

Détermination de certaines caractéristiques intrinsèques et hydrodynamiques des sols par utilisation de méthodes neutroniques en république malgache

P. POURRUT

Ingénieur hydrologue. Centre O.R.S.T.O.M. de Tananarive.

C. ZEBROWSKI

Chargé de recherches pédologue. Centre O.R.S.T.O.M. de Tananarive.

Après la publication des articles de P. DUBREUIL, « Point de vue théorique sur le rôle du sol dans le cycle hydrologique » [1] et « Détermination des paramètres du sol influant sur le cycle hydrologique dans les bassins représentatifs et expérimentaux » [2], la liste de ces paramètres et la méthodologie permettant de les mesurer semblent presque définitivement établies. Cette note, n'a pas pour but de revenir sur les nombreux points déjà éclaircis. Son objet sera simplement de faire connaître aux hydrologues et aux pédologues *un procédé original de mesure « in situ »* de certaines caractéristiques des sols qui conditionnent l'infiltration ou le stockage dans la zone d'aération et sont très importantes pour l'établissement des bilans hydrologiques sur bassin versant. Elles seront déterminées à partir de *l'étude des cinétiques de l'infiltration et du ressuyage* en des points représentatifs de l'ensemble de la zone étudiée.

L'appareil permettant de faire ces manipulations au champ est l'*humidimètre à neutrons*. Cette note s'adresse donc en priorité aux utilisateurs actuels, malheureusement assez rares, mais que nous pensons devoir être plus nombreux dans les années à venir étant donné le côté pratique, rapide et reproductible des mesures.

A la base de notre travail, il est indispensable de citer l'étude de J. MARCESSE, « Détermination « in situ » des capacités de rétention d'un sol au moyen de l'humidimètre à neutrons » [3]. L'humidimètre à neutrons a été gracieusement mis à notre disposition par le laboratoire des Radio-isotopes de Tananarive, auquel nous adressons tous nos remerciements, en particulier à son Directeur C. DELORME et à P. MOUTONNET, Ingénieur au Département de Radio-agronomie du C.E.A.

1. Définition de l'étude

Nous avons procédé:

a) A l'établissement d'une carte pédologique du bassin versant de la Tafaïna et à des mesures au champ en des points assez représentatifs déterminés par le pédologue.

Les mesures au champ avaient pour objets les analyses:

- De la cinétique de l'infiltration sous charge constante artificielle, afin d'étudier la progression du front humide, les vitesses d'infiltration, les volumes d'eau infiltrée pour les différents horizons, ainsi que certaines valeurs de la porosité;
- De la cinétique du ressuyage pour l'étude des pertes à partir d'un profil saturé ainsi que pour la détermination de l'humidité correspondant à la capacité de rétention.

b) A des vérifications de laboratoire s'appuyant sur les procédés classiques employés en pédologie, ces mesures devant infirmer ou confirmer la validité des résultats obtenus grâce à l'humidimètre à neutrons;

c) A une application sur un sol posant des problèmes particuliers, andosol des formations volcaniques de l'Ankaratra pour lequel les mesures de laboratoire ne donnent pas satisfaction.

2. Mesures effectuées sur le bassin versant de la tafaïna

2.1. Carte pédologique et choix des emplacements de mesure

2.1.1. FACTEURS PRINCIPAUX DE LA PÉDOGENÈSE

Le bassin versant de la Tafaïna, situé dans la région centrale de Madagascar, est soumis à un climat mésothermique (*), c'est-à-dire à un *climat ferrallitisant* (tropical austral d'altitude pour les hydrologues).

La végétation est une pseudo-steppe à *Aristida* (graminées), dont l'influence principale consiste en une faible protection du sol contre l'érosion.

Les manifestations de l'érosion et du remaniement sont très répandues sur l'ensemble du bassin versant. Les sols tronqués sont fréquents sur les « reliefs résiduels » (**), donc à pentes fortes. Les sols remaniés présentent une « stone-line » à faible profondeur dans le cas des sols des croupes d'interfluves, à plus grande profondeur dans le cas des sols des zones à versants équilibrés (niveaux rajeunis (**)).

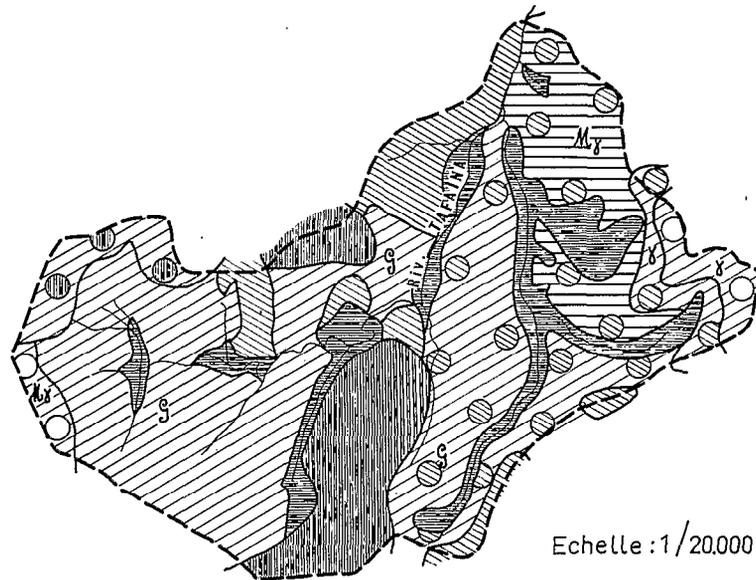
(*) Classification Thornthwaite d'après J. RIQUIER.

(**) Termes définis par F. BOURGEAT (Maître de recherches à l'O.R.S.T.O.M. Chargé de cours à l'E.N.S.A., Madagascar), dans une thèse à paraître.

La roche-mère est constituée pour la plus grande partie du bassin versant de gneiss et de migmatites. Sur ces roches les sols sont profonds. Un banc de quartzites traverse la zone étudiée du Nord au Sud. Difficilement altérables, ces quartzites donnent des sols peu évolués. A l'extrême Est un relief résiduel constitué de granit faisant suite au « casque de Behenjy » présente des sols rajeunis par l'érosion. Quelques migmatites granitoïdes donnent le même genre de relief et de sols à l'ouest du bassin versant.

L'*hydromorphie* devient le principal facteur d'évolution des sols de rizières, que celles-ci soient entaillées dans la colline, en tête de thalweg, ou qu'elles soient situées sur alluvions dans les fonds de thalweg. Ses manifestations les plus extrêmes s'extériorisent par des sols à pseudo-gley.

2.1.2. LES SOLS ET LES UNITÉS PÉDOLOGIQUES



CLASSE	SOUS-CLASSE	GROUPE	SOUS-GROUPE	ROCHE - MÈRE
Sols minéraux bruts	origine non climatique	d'érosion	lithosols	γ = granite g = gneiss
Sols peu évolués	— " —	— " —	regosolique	
Sols ferrallitiques	Fortement désaturé	remanié	modal	Mγ = migmatite granitoïde
— " —	— " —	— " —	pénévolué	
— " —	— " —	pénévolué	avec érosion	○ Complexe
Sols hydromorphes	peu humifères	à pseudogley	tacheté	

Fig. 1. — Carte pédologique du bassin versant de la TAFAINA.

La figure 1 représente la carte pédologique du bassin versant. Cette carte a été établie avec l'aide de F. BOURGEAT.

a) Les sols minéraux bruts.

Ils appartiennent tous au sous-groupe des lithosols. La roche-mère est mise à nu par l'érosion.

On trouve ces sols en complexe avec des sols pénévoulés sur les reliefs résiduels granitiques et de migmatites granitoïdes.

b) Les sols peu évolués.

Ce sont des sols regosoliques formés sur quartzites. Celles-ci, très résistantes à l'altération, se fissurent. Quelques poches altérées peuvent se manifester par endroits.

Le profil est du type A-C. L'horizon A, humifère, épais de quelques centimètres, est bien structuré, poreux. La proportion de morceaux de quartzites est toujours élevée. L'horizon C est constitué par des quartzites fissurées.

c) Les sols ferrallitiques.

Ils appartiennent tous à la sous-classe des sols fortement désaturés. Deux groupes ont été distingués: les sols remaniés et les sols pénévoulés.

α) Les sols remaniés possèdent une « stone-line ». Les minéraux primaires apparaissent dans le profil à une trentaine de centimètres ou juste en-dessous de cette stone-line; l'épaisseur du recouvrement au-dessus de celle-ci permet de classer les sols dans le sous-groupe des sols remaniés modaux ou dans celui des sols remaniés pénévoulés.

1. Les sols remaniés modaux: les minéraux primaires apparaissent à plus de 60 cm de profondeur, c'est-à-dire que le recouvrement au-dessus de la stone-line présente une épaisseur généralement supérieure à 50 ou 60 cm.

Un exemple de profil type de ce sol est fourni par le sol I situé près de la station météorologique du bassin versant. Celle-ci est installée au niveau de raccordement du versant et d'alluvions anciennes. La stone-line se trouve entre 80 et 120 cm, elle est constituée de blocs de quartz anguleux et de quartz roulés. La morphologie du profil est:

0-10 cm : Horizon brun rouge humifère

Limono-argilo-sableux

Structure grumeleuse moyenne peu friable

Très poreux

Bon enracinement

10-60 cm : Horizon rouge

Limono-argilo-sableux devenant limono-sableux en profondeur

Structure continue. Le sol est assez compact en place

Porosité tubulaire assez forte.

Enracinement faible

Passage irrégulier avec l'horizon inférieur

60-90 cm : Horizon brun jaune

Limono-sableux

Structure continue secondairement particulière, peu compacte en place

Porosité tubulaire

90-120 cm : Stone-line constituée d'un lit irrégulier de blocs de quartz anguleux ou arrondis

120-200 cm : Horizon rouge
Sablo-limoneux, très riche en morceaux de quartz
Structure continue peu friable
Porosité tubulaire très forte
Pas de racines

Le sol II situé à une cinquantaine de mètres au nord du profil I, présente une stone-line beaucoup plus dense; une discontinuité dans les caractéristiques hydriques (évaporation-infiltration) doit se manifester à son niveau.

Les sols remaniés modaux sont situés sur les versants équilibrés (nord-ouest du bassin versant) et dans les zones à relief de croupes d'interfluve au nord-est et à l'est du bassin versant, en association avec des sols remaniés pénévolués et des sols pénévolués d'érosion.

2. Les sols remaniés pénévolués: le recouvrement au-dessus de la stone-line est peu épais (souvent inférieur à 30 cm). Compte tenu de ce fait, le profil est semblable à celui des sols remaniés modaux.

Ces sols sont situés en complexe avec les précédents dans la zone d'interfluve de l'est du bassin versant.

β) Les sols pénévolués ne possèdent pas de stone-line. Ce sont des sols qui ont été profondément rajeunis par l'érosion. Sur granite, la troncature du profil a atteint l'horizon C, la zone de départ affleure ainsi en surface. Sur migmatites et gneiss, l'horizon C n'est pas toujours atteint, le profil peut être comparé à celui d'un sol remanié tronqué légèrement en dessous de la stone-line.

Ces sols sont situés sur les reliefs de rajeunissement du sud-ouest du bassin versant et en complexe avec des sols remaniés typiques du sud-est. Dans ce second cas, la troncature s'est faite juste au niveau de la stone-line qui apparaît de temps en temps en surface du sol (sur les replats les sols remaniés typiques dominant).

d) Les sols hydromorphes.

Ils forment la totalité des rizières ou des bas-fonds non cultivés, et sont à rattacher aux sols peu humifères, à pseudogley, tachetés.

De la tête à l'aval du thalweg, l'évolution des propriétés des sols se fait de la façon suivante:

1. Augmentation du pourcentage des éléments fins: la texture passe de sableuse (les sols de rizière en tête de thalweg sont pour la plupart, taillés dans la zone de départ de sols ferrallitiques), à limono-argileuse;

2. Augmentation du pourcentage de taches dues à l'hydromorphie.

2.1.3. CHOIX DES EMPLACEMENTS DE MESURE

Les sols les plus caractéristiques sont les sols ferrallitiques très désaturés. Les propriétés physiques et chimiques des zones de départ, qui sont toutes situées à moins d'un mètre en dessous de la stone-line, sont peu différentes.

Les mesures peuvent être effectuées sans inconvénient sur un sol ferrallitique remanié modal (tels les sols I et II), l'horizon situé au-dessus de la stone-line possède

des caractéristiques qui lui sont propres alors que l'horizon situé en dessous possède les propriétés générales à tous les sols du bassin versant.

2.2. Conditions préalables et installations utilisées (fig. 2)

Les mesures demandent à être faites pendant la période de sécheresse pour que tous les points du profil initial soient proches du point de flétrissement et pour que les mesures de ressuyage ne soient pas perturbées par un apport pluviométrique supplémentaire. Dans le cas du bassin versant de la Tafaina, les travaux ont été effectués du 1^{er} au 8 octobre 1968, 21 jours après une pluie de 3,4 mm et alors que le total pluviométrique des deux mois précédents était de 9,9 mm.

Le matériel utilisé est simple: un humidimètre de profondeur, un tube de mesure et une couronne de 0,8 à 1 m de diamètre.

- L'humidimètre de profondeur peut être soit un HP 110 équipé d'un EP 110, soit un HP 310 équipé d'un EP 310 ou d'une EC 310, ce dernier dispositif avec échelle de comptage étant toutefois préférable.
- Le tube de mesure est un tube de duralumin de 40 mm de diamètre intérieur, de 2 mm d'épaisseur et de profondeur variable, suivant les horizons à étudier, mais généralement de 1,5 m à 2 m. Ce tube demande à être mis en place assez longtemps à l'avance, au minimum un mois, de façon à éliminer toute infiltration préférentielle le long du tubage, le tassement du sol étant accéléré par des arrosages fréquents après l'installation.
- La couronne peut être en tôle ou en toute autre matière imperméable. Celles que nous avons employées étaient en polyéthylène. Elles avaient un diamètre de 0,8 m et une hauteur totale de 0,6 m, dont 0,4 m étaient enfoncé dans le sol pour limiter au maximum les fuites latérales.

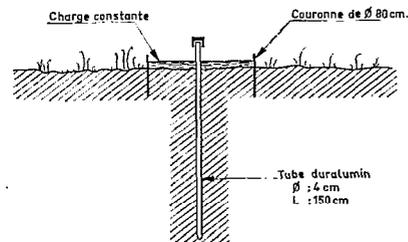


Fig. 2. — Dispositif utilisé pour les mesures de cinétique de l'infiltration et du ressuyage.

2.3. Cinétique de l'infiltration sous charge constante

L'opération consiste à suivre l'évolution d'un profil sec après mise en eau et maintien d'une charge constante au-dessus des points de mesure. Cette charge, que nous avons choisie égale à 5 cm, est conservée dans la couronne pendant toute la durée des mesures soit par un dispositif mécanique, soit par un opérateur consciencieux qui ajoute de l'eau au fur et à mesure des besoins. On opère par profils successifs jusqu'à obtention d'un profil stable sur toute la tranche de sol à étudier.

Cette opération, facilement reproductible dans des conditions standard, donc comparables, pourrait éventuellement dans l'avenir, compléter la méthode Porchet. En effet, bien qu'elle ait un intérêt agronomique indiscutable, celle-ci ne paraît pas avoir de signification hydrologique certaine, d'une part parce qu'elle donne une

perméabilité horizontale et non verticale et d'autre part, parce qu'elle néglige l'horizon de surface qui peut jouer un rôle déterminant dans l'apparition et l'importance du ruissellement. Nous pensons qu'elle reste valable en tant que méthode de prospection et pour l'établissement de la cartographie pédologique mais que, une fois cette dernière établie et les emplacements représentatifs déterminés, le procédé plus élaboré que nous proposons, donne des résultats nettement plus significatifs et en liaison plus étroite avec les phénomènes réels.

On notera que la méthode Muntz ne souffre pas les mêmes critiques et reste en la matière, plus souple sur le plan de la prospection et des études extensives.

2.3.1. PROGRESSION DU FRONT HUMIDE. MESURE DES VITESSES D'INFILTRATION SOUS CHARGE CONSTANTE

La progression du front humide est nette sur les figures 3 et 4.

On trouvera, dans le tableau I, la vitesse de progression du front pour le sol I (fig. 3).

TABLEAU I

Profondeur du front humide (en cm)	Heure	Durée de la progression du front (en mn)	Vitesse moyenne de progression	
			cm/mn	10 ⁻⁴ m/s
0 mise en eau	9 h 40			
55	10 h 15	35	1,57	2,62
65	10 h 50	70	0,93	1,55
75	11 h 20	100	0,75	1,25
85	12 h 20	160	0,53	0,88
105	13 h 55	255	0,41	0,68
145	17 h 30	470	0,31	0,52

On peut, à partir de ce tableau, connaître les vitesses d'infiltration pour les tranches de sol comprises entre les profils successifs. Le calcul est basé sur la formule suivante:

$$\frac{H}{V} = \frac{H_1}{V_1} + \frac{H_2}{V_2}$$

H et V représentent la profondeur et la vitesse d'infiltration moyenne depuis la surface jusqu'à la base de l'horizon à étudier.

H₁ et V₁ sont la profondeur et la vitesse d'infiltration moyenne dans toute la tranche du sol située au-dessus de cet horizon.

H₂ est la profondeur de l'horizon à étudier et V₂ la vitesse recherchée propre à l'horizon 2 étudié. On a:

$$V_2 = \frac{V V_1}{H V_1 - H_1 V} \cdot H_2$$

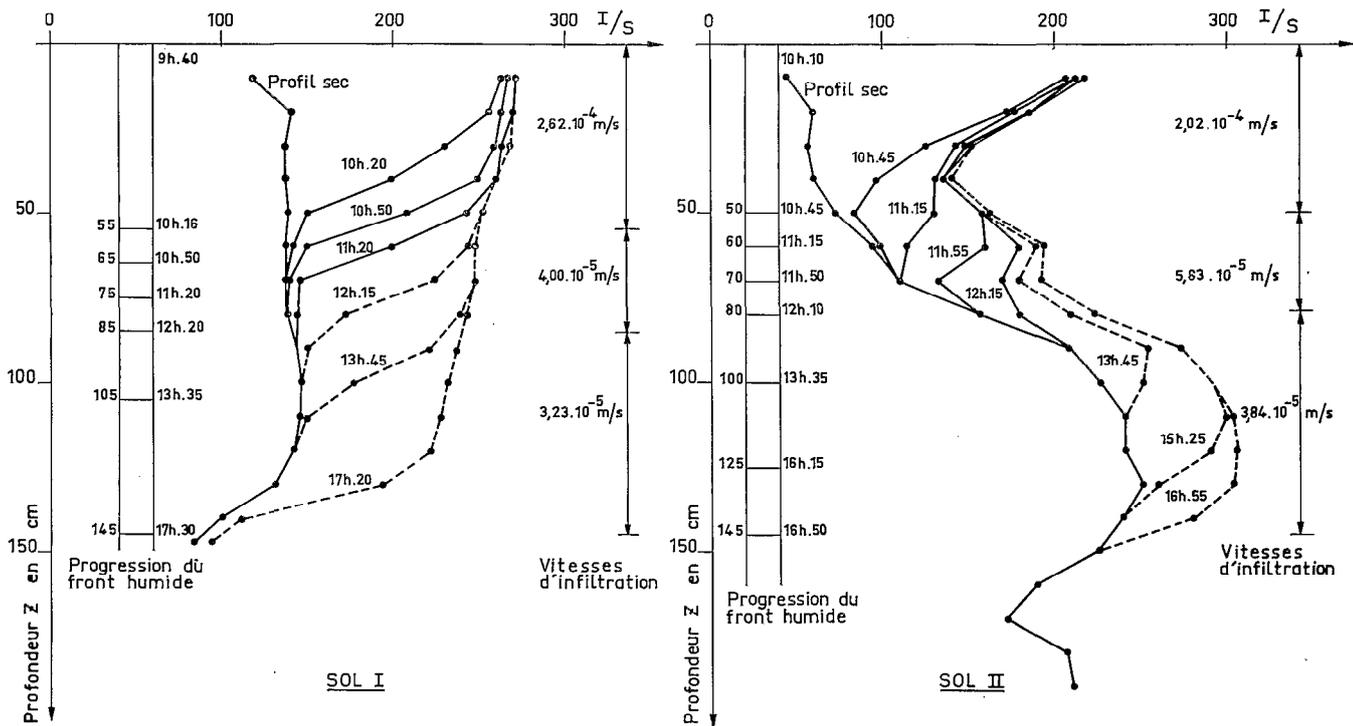


Fig. 3 et 4. — Cinétique de l'infiltration sous charge constante.

A titre d'application, la vitesse d'infiltration entre 55 cm et 65 cm est égale à :

$$V = \frac{0,93 \times 1,57}{(65 \times 1,57) - (55 \times 0,93)} \times 10 \cdot = 0,287 \text{ cm/mn ou } 4,78 \cdot 10^{-5} \text{ m/s.}$$

Les résultats concernant divers horizons sont donnés dans le tableau I bis.

TABLEAU I bis

Horizon considéré		Vitesse d'infiltration dans l'horizon	
limite supérieure (cm)	limite inférieure (cm)	en cm/mn	en m/s · 10 ⁻⁴
55	65	0,29	0,48
65	75	0,33	0,55
75	85	0,27	0,44
85	105	0,21	0,35
105	145	0,19	0,32

On remarquera que V_{65-75} est supérieur à V_{55-65} et V_{75-85} .

Ceci est très probablement dû à la présence de la stone-line aux alentours de 70 cm de profondeur.

Pour le sol II, on obtient (fig. 4):

$$V_{0-50} = 1,43 \text{ cm/mn ou } 2,02 \cdot 10^{-4} \text{ m/s,}$$

$$V_{50-30} = 0,35 \text{ cm/mn ou } 0,58 \cdot 10^{-4} \text{ m/s,}$$

$$V_{30-145} = 0,23 \text{ cm/mn ou } 0,38 \cdot 10^{-4} \text{ m/s.}$$

La vitesse moyenne V_{0-145} est $0,36 \text{ cm/mn ou } 0,60 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$, donc très voisine de celle observée sur le sol I.

Nous avons également procédé à des mesures PORCHET sur le sol I. Nous avons utilisé le protocole de CHEVRON-VILLETTE et ROEDERER en ayant cependant, comme le conseille BOUCHARD, effectué auparavant un premier remplissage des trous, les mesures ayant été faites sur le second remplissage.

Les résultats sont consignés dans le tableau II.

TABLEAU II

	TROU n° 1			TROU n° 2			TROU n° 3		
	Diamètre	0,08 m		Diamètre	0,08 m		Diamètre	0,08 m	
	Prof. avant	0,64 m		Prof. avant	0,60 m		Prof. avant	0,61 m	
	Prof. après	0,62 m		Prof. après	0,60 m		Prof. après	0,60 m	
	Ht	ht	ht + R/2	Ht	ht	ht + R/2	Ht	ht	ht + R/2
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
0	0,030	0,600	0,620	0,030	0,570	0,590	0,030	0,575	0,595
15''	0,050	0,580	0,600	0,046	0,554	0,574	0,040	0,565	0,585
30''	0,066	0,564	0,584	0,053	0,547	0,567	0,050	0,555	0,575
45''	0,084	0,546	0,566	0,064	0,536	0,556	0,058	0,547	0,567
1'	0,096	0,534	0,554	0,071	0,529	0,549	0,067	0,538	0,558
2'	0,158	0,472	0,492	0,106	0,494	0,514	0,104	0,501	0,521
3'	0,200	0,430	0,450	0,138	0,462	0,482	0,129	0,476	0,496
4'	0,238	0,392	0,412	0,165	0,435	0,455	0,156	0,449	0,469
5'	0,276	0,354	0,374	0,189	0,411	0,431	0,180	0,425	0,445
6'	0,300	0,330	0,350	0,212	0,388	0,408	0,202	0,403	0,423
7'	0,325	0,305	0,325	0,236	0,364	0,384	0,226	0,379	0,399
8'	0,348	0,282	0,302	0,256	0,344	0,364	0,246	0,359	0,379
9'	0,368	0,262	0,282	0,274	0,326	0,346	0,263	0,342	0,362
10'	0,384	0,246	0,266	0,290	0,310	0,330	0,280	0,325	0,345
15'	0,465	0,165	0,185	0,359	0,241	0,261	0,350	0,255	0,275
20'	0,508	0,122	0,142	0,410	0,190	0,210	0,400	0,205	0,225

Ht : profondeur atteinte par l'eau depuis le bord du trou;

ht : hauteur d'eau restant dans le trou

(différence entre la profondeur initiale $\frac{0,64 + 0,62 \text{ m}}{2}$ par exemple pour le trou 1 et Ht);

R/2 : demi-rayon du trou.

L'ajustement graphique des mesures est représenté sur la figure 5 et donne les résultats suivants:

Trou 1: $K = 3,5 \cdot 10^{-5}$ en surface et $2,3 \cdot 10^{-5}$ en profondeur,

Trou 2: $K = 2,5 \cdot 10^{-5}$ en surface et $1,8 \cdot 10^{-5}$

puis $1,3 \cdot 10^{-5}$ en profondeur,

Trou 3: $K = 2,3 \cdot 10^{-5}$ en surface et $1,7 \cdot 10^{-5}$

puis $1,3 \cdot 10^{-5}$ en profondeur.

Les résultats sur le trou 1 sont vraisemblablement un peu faussés par la présence de trous de racines ou d'animaux. Par contre, les résultats sur les trous 2 et 3 sont très proches et on peut dire que, sur les 60 cm de sol étudiés, le coefficient de perméabilité Porchet est voisin de $K = 1,5 \cdot 10^{-5}$.

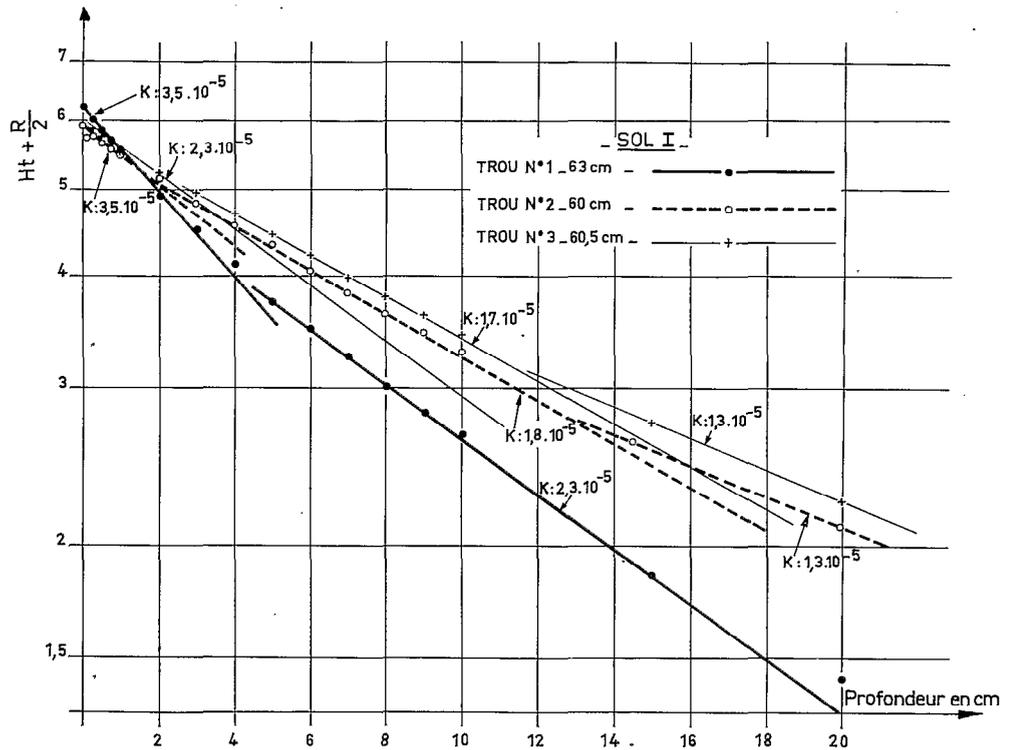


Fig. 5. — Méthode PORCHET

2.3.2. VOLUMES D'EAU INFILTRÉS. POTENTIEL D'INFILTRATION

Il est difficile de calculer les quantités d'eau infiltrées à partir de l'eau ajoutée en surface. En effet, les pertes latérales ne sont pas aisément évaluables. L'humidimètre à neutrons nous permet de trouver de façon précise les volumes infiltrés par différence entre deux profils successifs à condition d'avoir effectué préalablement un étalonnage. Un étalonnage grossier, mais la plupart du temps suffisant, peut être fait lors de la mise en place du tube de mesure: il suffit de comparer le profil-sonde fait immédiatement après le tubage avec des échantillons de sol recueillis tous les 10 cm lors du forage, échantillons dont l'humidité est mesurée au laboratoire. Si cet étalonnage ne donne pas satisfaction, il faut alors procéder à des mesures plus précises, mais plus longues [4].

Pour le bassin versant de la Tafaïna, sol I, l'équation de la droite d'étalonnage, de la forme $y = ax + b$, est la suivante:

$$H_v = \frac{22,1}{E} M - 2,65$$

où H_v est l'humidité volumique en %.

M la lecture faite au point de mesure (en impulsions par seconde),

E la lecture étui (en impulsions par seconde).

Pour connaître la quantité d'eau infiltrée entre deux profils, on peut opérer soit par planimétrage, soit par le calcul; cette deuxième méthode a été choisie ici; elle consiste à faire le produit du gain en impulsions/seconde et de la pente de la droite:

$$x = a (\Sigma_2 - \Sigma_1),$$

x est le volume d'eau infiltré en mm,

$\Sigma_2 - \Sigma_1$ est la différence entre les profils final et initial en impulsions/seconde, les points de mesure étant espacés de 10 cm,

a est la pente de la courbe d'étalonnage.

Dans le cas présent $a = \frac{22,1}{E}$, soit avec $E = 150$ (lecture étui généralement observée), $a = 0,147$.

On trouvera aux tableaux annexes I et II, la liste de mesures brutes en impulsions/seconde faites sur le terrain.

D'autre part, on trouvera au tableau III, le résultat d'analyse de ces mesures et le gain en mm d'eau entre les différents profils effectués le 1^{er} octobre. Ce tableau a été réalisé suivant la méthode indiquée ci-dessus. C'est ainsi que, dans le cas du premier profil humide du sol I, pour lequel le front est à 55 cm de profondeur, on a fait la somme des mesures aux points 10, 20, 30, 40 et 50 cm, soit au total 1 089 impulsions/seconde (3^e colonne de l'annexe I). En regard, dans la colonne Σ_1 , 672 représente le total des impulsions/seconde sur la même tranche de sol (2^e colonne de l'annexe I).

Le gain total entre deux profils est donc obtenu par application de:

$$x = a (\Sigma_2 - \Sigma_1)$$

et le gain partiel par différence entre les valeurs successives de x .

On notera que les heures utilisées, par référence à l'heure de mise en eau, sont celles de la mesure exacte de la position du front humide (qui figurent en première colonne du tableau III). Ces heures sont évidemment intermédiaires des heures de début et de fin de mesure d'un profil (qui sont indiquées sur l'annexe I par exemple).

TABLEAU III

Sol I Mise en eau à 9 h 40							Sol II Mise en eau à 10 h 10						
Heure	Prof du front en cm	Σ_1	Σ_2	$\Sigma_2 - \Sigma_1$	Gain total en mm	Gain partiel en mm	Heure	Prof du front en cm	Σ_1	Σ_2	$\Sigma_2 - \Sigma_1$	Gain total en mm	Gain partiel en mm
9 h 40	Sec	672					10 h 10	Sec	295				
10 h 20	55	672	1 089	417	61,3	61,3	10 h 45	50	295	686	391	57,5	57,5
10 h 50	65	809	1 395	586	86,1	24,8	11 h 15	60	390	907	517	76,0	18,5
11 h 20	75	946	1 653	707	103,9	17,8	11 h 55	70	500	1 133	633	93,0	17,0
12 h 15	85	1 084	1 961	877	128,9	25,0	12 h 15	80	656	1 376	720	105,8	12,8
13 h 45	105	1 374	2 453	1 079	158,6	29,7	13 h 45	100	1 090	1 933	843	123,9	18,1
17 h 20	115	1 520	2 764	1 244	182,9	24,3	15 h 25	125	1 570	2 618	1 048	154,1	30,2
							16 h 55	135	1 820	2 938	1 118	164,4	10,3

Ces résultats sont particulièrement intéressants.

a) D'une part, parce qu'ils peuvent être traduits en potentiel d'infiltration, c'est-à-dire en quantité d'eau maximale infiltrable en fonction du temps, notion très proche de celle de la capacité d'absorption souvent utilisée en hydrologie (voir fig. 6). Les intensités de l'infiltration pour des temps partiels ainsi que l'infiltration totale cumulée, observées sur le sol I, sont consignées dans le tableau IV ci-après. Ces intensités ont été calculées à partir des gains totaux et de l'heure de mise en eau du profil (ici à 9 h 40 mn).

La colonne des gains partiels du tableau III permet le calcul des intensités d'infiltration mesurées qui figurent également sur la figure 6.

TABLEAU IV

Temps partiels	0-30'	30'-1 h	1 h-2 h	2 h-3 h	3 h-4 h	4 h-5 h	5 h-6 h	6 h à 8 h
Intensité de l'infiltration en mm/h	100	80	34	24	18	12	8	7
Temps cumulés	30'	1 h	2 h	3 h	4 h	5 h	6 h	env. 8 h
Infiltration totale en mm	50	80	114	138	156	168	176	183

b) D'autre part, parce qu'on peut connaître simultanément le volume d'eau infiltré et la profondeur atteinte par le front humide (voir la fig. 6 et la première partie des fig. 7 et 8). Ainsi la figure 6 nous indique-t-elle que, pour un temps égal à 2 h 30, le front est à 85 cm de profondeur, le volume d'eau infiltré de 128 mm et le potentiel d'infiltration de 24 mm/h.

2.3.3. MESURE DE LA « POROSITÉ UTILE » D'UN SOL. APPROCHE DE LA POROSITÉ TOTALE

Ces mesures nous permettent également d'approcher sur une tranche de sol déterminée, la valeur d'une porosité que nous appellerons, pour la commodité, « porosité utile ». Cette porosité est la somme de la porosité efficace correspondant à l'eau gravifique augmentée de celle correspondant à l'eau de rétention exception faite de l'eau capillaire non absorbable. Les volumes d'eau rentrant en jeu sont ceux utiles pour l'établissement d'un bilan hydrique, c'est-à-dire l'eau libre et l'eau libérable.

Ainsi dans le cas du sol I, la forme du profil sec et les conditions pluviométriques précédant les mesures, nous permettaient de penser que nous étions au voisinage du profil de flétrissement. La vérification a été faite en laboratoire sur un échantillon prélevé à 70 cm de profondeur. Les résultats ont montré une humidité pondérale voisine de 11%. La mesure faite à l'humidimètre à neutrons le 1^{er} octobre 1968 donne $M = 137$ i/s soit avec $E = 150$ une humidité volumique de 17,4%, puisque $H_v = 22,1 \frac{M}{E} = 2,65$ (cf. 2.3.2). La densité du sol étant de 1,5, l'humidité pondérale

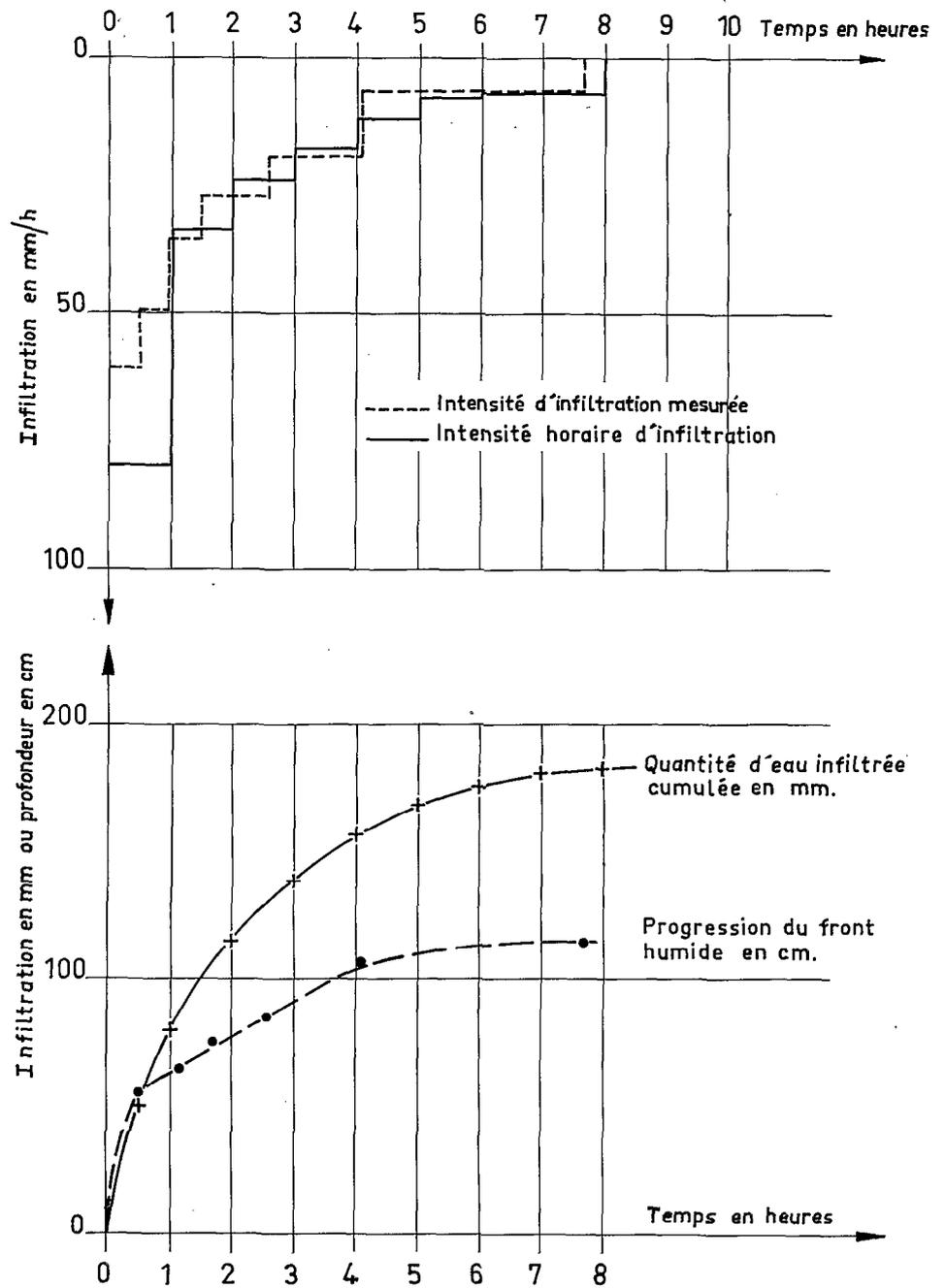


Fig. 6. — Intensités d'infiltration et progression du front humide. Sol I.

est de 11,5% valeur très voisine de celle trouvée en laboratoire pour le point de flétrissement. On peut donc considérer, en particulier pour les horizons supérieurs, que le profil de départ coïncide avec le profil de flétrissement. D'autre part, après plusieurs heures de maintien d'une charge d'eau constante on peut admettre, pour les points du profil restant stables, que nous sommes à la saturation. La différence entre profil de flétrissement et profil de saturation nous permet d'obtenir la valeur de la « porosité utile ». Nous prendrons pour exemple, les cinquante premiers centimètres du sol (voir sur l'annexe I par sommation des cinq premières valeurs des colonnes correspondantes):

$$\begin{aligned} \text{profil sec} & \text{ à 8 h 40 le 1.10.68, } \Sigma 1 = 672 \text{ i/s} \\ \text{profil saturé} & \text{ à 17 h 00 le 1.10.68, } \Sigma 2 = 1\,327 \text{ i/s} \\ \frac{\Sigma 2 - \Sigma 1}{a} & = (1\,327 - 672) \times 0,147 = 96,3 \text{ mm.} \end{aligned}$$

Ce gain total de 96,3 mm sur une tranche de sol de 50 cm, indique une porosité utile de 19,3% voisine de 20%.

Si on ajoute à celle-ci l'humidité de départ sur profil sec, qui est de 18%, on arrive à une porosité totale de 38%.

2.4. Cinétique du ressuyage

Après les mesures de cinétique de l'infiltration, on pose sur la couronne un film plastique de façon à éviter au maximum les pertes par évapotranspiration. On exécute ensuite plusieurs profils, assez rapprochés au début, puis de plus en plus espacés. Pour un sol de perméabilité moyenne, tel que celui du bassin versant de la Tafaiña, nous préconisons les intervalles de temps suivants: 12 heures, 24 heures, 2 jours, 4 jours, 8 jours et 16 jours. Pour un sol de forte perméabilité les profils devront être plus serrés (voir paragraphe 4).

Ces profils nous permettent de connaître les caractéristiques suivantes:

- Pertes en eau en fonction du temps,
- séparation au cours du ressuyage, de deux cinétiques: une cinétique rapide correspondant à la macroporosité du sol et une cinétique lente correspondant à la microporosité; calcul de l'humidité correspondant à la capacité de rétention,
- Approche des valeurs de la macroporosité et de la microporosité.

La deuxième partie des figures 7 et 8 indique la perte d'eau entre les divers profils successifs. Le ressuyage des sols I et II est représenté sur les figures 9 et 10.

2.4.1. PERTES D'EAU PAR RESSUYAGE

La limite d'exploitation des mesures est liée à la saturation des différents horizons, représentée par le niveau inférieur atteint par le front humide à la fin de l'opération d'infiltration sous charge constante. C'est ainsi qu'on estime la saturation atteinte à 110 cm pour le sol I et à 130 cm pour le sol II. (Valeurs très peu différentes de celles atteintes par le front en fin de cinétique d'arrosage selon le tableau III et qui correspondent à une profondeur pour laquelle on est sûr que la capacité de rétention est atteinte.) Le dépouillement des données se fait de la même manière que pour la cinétique d'infiltration. Le tableau V indique les pertes d'eau en mm entre les différents profils.

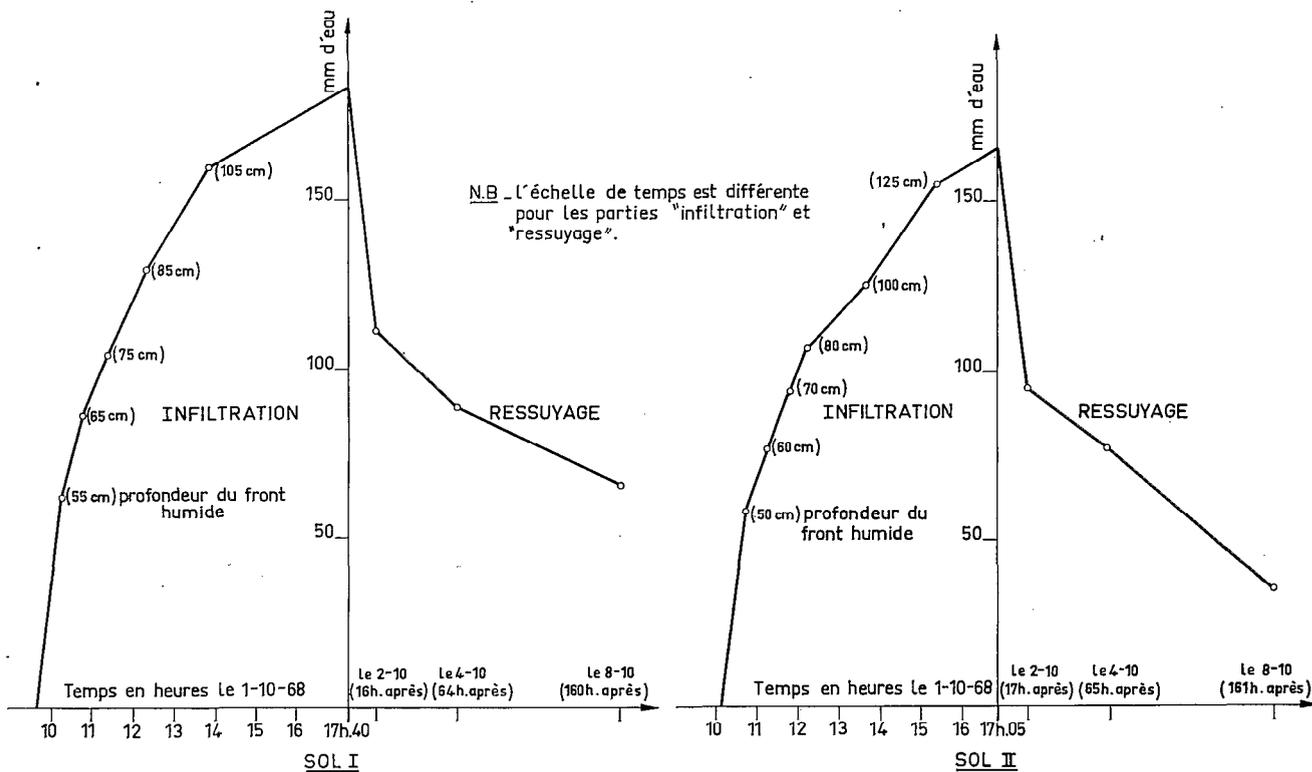


Fig. 7 et 8. — Cinétiques de l'infiltration et de ressuyage. Variations des quantités d'eau.

TABLEAU V

Tubage	Pertes cumulées		
	16 h après	64 h après	160 h après
Sol I (110 cm)	487 <i>i/s</i> ou 71,6 mm	643 <i>i/s</i> ou 94,5 mm	801 <i>i/s</i> ou 117,7 mm
Sol II (130 cm)	482 <i>i/s</i>	596 <i>i/s</i>	886 <i>i/s</i>

Les mesures qui devaient être faites 16 jours après la mise en eau n'ont pu être effectuées, une pluie de 38 mm venant perturber le ressuyage. Bien que les résultats soient positifs puisque nous arrivons à chiffrer les pertes d'eau provenant du ressuyage, nous conseillons pour une meilleure utilisation de cette méthode la mise en place de tubages plus profonds. En effet ces derniers permettraient de suivre, à partir du profil saturé, l'avancement du front humide en profondeur et la répartition de l'humidité le long du profil. Il serait intéressant de connaître cette vitesse de progression du front humide, plus proche des conditions naturelles que dans le cas d'une charge artificielle en surface. Naturellement il sera nécessaire de faire des profils plus serrés que pour les seules mesures de ressuyage. Il faut également noter que contrairement

à l'infiltration, le ressuyage s'effectue parallèlement au profil de départ, les pertes en eau étant sensiblement égales en tous les points du profil. Cette remarque est peut-être seulement valable pour les types de sols ferrallitiques de la Tafaina.

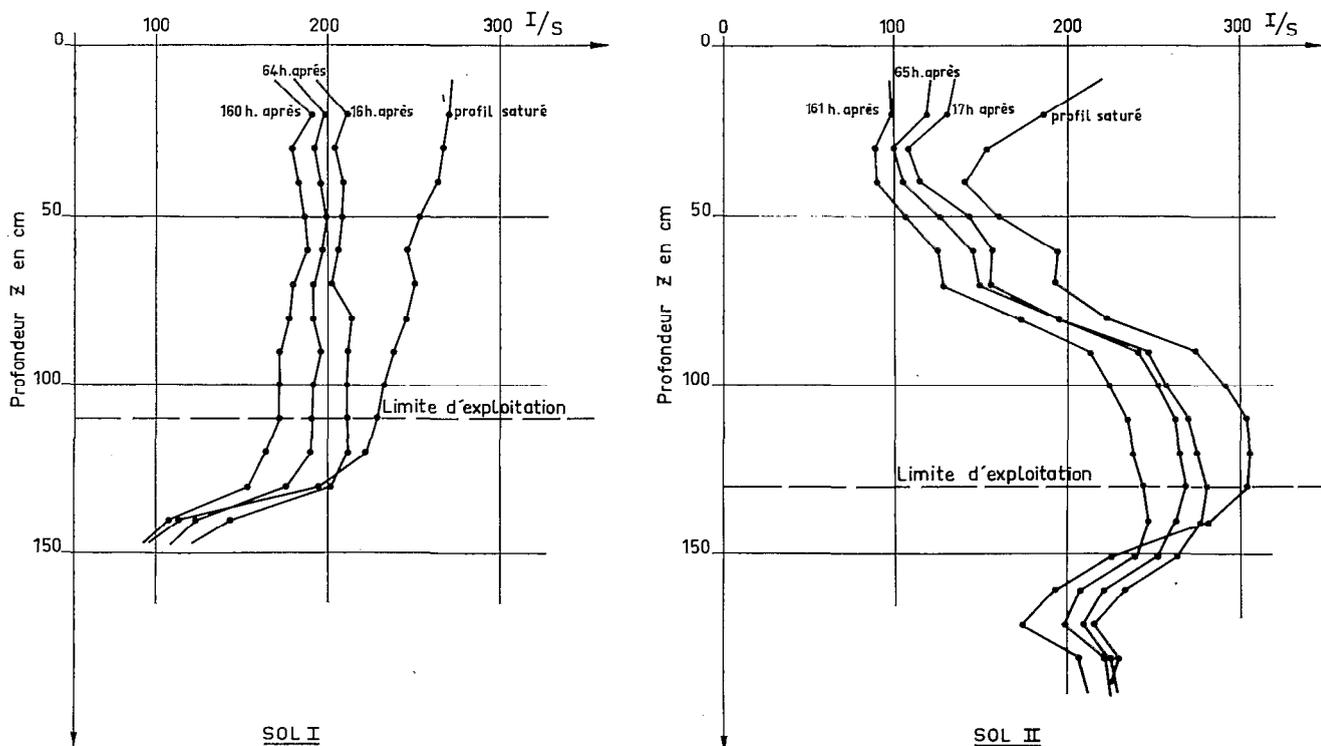


Fig. 9 et 10. — Cinétique du ressuyage

2.4.2. HUMIDITÉ CORRESPONDANT A LA CAPACITÉ DE RÉTENTION

Cette détermination peut se faire graphiquement en reportant sur un diagramme semi-logarithmique, les diverses valeurs obtenues pour un point de mesure au cours du ressuyage. On distingue parfaitement les deux cinétiques, la cinétique rapide se rapportant à la macroporosité et la cinétique lente liée à la microporosité. Le point de jonction entre ces deux cinétiques nous donne l'humidité correspondant à la capacité de rétention grâce à la courbe d'étalonnage. On trouvera dans le tableau VI, les capacités de rétention obtenues sur le sol I entre 0 et 50 cm (voir également la fig. 11).

TABLEAU VI

Z cm	i/s	Valeur étui	R	R corrigé (*)	H_p %	T heures
10	186	153	1,215	1,337	26,9	18
20	205	153	1,339		26,9	18
30	200	153	1,307		26,3	18
40	205	153	1,339		26,9	18

(*) Correction effectuée pour tenir compte de la proximité de la surface du sol. Courbe de correction expérimentale présentée dans (4).

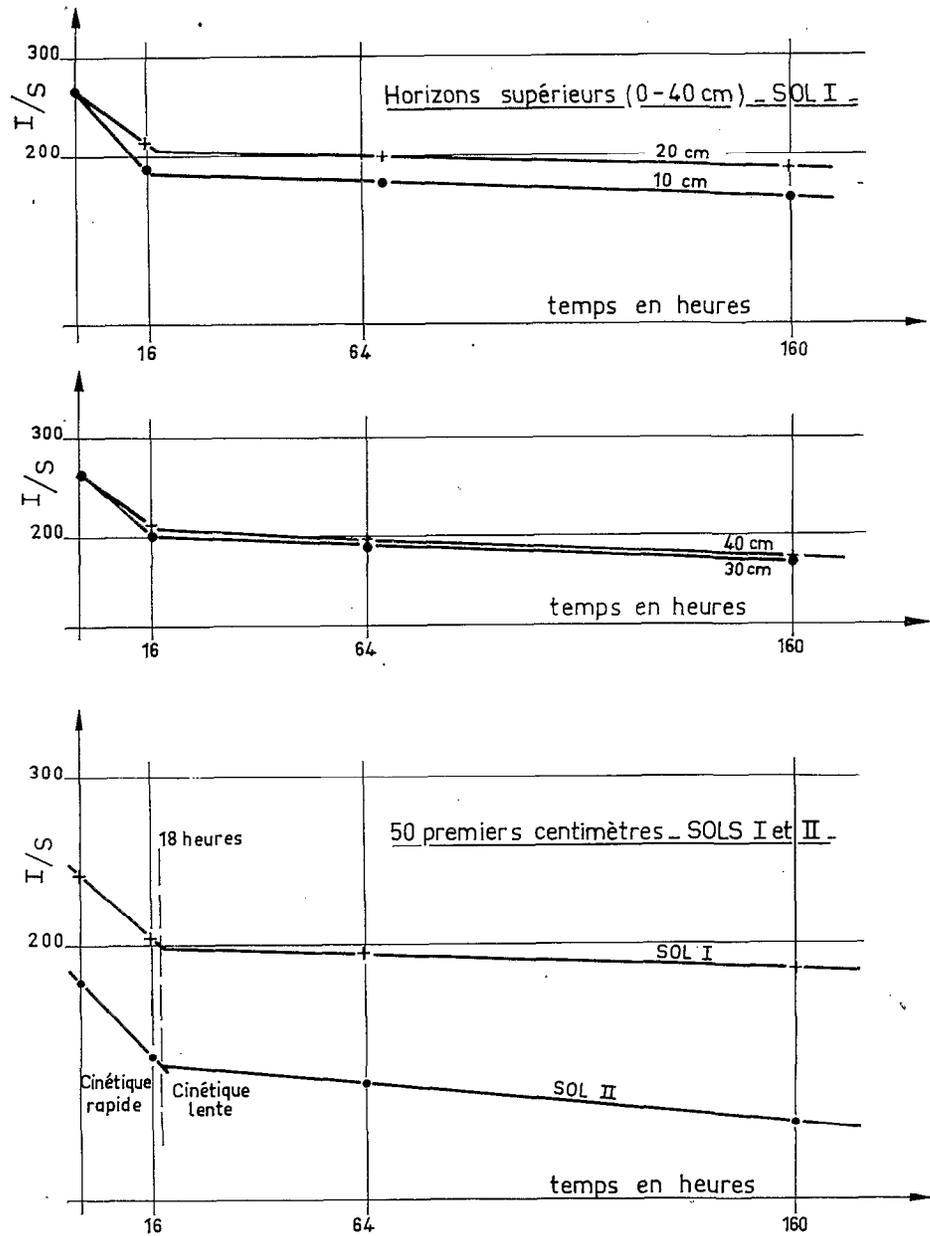


Fig. 11. — Atteinte de l'humidité correspondant à la capacité de rétention.

Il faut remarquer que cette méthode permet d'obtenir non seulement la valeur de l'humidité à la capacité de rétention, mais également le temps nécessaire pour y parvenir à partir de la saturation, notion qui peut être très importante lors d'applications agronomiques éventuelles.

Le calcul a également été fait globalement pour les 50 premiers cm du sol I et du sol II (voir fig. 1), horizon directement relié à l'évapotranspiration, puisque c'est la limite de pénétration des racines des graminées caractéristiques de la végétation

du bassin. La capacité de rétention est atteinte au bout de 18 heures sur les deux tubages et est voisine de 27% pour le sol I (19,3% en valeur pondérale pour $d = 1,4$).

On peut enfin, en raisonnant comme dans le chapitre 2.3.3., séparer les valeurs de la macroporosité et de la microporosité sur ces 50 premiers cm.

Profil sec: $\Sigma i/s = 672$,

Profil à la C.R.: $\Sigma i/s = 1\ 000$,

Profil saturé: $\Sigma i/s = 1\ 327$,

soit pour une porosité utile de 19,3%, la répartition suivante:

9,7% en macroporosité (eau de gravité),

et

9,6% en microporosité (eau de rétention disponible pour les plantes).

3. Mesures effectuées au laboratoire - Comparaison avec les résultats obtenus à l'humidimètre à neutrons.

3.1. Mesure de la capacité de rétention par les méthodes classiques

Les mesures ont été effectuées sur le sol I, pour les horizons situés à 30 cm et à 70 cm de profondeur (BV₁ et BV₂).

La capacité de rétention n'est pas mesurable de façon rigoureuse au laboratoire; seule une valeur approchée peut être déterminée: l'humidité équivalente. Celle-ci correspond à la quantité d'eau retenue dans le sol ayant subi une pression de 1 000 g/cm², c'est-à-dire à un pF égal à 3. Nous rappelons que contrairement aux mesures effectuées à l'humidimètre, les humidités mesurées au laboratoire sont des humidités pondérales.

La mesure de l'humidité équivalente se fait au moyen d'une marmite séparée en deux compartiments par une plaque poreuse sur laquelle sont posés les échantillons de terre à étudier. Ceux-ci préalablement saturés d'eau sont soumis à une pression de 1 000 g/cm² pendant 24 heures. On détermine alors par dessiccation à 105°, le pourcentage d'eau restant dans les échantillons. L'humidité équivalente est déterminée habituellement sur l'échantillon séché à l'air pendant plusieurs jours. La réhumectation du sol, avant analyse n'étant pas parfaite, nous avons sur les échantillons BV₁ et BV₂, effectué aussi la mesure de l'humidité équivalente sur sol frais, c'est-à-dire aussitôt après les avoir prélevés. Les résultats des mesures sont indiqués dans le tableau IX. Ils montrent que les déterminations faites sur sol frais sont plus proches de la réalité que celles effectuées sur sol séché à l'air.

En fait le pF correspondant à la capacité de rétention varie avec la texture du sol. Le pF 3 adopté au laboratoire ne donne qu'un aperçu de la véritable valeur de la capacité de rétention.

Dans le but d'approcher celle-ci aussi près que possible, R. GRAS [5] a établi pour des sols à capacité de rétention connue, une courbe de pF de ressuyage correspondant à la capacité de rétention en fonction de l'humidité du sol à pF 3. Une simple lecture permet donc à partir de l'humidité du sol déterminée à pF 3, de trouver le pF correspondant à la capacité de rétention.

Nous avons ainsi pu déterminer pour les échantillons BV₁ et BV₂, la capacité de rétention à partir de leur humidité à pF 3 (tableau VII).

TABLEAU VII

Echantillon	Profondeur (cm)	pF correspondant à la capacité de rétention déterminée sur la courbe de GRAS	Humidité correspondant à ce pF
BV ₁	30	2,45	18,8
BV ₂	70	2,35	16,5

La méthode la plus employée pour mesurer la capacité de rétention d'un sol de façon précise, consiste à déterminer l'humidité du sol (celui-ci ayant préalablement été humecté par une pluie ou un arrosage) pendant le ressuyage du profil jusqu'à ce que le taux d'humidité soit relativement constant.

Nous avons donc saturé le profil du bassin versant en le soumettant à une charge d'eau constante de 5 cm pendant 6 heures. La cinétique de ressuyage déterminée par l'humidimètre à neutrons laissant supposer que la capacité de rétention est obtenue au bout de 18 heures, nous nous sommes contentés d'effectuer des prélèvements à la tarière, 5 heures, puis 18 heures, puis 24 heures après la fin de la mise en eau du profil. Les échantillons prélevés à 30 et 70 cm ont été enfermés dans des sacs étanches pour leur transport au laboratoire où nous avons déterminé leur humidité par dessiccation dans l'étuve à 105°.

Les résultats sont résumés dans le tableau VIII où nous indiquons les moyennes des mesures (celles-ci ayant été faites en 3 exemplaires pour chaque échantillon).

TABLEAU VIII

Echantillon	Profondeur (cm)	Humidité en % des échantillons après un ressuyage de:		
		5 heures	18 heures	24 heures
BV ₁	30	21,6	20,0	20,1
BV ₂	70	19,1	18,8	18,7

Les valeurs de l'humidité déterminées au bout de 18 heures, peuvent être considérées comme stables et correspondent ainsi à la capacité de rétention.

3.2. Comparaison des résultats obtenus par les différentes méthodes

Dans le tableau IX sont réunis les résultats des mesures de la capacité de rétention obtenus par les différentes méthodes sur les échantillons BV₁ et BV₂ que nous avons employés.

TABLEAU IX

Horizon	Méthode Humidité équivalente		Méthode Humidité correspondante à la capacité de rétention (en % de terre séchée à 105°)		
	Sol frais	Sol séché à l'air	Méthode graphique (R. GRAS)	Mesure sur le terrain par prélèvement à la tarière	Humidimètre à neutrons
BV ₁ (30 cm)	17,8	15,9	18,8	20	19,5
BV ₂ (70 cm)	15,7	13,9	16,5	18,8	17,7

L'humidité équivalente correspond à un pourcentage en eau plus faible que celui de la capacité de rétention déterminée par les autres méthodes. Celles-ci donnent des résultats assez proches.

La mesure de l'humidité correspondant à la capacité de rétention peut donc se faire par l'humidimètre à neutrons. Celui-ci présente l'avantage, surtout du point de vue agronomique, de déterminer non seulement la capacité de rétention du sol, mais la durée exacte du ressuyage permettant d'y arriver.

4. Application de l'humidimètre à neutrons à la détermination de la capacité de rétention des andosols.

L'humidimètre à neutrons étant un excellent moyen de déterminer la capacité de rétention des sols en place, nous l'avons employé dans le cas des andosols pour lesquels les mesures de la capacité de rétention au laboratoire par les méthodes habituelles donnent des résultats peu satisfaisants.

Les andosols (*) sont des sols jeunes formés sur matériau essentiellement volcanique sous des climats humides ou subhumides. La caractéristique principale de ces sols est leur richesse en produits minéraux de type allophane. Les teneurs en matières organiques sont élevées: l'horizon humifère est le plus souvent noir. La teneur en eau du sol en place est importante. Desséché à l'air, le sol ne se réhumecte pas complètement. Cette irréversibilité de la dessiccation rend difficile la mesure de la capacité de rétention du sol au laboratoire.

Nous avons étudié un type d'andosol très répandu dans le massif de l'Ankaratra (hauts plateaux de Madagascar) à plus de 2 000 m, c'est-à-dire sous un climat tropical d'altitude. La couverture végétale est une prairie à pentaschistis humbertii. Le profil se présente de la façon suivante:

AKZ 201: 0-20 cm Horizon noir humide limono-argileux
Très riche en matière organique (30 à 35%). Très nombreuses racines

(*) Le terme « andosol » est dérivé du japonais : « an » = noir, « do » = sol.

	Structure polyédrique fine. Degré de structuration moyen à l'état humide, très fort à l'état sec Très poreux
AKZ 202: 20-80 cm	Horizon brun foncé, humide, argileux. Toucher savonneux Teneur en matière organique encore élevée (10 à 15%) Structure massive, assez cohérente Très poreux: quelques très gros pores tubulaires Nombreux petits pores à peine visibles à l'œil nu
AKZ 203: 80-120 cm	Horizon brun jaune très humide, argileux. Toucher savonneux Structure continue à éclats finement polyédriques à l'état humide. Lorsque le profil sèche, une structure polyédrique fine, très résistante, se développe Porosité identique à celle de l'horizon supérieur

L'ensemble du profil présente une porosité très forte: deux catégories de pores peuvent être observées: des pores tubulaires de très gros diamètre (allant jusqu'à 1 cm), des pores tubulaires beaucoup plus fins à peine visibles à l'œil nu.

Caractéristiques hydriques de ce sol

Les prélèvements d'échantillons en vue de la détermination de l'humidité du sol en place ont été effectués durant le mois de juillet (hiver austral), c'est-à-dire pendant la saison la moins arrosée de l'année.

Le tableau X indique les humidités (en pour cent de sol séché à 105°) des différents horizons ainsi que leur densité apparente. Les humidités ont été déterminées sur le sol frais et sur le sol séché à l'air pendant trois semaines.

TABLEAU X

Echantillon	Humidité (%)		Densité apparente
	Sol frais	Sol séché à l'air (3 semaines)	
AKZ 201 (10 cm)	183	21	0,38
AKZ 202 (60 cm)	163	19	0,46
AKZ 203 (100 cm)	108	15	0,69

Les teneurs en eau du sol frais sont très élevées, elles s'abaissent de haut en bas du profil corrélativement avec les teneurs en matière organique des horizons. La densité apparente croît de haut en bas du profil.

La différence d'humidité entre le sol frais et le sol séché à l'air est très importante.

Détermination de l'humidité équivalente

Nous avons déterminé l'humidité du sol à pF 3 sur les échantillons frais et sur les échantillons séchés à l'air pendant trois semaines. Les résultats sont récapitulés dans le tableau XI.

TABLEAU XI

Echantillon	Humidité à pF 3 (%)	
	Sol frais	Sol séché à l'air
AKZ 201 (10 cm)	170	78
AKZ 202 (60 cm)	148	40
AKZ 203 (100 cm)	99	35

Ce tableau montre bien l'irréversibilité de la dessiccation. Une fois séché, le sol se réhumecte très mal. La détermination de l'humidité à pF 3 sur sol séché donne des valeurs très inférieures à celles obtenues à partir du sol frais.

D'autre part, l'humidité des échantillons frais à pF 3 est inférieure à celle que nous avons trouvée pour les échantillons frais en place. La capacité de rétention de ces sols ne peut donc être déterminée par la mesure de l'humidité équivalente. Une autre méthode s'impose.

Détermination de la capacité de rétention

L'humidité du sol à la capacité de rétention a été mesurée par dessiccation à 105° des échantillons prélevés à la tarière pendant le ressuyage du sol préalablement saturé d'eau par arrosage. L'arrosage du sol a été effectué de façon continue pendant 5 heures.

Les prélèvements à la tarière ont été faits à intervalles de temps déterminés. Le tableau XII indique les humidités de ces échantillons prélevés au temps 0, 6 heures, 17 heures et 26 heures après la fin de la mise en eau du profil.

TABLEAU XII

	Echantillon	Heure de prélèvement			
		0 heure	6 heures	17 heures	26 heures
Humidité pondérale en %	AKZ 201 (10 cm)	219	206	206	208
	AKZ 202 (60 cm)	244	236	230	241
	AKZ 203 (100 cm)	102	112	104	100

L'imprécision de ces résultats est due pour la plus grande part à l'hétérogénéité du sol qui rend impossible, pour un même horizon, des prélèvements successifs homogènes.

Si ces résultats permettent d'approcher une valeur plus réelle de la capacité de rétention que celle déterminée à pF 3, ils sont insuffisants pour la déterminer d'une façon rigoureuse.

L'emploi de l'humidimètre à neutrons dans ce type de sol permet de suivre le ressuyage sur un profil immuable, donc de faire des mesures en éliminant le risque d'erreur dû à l'hétérogénéité latérale des horizons que nous avons eu lors des prélèvements à la tarière. Il permet en outre, de mesurer le temps au bout duquel la capacité de rétention est atteinte.

Nous avons installé un tube de mesure, à quelques mètres du profil AKZ 201, en début de saison sèche.

La détermination de l'humidité des échantillons prélevés à la tarière lors de l'installation du tube a permis l'étalonnage (relation entre le nombre d'impulsions/seconde mesuré par la sonde et l'humidité du sol en place, voir annexe III). Celui-ci est représenté dans la figure 12. Deux droites peuvent être distinguées: l'une correspondant aux horizons très organiques, l'autre aux horizons moins riches en matière organique.

Il faut remarquer que dans le cas des andosols, donc de sols dont les teneurs en eau et en matière organique sont élevées, l'étalonnage ne peut être aussi précis que pour d'autres types de sols, la raison principale étant la faible variation d'humidité entre les horizons.

Les premières mesures de capacité de rétention ont été effectuées quatre mois après l'installation du tube, afin de laisser à la terre le temps de se tasser autour du tube.

La mise en eau du profil a été réalisée en maintenant une hauteur d'eau constante de 5 cm au-dessus de la surface du sol pendant 4 heures. Elle a révélé une perméabilité très forte du sol puisque l'infiltration correspond à une lame d'eau infiltrée légèrement supérieure à 500 mm par heure. Cette perméabilité est due essentiellement aux pores de très gros diamètres que nous avons signalés.

La cinétique de ressuyage est représentée dans la figure 13 où sont indiqués les nombres d'impulsions par seconde en fonction du temps pour les horizons à 30 cm (horizon organique) et à 100 cm (horizon peu organique). Dans les deux cas, la courbe représentant le ressuyage se divise en trois portions :

a) Une portion verticale indiquant un ressuyage très rapide. En moins d'une heure le nombre d'impulsions par seconde passe de 525 à 500 pour l'horizon à 30 cm et de 473 à 456 pour l'horizon à 100 cm. Cette portion de courbe correspond à une cinétique très rapide due au ressuyage des macropores;

b) Une portion très inclinée indiquant un ressuyage assez rapide.

En 24 heures, le nombre d'impulsions par seconde passe de 500 à 480 pour l'horizon à 30 cm et de 456 à 442 pour l'horizon à 100 cm. Cette portion de courbe correspond à une cinétique rapide assimilable à celle trouvée pour les sols I et II du bassin versant de la Tafaina et due au ressuyage de pores beaucoup plus fins que les précédents;

c) Une portion presque horizontale indiquant un ressuyage très lent. Au bout de trois jours le nombre d'impulsions par seconde diminue au plus d'une unité. Ce troisième tronçon de courbe correspond à une cinétique lente.

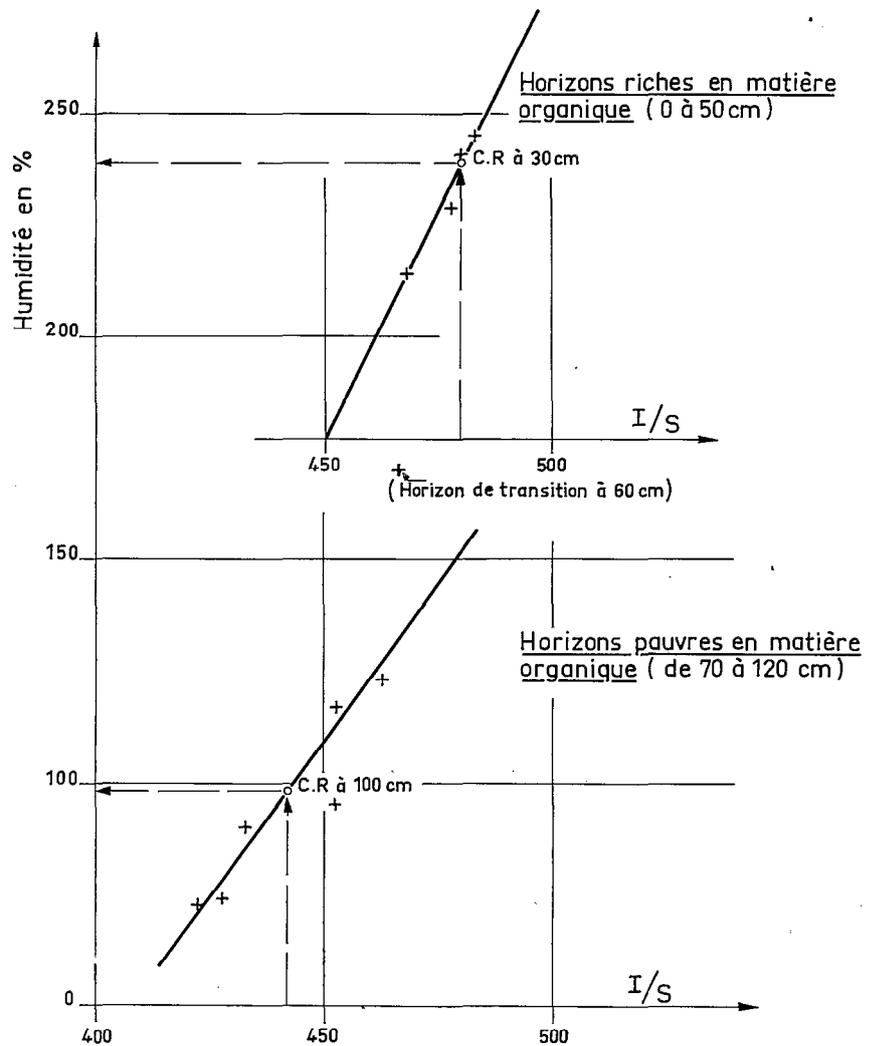


Fig. 12. — Etalonnage de la sonde à neutron sur andosol.

La capacité de rétention est obtenue dans les deux cas au bout de 24 heures. La courbe d'étalonnage permet de déterminer à partir du nombre d'impulsions par seconde mesurées après 24 heures de ressuyage, le pourcentage en eau du sol. Celui-ci est de 239 % pour l'horizon à 30 cm et de 98 % pour l'horizon à 100 cm.

Ces valeurs sont assez proches de celles, déterminées par dessiccation à 105°, des horizons AKZ 202 et 203 prélevés à la tarière après arrosage du sol (voir tableau XII).

L'humidimètre à neutrons permet donc sur ce type de sol, de déterminer:

1) L'humidité correspondant à la capacité de rétention d'une façon plus précise que par les méthodes habituellement employées en pédologie;

- 2) Le temps au bout duquel la capacité de rétention est atteinte;
- 3) Les différentes formes de cinétique d'infiltration: trois cinétiques ont été mises en évidence, elles correspondent chacune à un ressuyage de pores de diamètres différents.

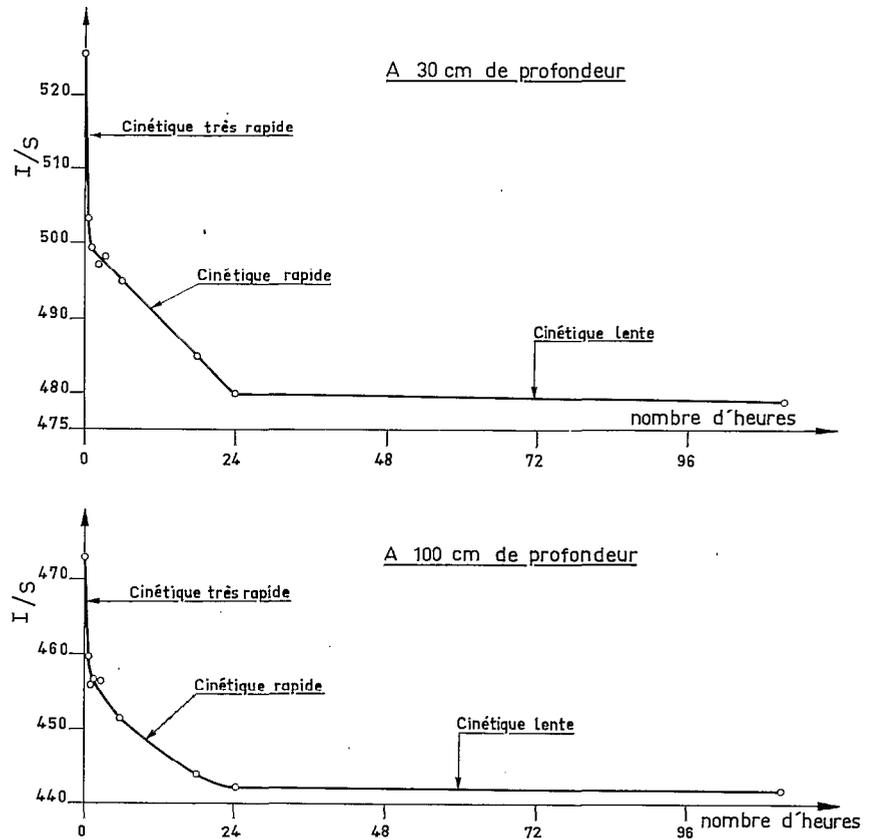


Fig. 13. — Cinétique du Ressuyage sur andosol.

5. Conclusion

Aux avantages principaux déjà connus de l'humidimètre à neutrons:

- Mesures « in situ » sur un profil rigoureusement identique, ce qui élimine toute hétérogénéité latérale;
- Reproductibilité des mesures, dans le temps;
- Rapidité dans l'exécution et le dépouillement.

Vient s'ajouter un éventail de possibilités dont toutes ne sont pas encore exploitées.

Dans la présente publication, nous avons pu aborder des mesures que toutes les méthodes classiques ne nous auraient pas permis d'obtenir, du moins avec autant de précision et aussi rapidement. C'est ainsi que nous avons réussi à mesurer la valeur de divers paramètres des sols utiles en pédologie et en hydrologie.

Certains ont été mesurés en *valeur absolue*:

L'humidité correspondant à la capacité de rétention;

La « porosité utile » et la porosité totale;

Les pertes d'eau par ressuyage à partir d'un sol saturé.

D'autres peuvent, sous réserve d'une normalisation de la méthode de l'infiltration sous charge constante (charge, diamètre de l'anneau, anneau de garde éventuel, etc.), *permettre une comparaison* entre les différents sols quant à leur comportement hydrologique:

— Vitesse d'infiltration;

— Volumes d'eau infiltrés en fonction de la profondeur;

— Potentiel d'infiltration.

L'emploi de l'humidimètre à neutrons permet seul de suivre l'évolution rapide de l'humidité d'un sol aussitôt après une averse, comme nous l'avions montré précédemment [4], ce qui est très important pour l'hydrologue.

En hydrologie de bassin représentatif, l'emploi de l'humidimètre à neutrons est vivement recommandé pour les études fines et intensives, comme à la Tafaina. Cet emploi est un peu moins intéressant pour des mesures extensives sur de nombreux emplacements, car il faut attendre plusieurs mois après la mise en place d'un tube pour l'utiliser.

Références bibliographiques

[1] 1967 — *Cahiers O.R.S.T.O.M.*, Série Hydrologie, vol. IV, n° 1.

[2] 1967 — *Cahiers O.R.S.T.O.M.*, Série Hydrologie, vol. IV, n° 3.

[3] 1967 — « Isotop and Radiation techniques in soil physics and irrigation studies A.I.E.A. ». Vienne.

[4] POURRUT (P.) — 1968 — « Utilisation pratique de l'humidimètre à neutrons pour les mesures hydrologiques ». *Cahiers O.R.S.T.O.M.*, Série Hydrologie, vol. V, n° 2.

[5] GRAS (R.) — 1962 — « Quelques observations sur les relations entre les propriétés physiques du sol et la croissance du pêcher dans la vallée du Rhône entre Vienne et Valence ». *Ann. Agronom.*, vol. 13, n° 2.

ANNEXE I
BASSIN VERSANT DE LA TAFAINA — SOL I
MESURES BRUTES (Impulsions par seconde)

Date	Cinétique de l'infiltration (mise en eau à 9 h 40)							Cinétique du ressuyage		
	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10	2/10	4/10	8/10
Heure de début	8 h 40 (*)	10 h 05	10 h 35	11 h 05	12 h 00	13 h 30	17 h 00	9 h 30	9 h 30	9 h 30
Z en cm:										
10	118	263	265	271	271	270	272	192	180	168
20	141	256	263	270	269	269	270	211	199	190
30	137	230	259	264	268	267	267	204	192	179
40	137	190	250	260	260	262	264	209	196	182
50	139	150	208	243	252	252	254	208	199	186
60	137	142	150	199	245	247	246	206	197	187
70	137	138	139	146	224	249	250	202	191	179
80	138	137	138	144	172	239	243	213	191	177
90	144	144	144	144	150	221	238	211	185	171
100	146	145	148	148	147	177	232	210	191	172
110	146	146	146	146	147	149	228	211	190	172
120	142	142	142			141	222	212	190	163
130	131	132	132				194	201	176	153
140	100	100	99				112	143	122	107
147	84	85	84				94	120	107	92
Heure finale	9 h 15	10 h 35	11 h 05	11 h 30	12 h 30	14 h 00	17 h 40	10 h 10	10 h 10	10 h 10

ANNEXE II
BASSIN VERSANT DE LA TAFAINA — SOL II
MESURES BRUTES (Impulsions par seconde)

Date	Cinétique de l'infiltration (mise en eau à 10 h 10)							Cinétique du ressuyage			
	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10	2/10	4/10	8/10	
Heure de début	8 h 50 (*)	10 h 36	11 h 06	11 h 40	12 h 05	13 h 28	15 h 05	16 h 45	10 h 15	10 h 15	10 h 00
Z en cm:											
10	45	207	213	213	(215)	(218)	220	134	121	97	
20	60	173	176	186	(185)	(185)	185	130	118	98	
30	57	125	143	148	152	152	152	107	98	88	
40	60	97	131	136	137	137	140	114	104	89	
50	73	84	130	158	159	159	160	142	125	106	
60	95	98	114	160	180	190	194	155	144	124	
70	110	110	109	132	169	179	192	154	148	127	
80	156	154	152	155	179	208	222	195	195	172	
90	208			208	208	254	273	273	246	241	213
100	226			225		251	290	290	256	253	224
110	240					240	300	302	269	262	234
120	240					240	290	305	274	265	237
130	250					251	260	303	280	268	243
140	239					240	240	280	277	262	246
150	224						225	225	263	252	239
160	189						190	192	233	220	206
170	172								214	208	197
180	206								228	224	222
190	210								224	228	224
Heure finale	10 h 55	11 h 24	12 h 05	12 h 20	13 h 55	15 h 40	17 h 05	11 h 15	11 h 15	11 h 00	

(*) Profil sec.

ANNEXE III
MESURES SUR LES ANDOSOLS
ETALONNAGE DE LA SONDE

Profondeur (cm)	i/s	Humidité (%)
20	468	214
30	478	229
40	480	240
50	483	245
60	466	170
70	452,5	95
80	427,5	74
90	422,5	72
100	432,5	90
110	453,5	117
120	463	123

CINETIQUE DU RESSUYAGE

30 cm		100 cm	
Temps	i/s	Temps	i/s
Profil sec	475	Profil sec	438
0 h 00	525	0 h 00	473
0 h 10	503,5	0 h 25	459,7
0 h 50	499,5	0 h 45	455,6
2 h	497,3	1 h 25	456,3
3 h 20	498,5	2 h 22	456,2
5 h 45	494,9	5 h 33	451,4
18 h	485	18 h 30	444
24 h	479,6	24 h	442
112 h	479	112 h	441,8