A) - Les sols de la première catégorie à laquelle appartiennent If 1485, If 1700, I Défriche sont plus communément appelés sables roux. Si les profils granulométriques varient assez sensiblement d'un site de mesure à l'autre, ils sont particulièrement constants en un point, avec la profondeur. Cette stabilité texturale - à peine si l'on note une légère augmentation du taux d'argile au-delà de 1,50 m - se reflètera dans la régularité des propriétés hydrodynamiques, que ce soit pendant l'infiltration ou le ressuyage.

Les vitesses d'avancement du front d'humectation sont respectivement de 150, 100 et 70 cm/h pour If 1485, If 1700, I Défriche. Les infiltrabilités permanentes varient dans le même sens, mais la moyenne calculée sur 8 points, égale à 352 mm/h, est bien représentative de l'ensemble (coefficient de variation 8,8 %). Par ailleurs, le régime d'infiltration adopte immédiatement cette valeur limite, ce qui, en d'autres termes, signifie que l'infiltrabilité est ici indépendante de l'humidité. Cette propriété est sans doute en relation avec la texture assez grossière du sol qui a pour corollaire une macroporosité très importante (supérieure à 60 % de la porosité totale elle-même voisine de 40 %).

Parallèlement, la phase rapide du ressuyage est dominante. Les profils à la capacité de rétention sont atteints après trente heures en If 1485 et If 1700, en 68 heures sur I Défriche un peu plus riche en éléments fins. Dans le même ordre, les réserves facilement utilisables (R.F.U.) sont alors, évaluées jusqu'à un mètre, de 38, 39 et 54 mm. Elles sont assez faibles et on préconisera, pour une irrigation par aspersion, une fréquence hebdomadaire ou au plus décadaire avec des doses comprises entre 40 et 50 mm.

B) - Contrairement aux précédents, les sols analogues à Ib 900 ont des propriétés essentiellement discontinues. La présence à une profondeur et sur une épaisseur variables d'un horizon gris, de texture moyenne, extrêmement compact et dur, très peu perméable, va imposer au sol des propriétés hydrodynamiques qui seront en définitive fonction :

- de l'épaisseur de la couche limono-sableuse à limono-argilo-sableuse de surface,
- des quantités d'eau mises en jeu,
- des aménagements hydro-agricoles.

En effet, les mouvements de l'eau qui ont en surface la même allure que dans les sols A - ils sont seulement plus lents avec une vitesse d'avancement du front égale à 70 cm/h et un régime d'infiltration de 130 mm/h - sont brutalement stoppés au niveau de l'horizon sous-jacent. Si l'eau continue alors à arriver depuis la surface, il y a accumulation et formation d'une nappe perchée cause d'une hydromorphie temporaire.

En l'absence de drainage, l'ennoyage pendant la saison des pluies sera fonction de la distribution des précipitations. Une pluie cyclonique en particulier sera susceptible de provoquer des inondations prolongées catastrophiques pour toute espèce de culture. Par contre si le sol est drainé et si l'épaisseur de la couche meuble superficielle est suffisante, on peut envisager, avec une irrigation judicieusement conduite, des cultures perennes, celle de la canne à sucre par exemple.

ANNEXES

Tableau 1 - If 1485 - Profils granulométriques en A, B, C.

REFERENCES	ARGILES	LIMONS	L.G	S.F	S.G	M.O
A	10,7	1,6	4,6	15,6	67,2	0,77
0- 20 B	9,6	4,0	5,2	15,2	67,4	0,57
C	7,5	4,3	5,4	14,7	66,4	0,50
A	7,9	2,6	5,1	16,2	66,2	0,48
20- 40 B	8,5	3,1	5,9	15,6	66,0	0,36
C	7,7	5,6	4,3	13,3	70,9	0,35
A	10,9	2,3	4,4	14,3	67,7	0,22
40- 60 B	8,0	6,0	4,5	14,9	65,8	0,23
C	9,5	5,0	5,4	15,0	64,2	0,24
A	8,8	4,6	4,4	13,2	68,4	0,16
60- 80 B	9,2	4,3	4,3	11,9	70,1	0,19
C	9,8	5,3	4,4	12,2	68,2	0,18
A	8,2	4,2	3,8	12,7	71,1	0,14
80-100 B	10,4	2,8	4,4	11,8	70,0	0,18
C	9,0	2,8	3,9	11,0	71,9	0,11
A	9,1	2,8	3,7	13,1	70,4	
100-120 B	8,4	2,7	4,3	11,7	69,9	
C	8,3	6,9	4,1	11,5	70,5	
A	10,2	1,6	3,5	13,1	71,1	
120-140 B	7,2	4,0	3,7	10,8	73,0	
C	9,3	6,2	3,6	12,4	70,8	
A	9,3	5,3	3,8	11,5	71,8	
140-160 B	8,5	4,9	3,4	10,3	74,8	
C	8,4	5,4	3,7	11,3	71,4	
A	8,0	2,1	3,7	12,5	71,1	
160-180 B	8,7	6,8	4,8	13,3	67,6	
C	-	-	-	-	-	
A	11,8	3,8	4,9	18,5	62,5	
180-200 B	9,6	5,9	5,0	13,6	68,1	
C	-	-	-	-	-	
A	10,6	2,9	4,8	18,6	62,0	
200-220 B	10,8	2,9	5,2	14,2	66,5	
C	-	-	-	-	-	

Tableau 2 - If 1700 - Profils granulométriques en A, B, C.

REFERENCES	ARGILES	LIMONS	L.G	S.F	S.G	M.O
A	8,4	7,2	6,7	19,1	58,6	0,74
0- 20 B	8,0	6,5	6,2	14,2	65,9	0,56
C	7,9	10,7	6,2	14,5	65,3	0,76
A	9,4	5,0	6,3	18,3	60,4	0,49
20- 40 B	11,9	4,2	6,4	15,1	64,7	0,34
C	8,8	5,0	5,7	14,7	66,0	0,62
A	10,9	2,8	5,2	15,0	65,6	0,35
40- 60 B	7,6	1,9	3,7	9,4	74,9	0,24
C	9,5	5,1	5,2	14,6	65,1	0,44
A	9,6	1,9	5,6	15,8	63,1	0,25
60- 80 B	8,3	4,3	4,1	10,3	72,9	0,10
C	9,2	2,7	4,1	10,9	71,5	0,29
A	9,1	7,8	6,0	16,8	61,8	0,11
80-100 B	8,8	7,0	3,9	12,0	70,5	0,11
C	8,0	6,0	4,8	12,8	68,5	0,16
A	10,3	6,0	5,2	15,9	64,6	
100-120 B	10,1	3,4	5,2	12,5	67,7	
C	8,5	4,7	4,4	12,3	70,1	
A	9,0	6,6	5,0	15,8	63,8	
120-140 B	8,8	3,7	4,4	11,1	72,0	
C	9,1	4,5	4,8	12,1	69,5	
A	11,2	6,1	5,8	17,7	60,1	
140-160 B	10,4	1,7	4,8	12,7	69,2	
C	8,3	2,7	4,0	11,2	73,1	
A	12,2	3,4	5,9	18,9	58,4	
160-180 B	11,1	1,2	4,5	12,3	70,4	
C	10,4	1,8	4,2	14,0	69,2	
A	13,4	2,3	5,8	16,5	61,1	
180-200 B	9,5	2,4	4,3	11,2	72,6	
C	9,6	6,7	6,2	16,5	62,2	
A	11,2	2,5	5,8	14,8	65,0	
200-220 B	8,3	3,6	5,4	13,2	67,5	
C	-	-	-	-	-	

Tableau 3 - I Défriche - Profils granulométriques en A, B, C.

REFERENCES	ARGILES	LIMONS	L.G	S.F	S.G	M.O
A	11,0	2,4	9,8	35,9	42,0	0,46
0- 20 B	10,9	3,5	8,8	32,8	43,3	1,06
C	10,7	6,2	12,4	35,6	35,3	1,56
A	9,4	4,8	10,7	35,6	39,4	0,26
20- 40 B	10,0	7,2	8,0	29,3	49,1	0,34
C	12,4	4,4	12,1	35,1	36,5	0,78
A	13,5	1,3	9,3	30,0	45,4	0,27
40- 60 B	9,7	4,4	7,8	24,9	52,6	0,14
C	12,0	6,6	11,9	31,8	38,3	0,32
A	11,2	6,8	8,8	28,7	45,8	0,16
60- 80 B	11,5	5,2	8,1	24,6	52,5	0,13
C	14,2	7,1	12,3	29,7	38,8	0,24
A	11,4	5,1	8,4	27,8	48,0	0,16
80-100 B	10,8	6,3	8,4	23,9	52,5	0,08
C	13,7	4,8	12,0	29,8	40,0	0,19
A	12,1	4,5	9,4	30,3	43,8	
100-120 B	11,6	5,6	7,9	22,8	54,0	
C	13,7	6,5	11,0	27,9	43,0	
A	12,0	6,4	8,2	30,3	45,2	
120-140 B	13,7	2,3	9,3	26,5	48,5	
C	12,8	7,7	10,8	31,2	39,5	
A	10,2	8,2	9,6	30,6	42,7	
140-160 B	14,9	2,0	9,5	26,7	48,4	
C	14,3	7,2	11,9	29,6	39,2	
A	12,4	6,8	7,7	32,5	41,5	
160-180 B	-	-	-	-	-	
C	-	-	-	-	-	
A	15,5	4,7	9,0	30,8	42,8	
180-200 B	-	-	-	-	-	
C	-	-	-	-	-	
A	16,0	4,8	11,0	33,2	36,9	
200-220 B	-	-	-	-	-	
C	-	-	-	-	-	

Tableau 4 - Ib 900 - Profils granulométriques en A, B, C.

REFERENCES	ARGILES	LIMONS	L.G	S.F	S.G	M.O
A	14,4	9,1	13,5	40,5	22,5	1,27
0- 20 B	16,8	3,4	13,4	41,8	23,1	0,92
C	18,6	7,4	11,4	35,1	27,1	2,36
A	19,4	7,6	11,7	37,6	24,7	0,58
20- 40 B	18,1	6,9	12,6	39,1	24,1	0,42
C	21,7	4,6	11,1	35,6	27,8	1,61
A	21,4	4,3	11,6	36,5	25,4	0,29
40- 60 B	20,7	6,6	13,4	37,0	22,6	0,29
C	22,1	5,5	11,3	34,1	27,4	0,96
A	23,6	3,6	12,2	40,9	19,8	0,25
60- 80 B	20,6	6,0	12,0	39,1	23,6	0,29
C	24,5	2,7	11,0	35,3	25,9	0,34
A	19,5	6,6	12,6	38,0	22,2	0,33
80-100 B	20,5	7,6	11,1	39,3	22,1	0,24
C	21,5	7,0	11,0	36,0	25,2	0,56
A	9,8	10,9	11,7	38,4	32,1	
100-120 B	19,8	9,4	13,2	41,1	19,0	
C	22,5	7,3	11,1	36,3	22,6	
A	17,4	14,9	7,8	20,3	38,6	
120-140 B	7,2	10,9	10,0	34,4	39,8	
C	18,9	11,6	15,1	19,2	35,6	
A	24,5	25,9	11,6	18,7	20,7	
140-160 B	19,9	9,5	9,4	27,5	34,5	
C	-	-	-	-	-	
A	27,5	14,7	8,5	18,2	30,3	
160-180 B	23,8	14,4	10,0	23,5	30,6	
C	-	-	-	-	-	
A	24,8	24,2	10,4	21,1	19,9	
180-200 B	23,1	14,7	10,1	21,4	32,1	
C	-	-	-	-	-	
A	-	-	-	-	-	
200-220 B	24,4	13,3	9,7	18,9	34,7	
C	-	-	-	-	-	

UNIVERSITÉ DE MADAGASCAR

LABORATOIRE DE RADIO ISOTOPES

SERVICE DE RADIOAGRONOMIE

★

P R O J E T S U C R I E R

A N A L A I V A

Convention LRI - CENRADERU 1976-6 Hp

TANANARIVE — Boite Postale 3383