

Ch. RIOU * ⁽¹⁾

Quelques relations entre pluie, ruissellement et infiltration obtenues en laboratoire sur des sols initialement secs

INTRODUCTION

Les études d'infiltration ont été entreprises à Tunis pour étudier plus particulièrement la pénétration de l'eau dans les sols secs. Plusieurs observateurs ont signalé en effet que l'alternance des humectations et des dessèchements provoquait sur de nombreux sols la formation d'une croûte superficielle pouvant freiner par la suite la pénétration de la pluie. Les travaux présentés ici ont pour but de préciser ces observations. Nous avons utilisé trois procédés expérimentaux :

- infiltration d'une lame d'eau libre sur une colonne de terre,
- aspersion avec une intensité connue, de très fines gouttelettes, pratiquement sans énergie,
- application d'une pluie simulée, d'intensité connue, et douée d'une certaine énergie cinétique.

* Maître de recherches à l'O.R.S.T.O.M.

(1) Avec la collaboration de A. de Montis.

I. — INFILTRATION D'UNE LAME D'EAU LIBRE

1.1. — Méthode.

Elle est simple et connue. Deux tubes de verre de 24 cm² de section et 50 cm de long, sont placés l'un au-dessus de l'autre, le tube supérieur contient l'eau, l'autre la terre homogénéisée et tassée aussi régulièrement que possible. Les deux tubes sont gradués de manière à suivre dans le temps, la hauteur d'eau infiltrée et la progression du front d'humectation.

Un dispositif « Vase de Mariotte » permet de maintenir une charge d'eau constante. Enfin le tube contenant la terre est ouvert à son extrémité inférieure pour permettre le libre écoulement de l'air.

Nous avons utilisé plusieurs types de terre :

- un sable moyen (1),
- un sable fin (2),
- différentes fractions de sol limono-argileux séparées par tamisage,
- agrégats de diamètre compris entre 0,5 et 2 mm,
- agrégats de diamètre compris entre 0,2 et 0,5 mm,
- micro — agrégats de diamètre moyen inférieur à 0,2 mm.

Le dessèchement était effectué suivant le cas à l'air libre ou à l'étuve.

1.2. — Résultats.

Pour toutes les terres utilisées, il apparaît une relation entre la hauteur d'eau infiltrée I et le temps t de la forme.

$$I = a\sqrt{t} + b$$

a est un coefficient qui varie avec le type de terre ; b est un paramètre pratiquement constant pour une charge donnée, et peu différent de celle-ci. L'origine des temps est en effet choisie avant la mise en communication des deux tubes, et b correspond à l'eau écoulee pour l'établissement de la charge. Si l'on passe à la profondeur Z du front d'humectation, on trouve une relation de la même forme

$$Z = \alpha\sqrt{t} + \beta$$

β est ici pratiquement nul. Le rapport α représente la porosité.

En fait ces relations sont très étroites jusqu'à une profondeur Z_0 du front d'humectation variant avec a . Ensuite Z augmente plus vite que prévu. Pour le sable (1) Z_0 est de l'ordre de 30 cm. Pour ce même sable initialement à 4 % de taux d'humidité, Z_0 n'est plus que de 15 cm, a étant diminué de 40 %.

Enfin nous avons fait varier la charge d'eau au-dessus de la terre, de 1 à 8 cm, sans modifier les coefficients a et α . Dans les limites de l'expérience, la charge paraît donc être sans influence sur l'infiltration.

1.3. — Interprétation.

KIRKHAM et FENG en 1949 utilisant des colonnes horizontales de terre ont trouvé des relations identiques. Par la suite SWARTZENDRUBER et ses collaborateurs ont pensé que le coefficient a pourrait être une caractéristique de structure ; HANSEN a mentionné cette relation en indiquant qu'elle n'était valable que pour des colonnes horizontales de terre.

Cependant les résultats trouvés ici montrent que, pour les sols à faible taux d'humidité, la pesanteur n'intervient pas jusqu'au niveau Z_0 . L'analogie capillaire et les théories de Kozeny

développées ensuite par SHEIDEGGER permettent d'interpréter ces résultats. Si on assimile le sol à un ensemble de tubes capillaires continus, s'ouvrant aux deux faces de la colonne, mais de forme et diamètre variables, on peut écrire

$$v = \frac{P}{z \eta} f(n, r, T)$$

v = vitesse d'infiltration,

P = pression exercée au niveau du front d'humectation,

z = longueur humectée,

s = longueur du capillaire,

$\frac{s}{z}$ = T tortuosité, constante pour un milieu donné,

r = rayon moyen du capillaire,

n = nombre de capillaires par unité de section,

η = viscosité de l'eau.

f est une fonction compliquée, liée au modèle physique que l'on suppose représentatif du phénomène et qui traduit la répartition des diamètres des capillaires à un niveau. Il nous suffit qu'elle soit constante pour un milieu poreux donné.

D'autre part, nous avons :

$$v = n \pi r^2 \frac{ds}{dt}$$

$$v = n \pi r^2 T \frac{dz}{dt}$$

On en tire :

$$\frac{P}{\eta z} f(n, r, T) = \frac{dz}{dt} f. \text{ constante pour le milieu.}$$

et en intégrant avec $P = cte$

$$Z^2 = \frac{2Pf}{\eta} t \quad \text{Condition à la limite :} \\ z = 0 \quad t = 0$$

Or $P = P_c + P_g$ somme de la pression constante de succion au niveau du front d'humectation et de la pression hydrostatique $P_g = \rho gz$.

Pour un sol sec, et une charge relativement faible,

P_g est donc négligeable devant P_c jusqu'au niveau Z_0 , d'autant plus petit que P_c est plus faible, c'est-à-dire que la terre est plus humide, ceci est tout à fait conforme aux résultats de PHILIP qui propose la formule $I = St^{1/2} + At$ avec A très faible pour les faibles taux d'humidité, généralisant ainsi la formule de ΚΟΣΤΙΑΚΟΝ.

$$I = ct^d \text{ avec } d \neq \frac{1}{2}$$

On peut donc conclure, qu'en début d'infiltration, un sol sec absorbe l'eau par succion, tout effet de croûte mis à part.

La méthode utilisée n'a pas permis de mettre en évidence des réductions d'infiltration dues à la formation de croûtes superficielles. Il a été nécessaire de rechercher un procédé expérimental plus fin, ce qui a conduit aux expériences suivantes.

II. — ASPERSION DE FINES GOUTTELETTES

2.1. — Méthode.

Elle consiste à projeter sur la surface de très fines gouttelettes d'eau, d'une très faible énergie cinétique, obtenues par pulvérisation.

La terre est placée dans des tubes de 39 cm² de section inclinés à 45°, de manière à noter avec précision le début du ruissellement t_0 . L'extrémité inférieure du tube est en communication avec l'air.

L'intensité p de l'aspersion sur la colonne de terre est mesurée, en pesant le tube aussitôt le ruissellement apparu, ce qui nous donne la hauteur d'eau infiltrée I_0 .

Nous avons ainsi $p = \frac{I_0}{t_0}$, on a vérifié par ailleurs que p restait constant dans le temps. Nous avons utilisé les mêmes terres que précédemment.

2.2. — Hypothèse préalable.

Nous avons supposé qu'une intensité p d'aspersion inférieure à la vitesse d'infiltration initiale théorique ne modifiait pas la forme des profils hydriques obtenus dans les expériences précédentes, et qu'il existait la même relation, entre la hauteur d'eau infiltrée et la position du front d'humectation, que dans les cas de l'infiltration d'une lame d'eau libre.

Ceci admis, si nous reprenons la formule établie précédemment

$$I = a' \sqrt{t} + b'$$

On en déduit la vitesse d'infiltration

$$v = \frac{dI}{dt}$$

$$v = \frac{a'}{2\sqrt{t}}$$

Et en négligeant b' qui est ici pratiquement nul

$$v = \frac{a'^2}{2I}$$

Cette dernière expression ne préjuge pas de la relation entre I et t .

Nous avons supposé qu'elle reste valable dans les conditions de l'expérience.

Au moment du ruissellement, la vitesse d'infiltration est égale à l'intensité p de l'aspersion et $I = pt_0$.

On a donc :

$$p = \frac{a'^2}{2pt_0}$$

$$p\sqrt{t_0} = \frac{a'}{\sqrt{2}}$$

Autrement dit, si notre hypothèse est valable, on doit trouver, pour une terre donnée, un produit $p\sqrt{t_0}$ constant quel que soit p .

2.3. — Résultats.

Ils sont conformes aux prévisions, comme le montre le tableau I.

TABLEAU 1

Terre utilisée	p cm/mn	t_0 mn et s	$p \sqrt{t_0} = \frac{a'}{\sqrt{2}}$
Sable fin	0,33	27.18	1,86
	0,55	11.47	1,89
	1,66	1.10	1,79
Terre limono-argileuse	0,14	22.18	0,66
	0,33	3.00	0,67
	1	0.25	0,65
Fraction comprise entre 0,2 et 0,5 mm	0,34	9	1,02
	0,40	7.46	1,12
	0,52	4.42	1,13
	0,95	1.18	1,08

D'autre part, une fois le ruissellement commencé, la nature du sol devient le seul facteur limitant l'entrée de l'eau. Pour tenir compte de la première phase de l'infiltration où $\nu = p$, il suffit d'introduire un paramètre φ représentant un temps fictif tel que nous ayons :

$$I = A \sqrt{t - \varphi}$$

La condition à la limite impose :

$$I(t_0) = p t_0 = A \sqrt{t_0 - \varphi}$$

$$\text{avec } A = p \sqrt{2 t_0}.$$

ce qui donne :

$$\varphi = \frac{t_0}{2}$$

Nous avons prolongé l'aspersion après le ruissellement et suivi l'évolution de I en fonction du temps, par pesées successives des colonnes de terre. Les résultats sont en bon accord avec la relation

$$I = A \sqrt{t - t_0/2}$$

Pour mettre ceci en évidence, il suffit de porter sur un diagramme I^2 en fonction de t . On trouve une droite de pente K et qui coupe l'axe des t en t' . Il suffit alors de comparer $a'^2 = 2 p^2 t_0$ et K , t' et $\frac{t_0}{2}$ qui doivent être identiques.

TABLEAU 2

	p cm/mn	t' mn et s	$\frac{t_0}{2}$	K	a'^2
Sable fin	0,66	2.30	2.22	4,30	4,12
Fractions limono-argileuses	0,71	2.40	2.30	5,30	5,80
	0,495	6.30	6.25	6,40	6,25
	0,40	3.42	3.53	2,40	2,50

On tire immédiatement des relations précédentes la vitesse d'infiltration après le début du ruissellement :

$$v = \frac{a'}{2\sqrt{t - t_0/2}}$$

v dépend donc indirectement de l'intensité de l'aspersion, par l'intermédiaire de $t_0 = \frac{a'^2}{2p^2}$.

2.4. — Interprétation.

Ces résultats mettent encore ici l'accent sur l'influence de la pression de succion au niveau du front d'humectation. La vitesse d'infiltration reste une fonction de la profondeur humectée. Les profils hydriques évoluent encore suivant le schéma donné par BODMAN et COLMAN, montrant l'extension d'une « zone de transmission » à humidité constante, limitée par un front d'humectation commandant le phénomène.

Ceci va permettre d'interpréter un résultat qui peut paraître paradoxal.

Si nous procédons à une aspersion sur une colonne de sable surmontée d'une couche de 2 cm de limon, tout se passe pratiquement comme si la couche superficielle limoneuse n'intervient pas. En effet, le front d'humectation pénètre dans le limon, avec une vitesse constante liée à l'intensité p de l'aspersion (0,54 cm/mm ici). Il atteint la limite sable-limon sans que la vitesse théorique d'infiltration du limon s'abaisse jusqu'à p . Le front d'humectation progresse ensuite dans le sable et c'est au niveau du sable que la vitesse théorique d'infiltration continuant à diminuer atteint p . Finalement la couche la plus « imperméable » a été sans effet.

La très fine pluie utilisée est évidemment différente des pluies réelles, et il nous a paru nécessaire de répéter ces expériences avec des gouttes douées d'une énergie cinétique plus importante, capables de modifier la structure du sol.

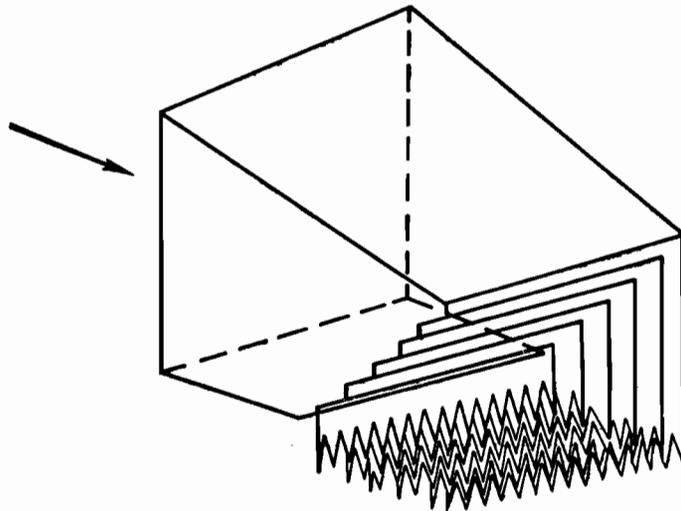


FIGURE 1.

Détail du simulateur de pluie.

III. — INFILTRATION ET RUISSELLEMENT OBTENUS SOUS UNE PLUIE SIMULÉE

3.1. — Méthode.

Le simulateur de pluie (fig. 1) utilisé ici est d'un type nouveau dont la qualité essentielle est la simplicité et la facilité de mise en œuvre. Grâce à de l'air comprimé, on envoie de l'eau pulvérisée sur des lames dentées à leur bord inférieur et placées en escalier, les unes derrière les autres. L'eau glisse sur les lames, s'accumule sur les pointes et tombe sous forme de gouttes. La variation de pression de l'air comprimé permet de modifier l'intensité de la pluie de 40 à 600 mm/heure. Les dents des lames sont telles que les gouttes ont environ 3 mm de diamètre. Leur énergie dépend de la hauteur de chute. Dans les expériences, nous avons adopté une hauteur de 1 mètre. L'énergie d'une goutte est alors voisine de l'énergie terminale d'une goutte de pluie de 2 mm de diamètre.

3.2. — Résultats.

Pour les sables, comme on pouvait l'attendre, les résultats sont identiques à ceux des expériences précédentes. Il n'y a pas de modifications de structure en surface et l'infiltration n'est pas modifiée.

Pour les fractions limono-argileuses, les résultats sont très différents. Nous avons groupé dans le tableau 3, le temps t_0 au bout duquel le ruissellement apparaît, en regard des intensités p utilisées, nous y avons porté également quelques valeurs t'_0 tirées des expériences précédentes d'aspersion de fines gouttelettes.

TABLEAU 3

Sol limono-argileux fraction comprise entre 0,2 et 0,5 mm.

p cm/mn	t_0 mn et s	t'_0 (mn s) aspersion fines gouttelettes
0,097	10.05	
0,14	6.36	62
0,18	4.45	
0,28	2.00	
0,42	1.10	6.51
0,48	0.54	
0,62	0.39	3.08
0,75	0.27	
0,84	0.23	1.43

Le produit $p\sqrt{t_0}$ n'est plus constant mais varie de 0,53 pour la plus forte valeur de p , à 0,31 pour les faibles valeurs de p . Pour la même terre, l'aspersion donnant $p\sqrt{t_0} \neq 1,1$.

D'autre part, si l'on maintient la pluie après le début du ruissellement, l'infiltration qui suit est également beaucoup plus faible que dans le cas de l'aspersion de fines gouttelettes. Après 20 minutes de pluie, I est de 1,7 cm au lieu de 6,7 cm pour l'aspersion. La quantité d'eau infiltrée ne varie guère pour les différentes intensités utilisées.

Ces résultats conduisent à supposer que ce n'est plus au niveau du front d'humectation, mais au niveau de la surface que s'exerce le « frein » à l'infiltration. Ils rejoignent des résultats obtenus sur des sols saturés par Mc INTYRE qui a mis en évidence la formation d'une fine couche

TABLEAU 4

p cm/mn	hauteur d'eau infiltrée après 20 minutes de pluie (cm).
0,097	1,55
0,14	2,10
0,45	1,50
0,54	1,65
0,88	1,70

de 0,1 mm d'épaisseur, abaissant la perméabilité et formée à la suite de pluie de 65 mm/heure.

Cette croûte surmonte une couche de 2,5 mm dont la porosité a été fortement réduite. AR BERTRAND et KAMIL SOR ont également mis en évidence des modifications de la couche 0, — 1,5 cm, maxima pour une pluie de 70 mm/heure, au bout de 30 minutes d'application. La couche 1,5-3 cm présentait aussi une compacité plus forte.

Pour mettre en évidence l'influence de la surface, nous avons fait deux expériences avec les sols suivants :

- 1° couche de 2 cm de limon sur du sable ;
- 2° couche de 2 cm de sable sur du limon.

L'expérience 1 donne les mêmes résultats qu'une colonne de limon, bien que le front d'humectation au moment du ruissellement ait largement pénétré dans le sable.

L'expérience 2 au contraire, donne des résultats à peu près identiques à ceux obtenus par aspersion de fines gouttelettes sur le limon.

TABLEAU 5

Expérience	p cm/mn	t_0 mn.s	$p \sqrt{t_0}$
1	0,47	0.53	0,44
	Hauteur d'eau infiltrée au bout de 15 mn : 1,7 cm		
2	0,47	4.34	1,03
	Hauteur d'eau infiltrée au bout de 20 mn : 5,3 cm		

Ces deux expériences traduisent l'influence déterminante de la tranche superficielle du sol sur l'infiltration des pluies à forte énergie cinétique, contrairement à ce qui a été observé dans le cas de l'aspersion de fines gouttelettes. Les processus de pénétration de l'eau sont donc très différents dans les deux cas.

Elles indiquent également qu'en protégeant la surface du sol, on peut améliorer la pénétration de l'eau.

La relation entre p et I au moment du ruissellement ne traduit plus ici l'influence de la pression de succion, mais la vitesse de pénétration de l'eau en surface en regard de la hauteur de pluie tombée.

La courbe $p = f(I)$ montre l'évolution de cette vitesse, le ruissellement se produit en effet quand la vitesse de pénétration de l'eau en surface atteint p . On voit que v décroît d'abord rapidement, puis diminue lentement en tendant vers 0. Les études de Mc INTYRE, KAMIL SOR et BERTRAND sur la perméabilité de la couche superficielle montrent que celle-ci évolue de la même façon.

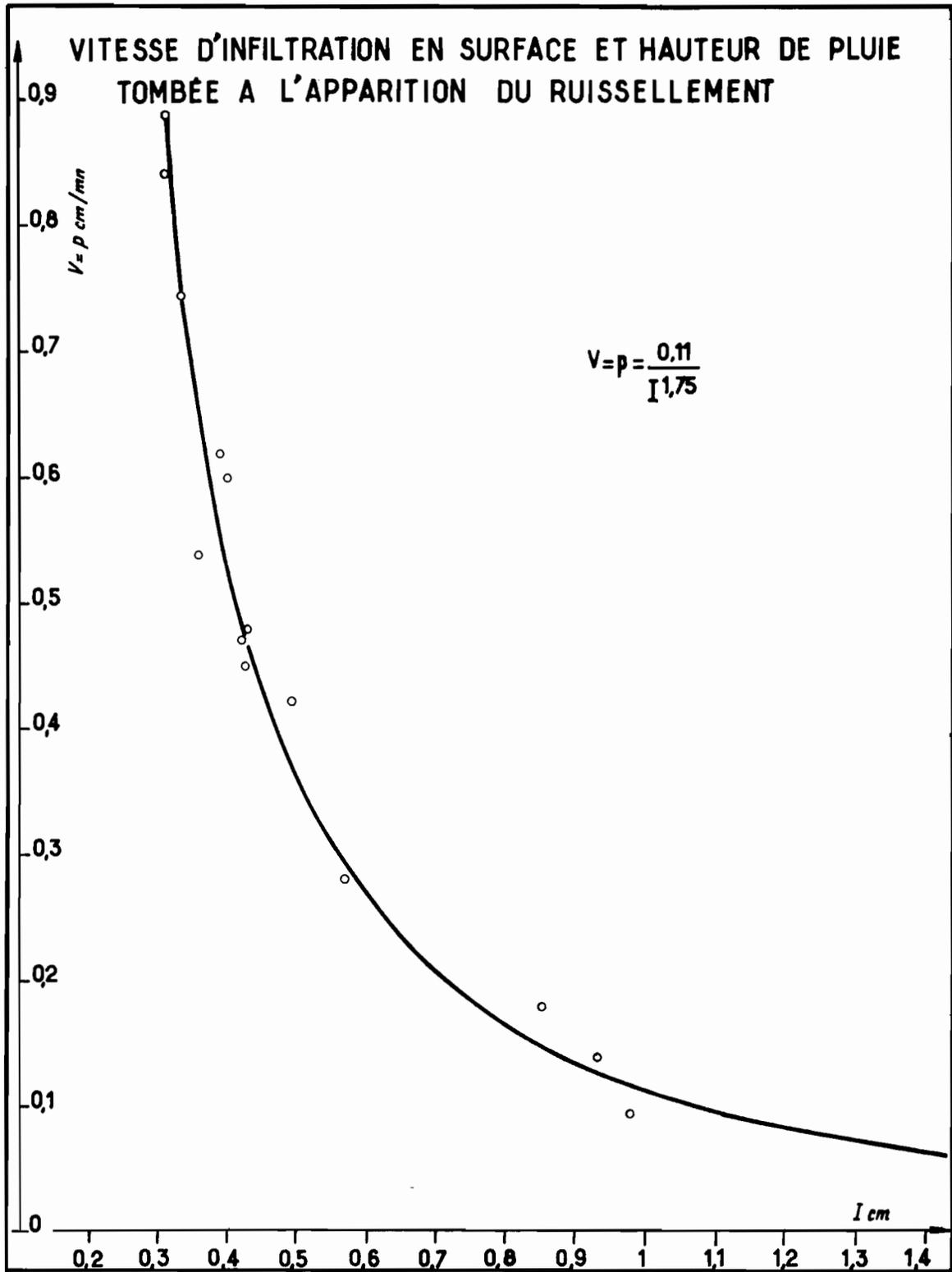


FIGURE 2.

IV. — ÉVOLUTION DE LA SURFACE DU SOL SOUS L'INFLUENCE DES ALTERNANCES D'HUMECTATION ET DE DESSICATION

Nous avons appliqué les techniques précédemment décrites pour évaluer l'effet des cycles humectation-dessication-humectation sur l'entrée de l'eau. La méthode consiste à arrêter l'aspersion au moment où le ruissellement apparaît sur la colonne de terre. Par la suite, on soumet cette colonne à une évaporation intense (ventilation + chauffage), pour la ramener à son poids initial et on recommence l'aspersion. On peut suivre ainsi la variation du produit $p \sqrt{t_0}$ qui nous donne l'ordre de grandeur de l'infiltration. Nous avons appliqué cette technique à 2 types de terre, en utilisant l'aspersion de fines gouttelettes et une pluie simulée de faible énergie cinétique pour ne pas faire intervenir la destruction de la structure sous le choc des gouttes.

Série d'expériences 1.

- Fraction limono-argileuse — agrégats compris entre 0,2 et 0,5 mm de diamètre.
- Pluie simulée — gouttes 3 mm de diamètre — hauteur de chute 25 cm ; intensité 0,85 cm/mn (510 mm/heure).

Série d'expériences 2.

- Sol limono-argileux.
- Pulvérisation de fines gouttelettes. Intensité 0,55 cm/mn (330 mm/heure). Entre les 2 premières aspersion (Exp. 1 et 3) une humectation était réalisée par les mêmes gouttes que dans la série d'expériences précédentes.

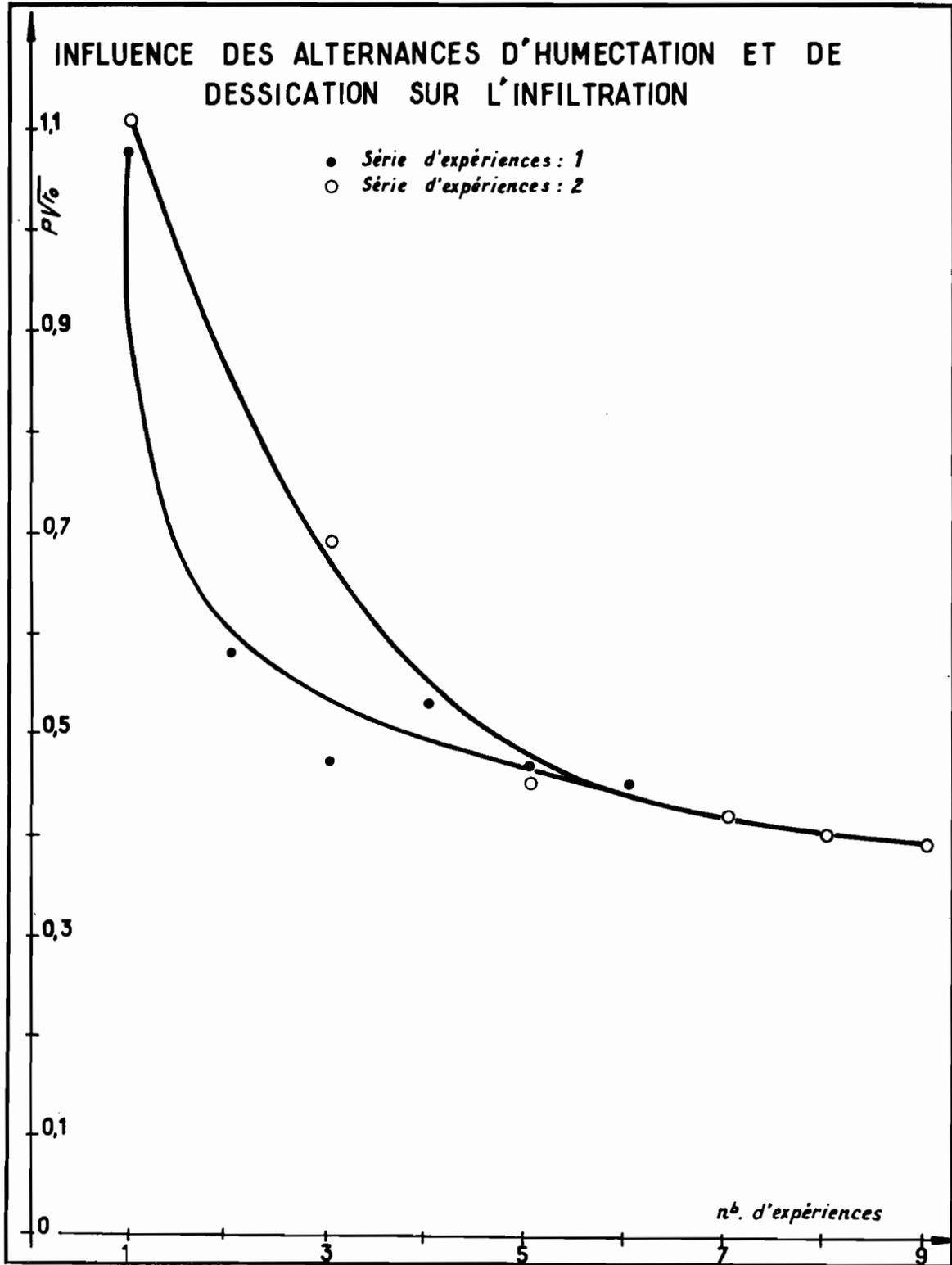
Les résultats sont les suivants : (Tableau 6).

1 ^{re} Série d'expériences		Pluie simulée
Exp. N ^o		$p \sqrt{t_0}$
1		1,08
2		0,58
3		0,47
4		0,53
5		0,47
6		0,45
2 ^e Série d'expériences		Aspersion
Exp. N ^o		
1		1,13
3		0,69
5		0,45
7		0,42
8		0,40
9		0,39

Les résultats sont reportés sur la figure 3.

Dans les 2 cas, on assiste à une diminution rapide de $p \sqrt{t_0}$ qui tend ensuite vers une valeur limite identique dans les 2 cas. Il y a donc eu modification de la structure en surface, affectant fortement la pénétration de l'eau. L'alternance des pluies et de la dessication du sol conduit donc à une dégradation superficielle du sol.

Ces résultats sont confirmés par de nombreuses observations sur le terrain, où des sols grattés en surface absorbent plus d'eau que la même terre encroûtée.



FIGURE_3.

Conclusion

Les résultats font apparaître l'importance de l'énergie cinétique de la pluie pour l'infiltration. D'une façon plus générale, on voit que les études traditionnelles sur l'infiltration qui concernent la pénétration d'une lame d'eau libre ne sont pas directement utilisables pour évaluer la pénétration des pluies. Celle-ci dépend à la fois du sol, et de la manière dont l'eau arrive sur le sol. C'est là un point important qui n'est pas toujours présent à l'esprit des hydrologues ou des agronomes.

Les résultats trouvés permettent de préciser quelques points, en ce qui concerne les sols « secs » :

1° Pour une pluie à faible énergie cinétique, la pénétration de l'eau est d'abord déterminée uniquement par la succion au niveau du front d'humectation. Il existe alors une bonne relation entre l'intensité de la pluie, l'apparition du ruissellement, et la hauteur d'eau infiltrée. Cette relation fait apparaître un paramètre lié au sol plus représentatif que le coefficient de DARCY valable en milieu saturé.

2° Pour les sols limono-argileux, l'alternance des humectations et des dessèchements entraîne cependant la formation d'une couche superficielle dégradée, qui réduit fortement la pénétration de l'eau.

3° Pour ces sols, les pluies à forte énergie cinétique modifient la couche superficielle, et c'est cette dernière qui limite la pénétration de l'eau. Une protection de la surface du sol (couche de sable, végétation) en supprimant ce processus peut améliorer considérablement l'infiltration.

Ces résultats trouvés dans le cadre du laboratoire ne sont pas directement utilisables pour des études hydrologiques qui sont d'une toute autre échelle. Ils rejoignent cependant les préoccupations de nombreux hydrologues qui étudient la capacité d'infiltration qui n'est autre que la vitesse v d'infiltration des expériences. D'autres hydrologues s'attachent à l'étude de la capacité d'absorption, et de la précipitation limite donnant lieu à un ruissellement (BOUCHARDEAU et RODIER). Enfin, des études localisées (petit bassin versant, parcelle d'expérimentation) se rapprochent des conditions du laboratoire. Les résultats obtenus pourraient alors permettre d'éclairer certains points. C'est là leur ambition.

BIBLIOGRAPHIE

- A. R. BERTRAND et KAMIL SOR. — The effects of rainfall intensity on soil structure and migration colloïd material in soils. *Soil Science Society of America proceedings*. Vol. 26, may, june 1962.
- G. B. BODMAN et E. A. COLMAN. — Moisture and energy conditions during downward entry of water into moist and layered soils. *Soil Science Society Americo Proc.* 9 (1944).
- A. BOUCHARDEAU et J. RODIER. — Nouvelle méthode de détermination de la capacité d'absorption en terrains perméables. S. H. F., n° 1, 1960.
- M. FEODOROFF. — Influence des propriétés structurales sur la pénétration de l'eau dans un sol sec. C. R. Académie d'Agriculture de France, n° 4, 1961.
- V. E. HANSEN. — Infiltration and soil water movement during irrigation. *Soil Science*, n° 79, 1955.
- KAMIL SOR et A. R. BERTRAND. — Effets of rainfall energy on the permeability of soils. *Soil Science Society of America Proc.* 26, n° 3, 1962.
- KIRKHAM et FENG. — Some tests of the diffusion theory and laws of capillary flow in soils. *Soils Science*, 67, 1949.
- A. N. KOSTIAKOV. — On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration. Trans. G. H. Comm. ISSS 5 Russian part A, 1932.
- J. LETEY, J. OSBORN et R. E. PELISHEK. — Measurement of liquid — solid contact angles in soil and sand. *Soil Science*, Vol. 93, n° 3, march 1962.
- D. S. MC INTYRE. — Soil splash and the formation of surface crusts by raindrop impact. *Soil Science*, Vol. 85, n° 4, april 1958.
- B. J. MASON. — The physics of clouds — Oxford monographs on meteorology.
- J. R. PHILIP. — Theory of infiltration. *Soil Science*, 83, 1957; 84, 1957.
- G. REMENIERAS. — L'hydrologie de l'ingénieur, Eyrolles, Paris.
- A. E. SCHEIDEGGER. — The physics of flow through porous media, 1957.
- D. SWARTZENDRUBER, D. M. F. DE BOODT et D. KIRKHAM. — Capillary intake rate of water and soil structure. *Soil Science Society America Proc.*, 18, 1954.
- J. VESSELING. — Principles of the insaturated flow and their application to the penetration of moisture into the soil. *Technical bulletin*, 23, 1961 wageningen.