

INFLUENCE DE LA TEMPERATURE
SUR LA PERMEABILITE DES SOLS

par Cl. MOUREAUX

C'est POISEUILLE qui, à notre connaissance, dès 1844, fit intervenir le facteur température dans le phénomène de perméabilité des sols.

Assimilant le comportement des liquides dans le sol à leur circulation dans des tubes capillaires, il le supposa conforme à la loi qui porte son nom :

$$Q = \frac{\pi P R^4 T}{8 \eta L}$$

Q volume écoulé

P pression

L longueur du tube

R rayon du tube

η viscosité

T temps

Dans cette formule, la température n'apparaît pas explicitement, mais par l'intermédiaire de la viscosité dont elle est une fonction décroissante. Cependant, cette loi n'a pas été retenue pour les mesures pratiques de perméabilités des sols dont la complexité interdit l'assimilation à des tubes capillaires continus. Différentes formules expérimentales ont été mises au point.

D'abord, celle de DARCY et RITTER en 1856, connue sous le nom de loi de DARCY, utilisable à la fois pour les mesures *in situ* et les mesures au laboratoire :

$$V = Ki$$

Elle exprime que la vitesse de percolation V est proportionnelle à la charge hydraulique i , K étant le coefficient de perméabilité.

PORCHET et LAFERRÈRE en 1938, ont mis au point d'autres formules pour les mesures de perméabilité de sols en place. Ces formules prennent en considération la vitesse de variation du plan d'eau, soit dans un puits, consécutivement à un prélèvement liquide, soit dans un trou de tarière où l'on a versé de l'eau ; aucune de ces techniques ne fait intervenir, dans les formules de calcul, le facteur température. Il faut donc supposer, soit que l'on opère à une température prise comme base, au laboratoire, soit que l'on se ramène à cette température par un facteur correctif.

P. KRYNINE dans « Soil mechanics » (1941) prend 20° comme base et écrit que la perméabilité est inversement proportionnelle à la viscosité :

$$K_{20^{\circ}} = K_{\theta} \times \frac{\eta_{\theta}}{\eta_{20^{\circ}}}$$

O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire

N° : 37266

Cote : B

~~MAD-50.5~~

Quelques mesures de perméabilité effectuées sur les mêmes sols à deux mois d'intervalle, alors que la température avait varié de quelque 6°, nous ont amené à nous demander si la variation de viscosité, phénomène purement physique, était vraiment reflétée d'une manière rigoureuse par le milieu complexe du sol.

Il faut souligner ici que les variations de viscosité de l'eau sont loin d'être négligeables quand la température varie, même dans les limites météorologiques; le climat tropical accuse des sautes de température qui rendent les oscillations de viscosité beaucoup plus sensibles encore.

Nous avons tenté de traduire par des chiffres les variations de perméabilité que nous avons observées selon la température.

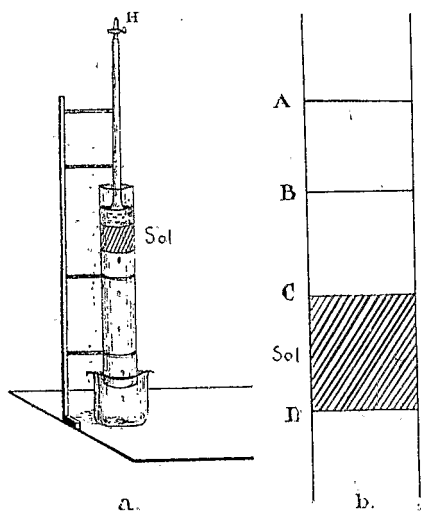


FIG. 1. — a) Appareil pour la mesure de perméabilité au laboratoire de pédologie de l'I. R. S. M. — b) Schéma du tube contenant le sol. On a mesuré les durées d'abaissement du liquide entre les repères A et B.

MATÉRIEL ET CONDITIONS D'EXPÉRIENCE.

Il consistait en un tube vertical de 8,04 cm² de section dans lequel on plaçait 40 g. de sol sur un tamis métallique (sol passé au tamis de 2 mm.). Nos mesures de perméabilité en série avaient été faites en opérant sous une charge d'eau constante (4/3) grâce à une pipette graduée retournée et fermée en haut (fig. 1 a).

Dans l'étude présente, pour faciliter les mesures de température et les manipulations, au lieu de mesurer l'abaissement de l'eau dans la burette pendant un temps donné, en opérant sous une charge d'eau constante, on a chronométré l'abaissement d'eau dans le tube lui-même entre deux repères

A et B. La charge hydraulique était alors variable entre les valeurs extrêmes $\frac{AD}{CD}$ et $\frac{BD}{CD}$ (fig. 1 b).

Nous avons rencontré quelques difficultés inhérentes au caractère sommaire de l'appareillage à notre disposition, qui ne pouvait nous permettre d'opérer à des températures stables différentes de la température ambiante.

Pour construire la courbe de la perméabilité en fonction de la température, il nous a fallu prendre comme valeur de la température, la moyenne des valeurs en début et en fin d'expérience.

A partir des durées d'abaissement du niveau liquide de A à B, il fallait passer au coefficient de perméabilité K de la loi de DARCY :

$$V = K i$$

V vitesse d'écoulement en cm/sec.

i charge hydraulique.

K coefficient de perméabilité.

Pour cela, on pouvait écrire de deux façons différentes la hauteur d'abaissement dans le tube pendant un intervalle de temps dT et les égaliser :

$$-dH = \frac{K H dT}{CD}$$

$\frac{H}{CD}$ étant la charge hydraulique, soit : $\frac{\text{Epaisseur sol} + \text{eau.}}{\text{Epaisseur sol}}$

d'où :

$$dT = -\frac{dH \cdot CD}{H K}$$

$$T = -\frac{CD}{K} L H$$

L'intégrale définie entre les instants 0 et t, H variant de AD à BD, est alors :

$$T = -\frac{CD}{K} L \frac{BD}{AD}$$

ou :

$$T = \frac{CD}{K} L \frac{AD}{BD}$$

et :

$$K = \frac{CD}{T} L \frac{AD}{BD}$$

$$K = \frac{CD}{T} \log_{(10)} \frac{AD}{BD} \times 2,30$$

Remarque :

En fait, il revenait presque au même pour faire les calculs, dans les conditions de l'expérience, de prendre comme charge hydraulique la moyenne :

$$i_m = \frac{AD + BD}{2 CD}$$

Il est indispensable d'attendre que le régime d'écoulement soit bien établi avant de commencer les mesures car la perméabilité est plus forte au début de la mise en eau du sol (parfois cependant après un certain temps de contact avec l'eau, selon la mouillabilité du sol).

Le coefficient de perméabilité est donc une fonction d'abord décroissante du temps d'immersion, puis il se fixe à une valeur sensiblement constante, tout au moins dans les limites de la durée de l'expérience.

L'allure de la courbe est souvent celle de la figure 2.

C'est dans l'intervalle de temps AB qu'il faut se placer.

De plus, il est nécessaire d'effectuer les mesures en allant des températures moins fortes aux plus fortes, car pour ces dernières il peut se produire une dégradation de la structure qui a pour effet de diminuer de façon irréversible, la perméabilité en dispersant les agrégats.

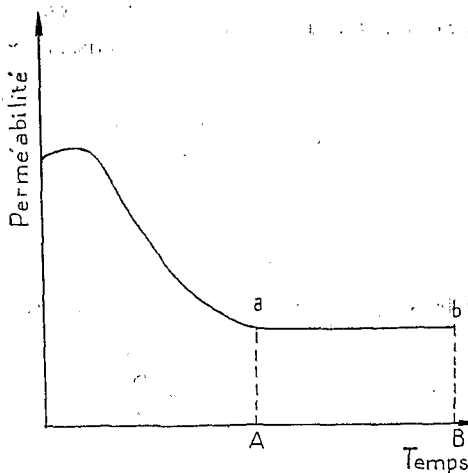


FIG. 2. — Allure de la variation du coefficient de perméabilité en fonction du temps

ECHANTILLONS DE SOL UTILISÉS :

Jusqu'à ce jour, les mesures n'ont porté que sur deux échantillons de sol, terres rouges du Sud-Ouest de Madagascar, B 17 b calcaire et B 59 a, surface décalcarifiée.

Leur composition granulométrique est la suivante (en pour cent) :

	Sable grossier	Sable fin	Limon	Argile
B 17 b..	64,72	25,44	1,79	5,96
B 59 a..	29,02	36,79	15,98	16,67

CARACTÉRISTIQUES CHIMIQUES (1) :

	B 17b	B 59a
CO ₂ Ca %..	5,77	traces
Matières organiques totales ‰..	5,17	12,17
N ‰..	0,86	0,84
C/N..	8,61	8,16
Humus ‰..	0,210	0,238
Capacité de saturation (meq. p. 100 g.)..	7,62	23,95
CaO échangeable ‰..	6,104	»
MgO échangeable ‰..	0,069	0,682
K ₂ O échangeable ‰..	0,044	0,359

VALEURS NUMÉRIQUES. RÉSULTATS ET GRAPHIQUES.

Pour l'échantillon B 17 b nous avons :

$$CD = 3,7 \text{ cm.}$$

$$AD = 9,9 \text{ cm.}$$

$$DB = 7,0 \text{ cm.}$$

Pour passer de la durée d'écoulement T en secondes au coefficient de perméabilité (exprimé en 10^{-4} cm/sec) le calcul précédent donnait la relation :

$$K = \frac{1,281}{T \text{ sec.}}$$

alors qu'en prenant la charge moyenne $i m$, on avait :

$$K = \frac{1,27}{T}$$

En regard des températures θ , le tableau I donne les durées de percolation, les valeurs mesurées de $K = K_m$, et les valeurs théoriques calculées de $K = K_c$, dans l'hypothèse d'une proportionalité inverse entre perméabilité et viscosité.

Pour pouvoir comparer les deux séries de valeurs, nous avons pris la base tout à fait arbitraire de 1292 et, de part et d'autre de ce point, avons noté la variation théorique de K .

(1) Analyses par MM. SÉGALEN et TERCINIER.

TABLEAU I POUR LE SOL B 17 b

d°C	Durée de percolation	Km 10 ⁻⁴ cm/sec.	Kc 10 ⁻⁴ cm/sec.
0	»	»	14,2
4	11 mn.	19,4	16,1
5	»	»	»
10	»	»	19,5
12,2	10 mn. 15 sec.	20,8	20,8
20	»	»	25,3
26	8 mn. 50 sec.	24,1	»
30	»	»	31,8
34	6 mn. 40 sec.	32,0	»
40	»	»	38,8
50	»	»	46,2
57	5 mn. 50 sec.	36,6	»
60	»	»	53,8
62	4 mn. 45 sec.	44,0	»
70	»	»	62,5
72,5	4 mn.	53,8	»

La figure 3 donne l'allure des variations de K_c et K_m avec la température.

Les deux courbes se coupent au point A d'abscisse 12°2 où nous avons pris arbitrairement $K_c = K_m$. On voit qu'au-dessus de ce point, K_m augmente moins vite que K_c , et en dessous, K_m diminue moins vite que K_c .

On observe donc une certaine inertie quant à la variation de perméabilité par rapport à la viscosité.

ESSAI D'ETUDE DES COURBES OBTENUES POUR LE SOL B 17 b.

La variation de la viscosité vis-à-vis de la température étant exponentielle, on doit s'attendre à ce que la variation de la perméabilité soit aussi de cette forme, soit :

$$K = b e^{\theta}$$

θ température en d°C

a et b constantes

Pour le vérifier, portons, sur le graphique de la figure 4, θ en abscisse, et, en ordonnée, les valeurs de $10 \log K$ résultant du tableau suivant :

TABLEAU II

θ	Kc	log Kc	θ	Km	log Km
0	14,2	1,1523	4	19,4	1,2878
10	19,5	1,2900	12,2	20,8	1,3181
12,2	20,8	1,3181			
20	25,3	1,4031	26	24,1	1,3820
30	31,8	1,5024	34	32,0	1,5051
40	38,8	1,5888	57	36,6	1,5635
50	46,2	1,6646	62	44,9	1,6522
60	53,8	1,7308	72,5	53,5	1,7267
70	62,5	1,7959			

Pour Kc , nous obtenons deux segments de droite le point anguleux se situant à 30° .

La courbe Kc sera donc représentée par l'équation :

$$Kc = b e^{t\theta}$$

mais avec un changement de valeur des coefficients à 30° .

Le calcul donne :

(1) de 0° à 30° :

$$Kc = 14,2 e^{0,02687 \theta}$$

(2) de 30° à 70° :

$$Kc = 19,16 e^{0,01689 \theta}$$

Pour Km nous constatons que les valeurs de $\log Km$ se groupent selon une droite (fig. 4) et le calcul donne pour la variation de Km l'équation suivante :

(3)

$$Km = 17,2 e^{0,0156 \theta}$$

Plus forte à 0° que la perméabilité théorique la perméabilité réelle augmente moins vite qu'elle, l'exposant de θ étant plus faible.

Les tableaux suivants donnent les valeurs réelles de Kc et Km en regard de celles qui découlent des équations (1), (2) et (3).

TABLEAU III

θ	Kc réelle	$Kc = 14,2 e^{0,02687 \theta}$	Kc réelle	$Kc = 19,16 e^{0,01689 \theta}$
0	14,2	14,2	30	31,8
10	19,5	18,6	40	38,8
20	25,3	24,3	50	46,2
30	31,8	31,8	60	53,8
			70	62,5

TABLEAU IV

SOL B 59 a.

θ	Km réelle	$Km = 17,20 e^{0,0156 \theta}$
4	19,4	18,3
12,2	20,8	20,8
26	24,1	25,8
34	32,0	29,2
57	36,6	41,8
62	44,9	45,2
72,5	53,3	53,3

Dans les mêmes conditions de mesures, nous avons obtenu les résultats suivants, en prenant la perméabilité à 60° comme base de calcul de la perméabilité théorique.

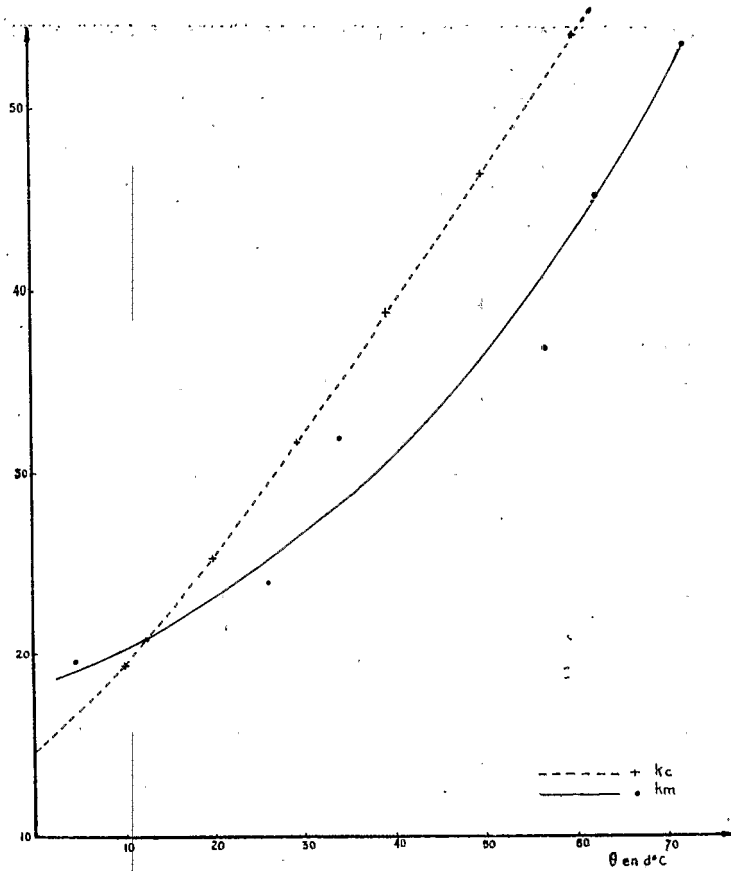


FIG. 3. — Variation de la perméabilité mesurée et de la perméabilité théorique (exprimées en 10^{-4} cm/sec.) en fonction de la température en $^{\circ}\text{C}$ pour le sol B 17b.

TABLEAU V POUR LE SOL B 59 a

	T	Km	log Km	Kc	log Kc
0		»	»	11,2	1,0492
0		»	»	13,7	1,1367
6,2	930	13,7	1,1367	13,7	1,1367
10		»	»	15,4	1,1875
17	835	15,3	1,1847	»	»
20		»	»	19,9	1,2989
24	690	18,5	1,2672	»	»
24,2	660	19,4	1,2878	»	»
30		»	»	25,1	1,3997
40		»	»	»	»
42,5	555	23,0	1,3617	»	»
49,5	565	22,6	1,3541	»	»
50		»	»	»	»
51	540	23,7	1,3748	»	»
58	625	20,4	1,3096	»	»

T durée de percolation en secondes.
 K_m coefficient de perméabilité mesurée en 10^{-4} cm/sec.
 K_c coefficient de perméabilité théorique en 10^{-4} cm/sec.

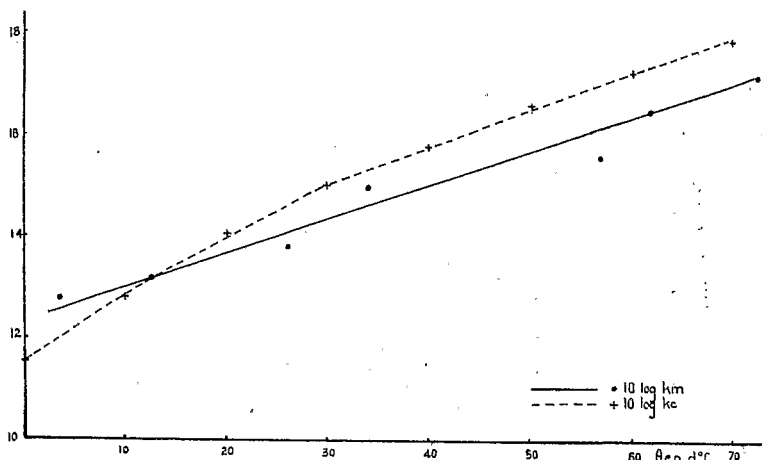


FIG. 4. — Graphique des valeurs de $10 \log K_m$ et $10 \log K_c$ en fonction de la température en $^{\circ}\text{C}$, pour le sol B 17b.

Le graphique de la figure 5 donne les variations comparées de K_c et K_m . Comme pour le sol B 17 b, on observe une certaine inertie dans la variation de la perméabilité mesurée en regard de la perméabilité théorique. Cependant un phénomène nouveau apparaît, la chute brusque de perméabilité au-dessus de 50° , due en toute vraisemblance à la démolition des agrégats terreux dont les débris colmatent les lacunes du sol.

Cette température, pour le sol B 59 a, est comparable à une température critique de la perméabilité.

Remarquons que le sol B 59 a est décalcarifié et doit posséder une structure moins stable que le sol B 17 b, calcaire pour lequel cette détérioration de la perméabilité n'était pas apparue.

Elle est irréversible, dans les limites de durée d'expérimentation au laboratoire tout au moins.

ESSAI D'ÉTUDE DES COURBES OBTENUES POUR LE SOL B 59 a.

Entre 6° et 30° , limites entre lesquelles les courbes K_c et K_m ne divergent pas trop, les valeurs de $\log K_c$ en fonction de θ se situent sur une droite (fig. 6). Toutes les valeurs de $\log K_m$ se groupent autour d'une deuxième droite de coefficient angulaire plus faible. Les courbes sont donc exponentielles et le calcul donne :

(4)
$$K_c = 11,94 e^{0,02542 \theta}$$

(5)
$$K_m = 12,70 e^{0,01223 \theta} \text{ (entre } 6^{\circ} \text{ et } 51^{\circ}\text{)}$$

Le tableau VI donne les valeurs réelles de K_c et K_m comparées à celles qui résultent des équations (4) et (5).

TABLEAU VI

θ	K_c réelle	$K_c = 11,94e0,02542\theta$	θ	K_m réelle	$K_m = 12,7030,01223 \theta$
6°2	13,7	13,7	6°2	13,7	13,7
10	15,4	15,4	17	15,3	15,6
20	19,9	19,8	24	18,5	17,0
30	25,1	25,5	24,2	19,4	17,1
			42,5	23,0	21,4
			49,5	22,6	23,3
			51	23,7	23,7

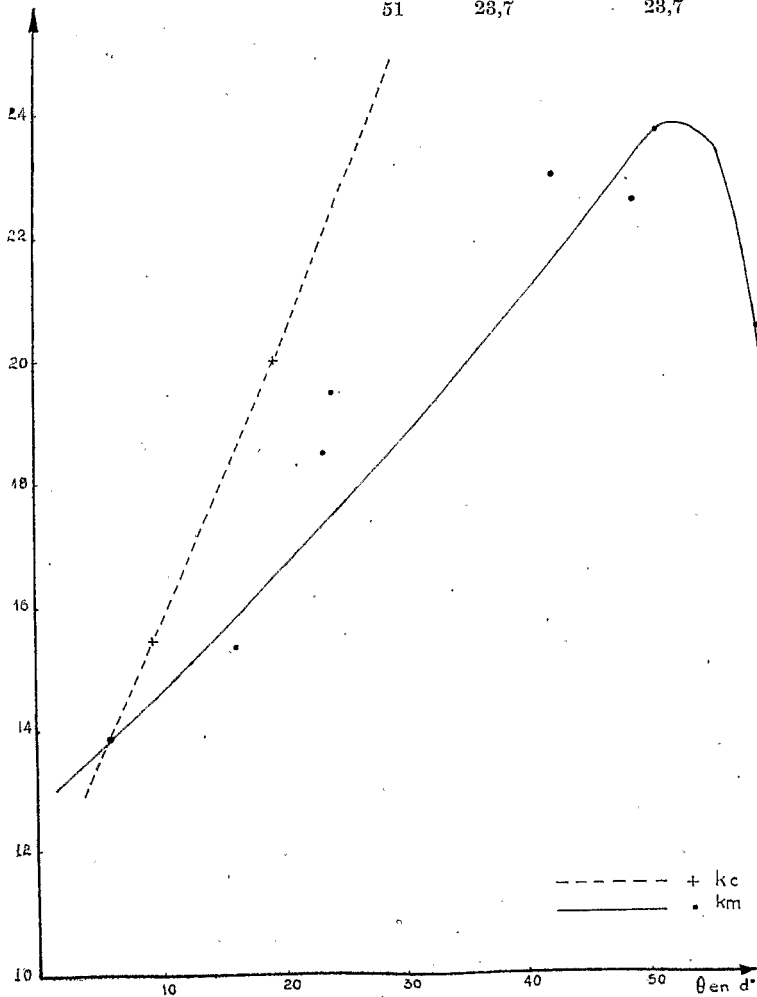


FIG. 5. — Variation de la perméabilité mesurée et de la perméabilité théorique en fonction de la température pour le sol B 59a.

RÉSUMÉ. — *Conclusions* : nous avons vu que P. KRYNINE admettait que la variation de perméabilité était inversement proportionnelle à la viscosité de l'eau. Nos mesures accusent très nettement, quand la température augmente, un accroissement de perméabilité freiné par rapport à la baisse de viscosité de l'eau. Comment expliquer cette divergence que nous avons traduit par des courbes ?

L'explication qui se présente la première à l'esprit est l'imbibition de l'argile ayant pour effet de rétrécir les espaces lacunaires du sol et dont le degré peut varier avec la température.

Il faut rapprocher ce résultat de ceux indiqués par A. DEMOLON dans « La Dynamique du Sol » (p. 195) ; GREEN et AMPY, travaillant sur des systèmes physiques perméables ont vérifié la relation :

$$\frac{P a \cdot \eta a}{P e \cdot \eta e} = 1$$

$P a$ perméabilité pour l'air.
 $P e$ — — — l'eau.

ηa viscosité de l'air.
 ηe — — — l'eau.

Or, A. DEMOLON déclare que dans le cas du sol ce rapport est toujours supérieur à l'unité. Ceci signifie que la valeur de $P e$ est anormalement basse et l'imbibition des argiles en serait la cause.

Nous croyons à l'intervention possible d'un facteur supplémentaire.

Il reste toujours plus ou moins de gaz emprisonné dans le sol, or, la viscosité des gaz augmente avec la température et il peut en résulter un passage relativement plus lent des molécules liquides.

On ne saurait enfin exclure le facteur colmatage progressif des pores du sol, même avant la chute brusque de perméabilité observée pour B 59 a au-dessus de 50°.

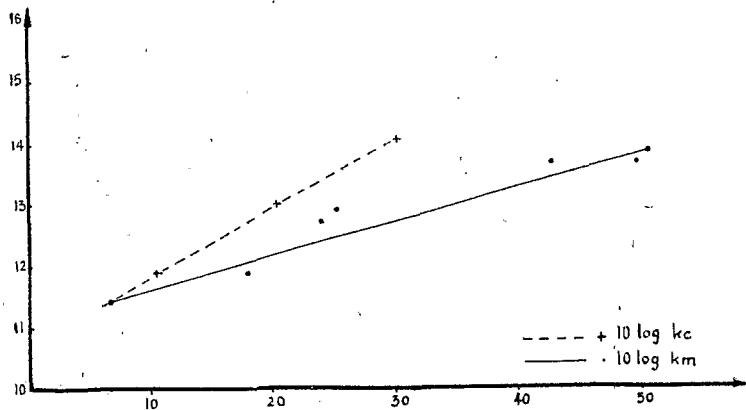


FIG. 6. — Graphique des valeurs de 10 log Km et 10 log Kc en fonction de la température, pour le sol B 59a.

En ce qui concerne les conséquences de ces faits dans le domaine pratique deux cas sont à envisager selon que le sol est couvert ou dénudé.

Pour les sols couverts de végétation sous forêt, par exemple, les pluies des pays tropicaux ayant des températures de l'ordre de 30° donnent lieu à un lessivage accru des bases. L'évolution vers le type de sol climatique (latéritique) s'en trouve accéléré. A ce sujet on ne peut sous-estimer le rôle important que joue la perméabilité dans la vitesse d'évolution climatique des sols. Une récente tournée dans la région de Majunga nous a fait voir des sols très peu évolués, calcaires, contrastant avec les sols rouges latéritiques qui forment le pédoclimax pour cette région. Ce caractère spécial résultait de la très faible perméabilité de ces sols marneux.

Si le sol perd sa couverture végétale, sa surface (généralement colorée) est portée à des températures élevées. Les précipitations arrivant en fin de journée après une insolation intense s'échauffent encore au contact du sol (le sol B 59 a prélevé à 18 h., en saison fraîche, après une journée pourtant peu ensoleillée, accusait une température de 33°).

Le sol lessivé de ses bases a une structure fragile et il est probable que la baisse brusque de perméabilité, observée *in vitro* pour le sol B 59 a, se produit dans la nature ; il en résulte un ruissellement intense et la formation d'une croûte terreuse compacte en surface.

L'érosion qui se produit alors rend très difficile la régénération ultérieure du sol par la reforestation.

Nous sommes en présence d'une série de causes concourant toutes à rendre les sols des pays tropicaux beaucoup plus fragiles que ceux de nos zones tempérées ; il s'ensuit que l'action irréfléchie de l'homme y a des conséquences beaucoup plus graves. Le maniement des sols tropicaux ne bénéficiant pas non plus de la longue expérience qui s'est attachée aux sols tempérés, on conçoit l'utilité de recherches agronomiques et pédologiques allant de pair avec la mise en valeur de territoires encore inexploités.

N. B. — Le petit nombre de mesures de perméabilité du sol à température variable dont nous disposons jusqu'à ce jour nous oblige à considérer ce travail comme un début à des recherches plus approfondies. Ces recherches nous seront facilitées par la construction en cours d'un perméamètre pouvant notamment permettre des mesures sur des cylindres de sol ayant conservé leur structure originelle.

BIBLIOGRAPHIE

- DEMOLON (A.), 1948. — Principes d'agronomie. Tome I. Dynamique du Sol. — 1 vol., 414 p., 4^e édition. Dunod, Paris.
- KRYNINE (Dimitri P.), 1947. — Soil mechanics. Its Principles and structural applications. — 1 vol, 2^e édition. New-York and London.