

RELATION ENTRE L'ÉRODIBILITÉ DES SOLS ET LEURS CARACTÉRISTIQUES ANALYTIQUES

par

J. DUMAS*

SOMMAIRE

- 1 - SITUATION DU PROBLÈME
- 2 - ASPECT THÉORIQUE DE L'ÉRODIBILITÉ DES SOLS
 - 2.1 - Mécanisme de l'érosion
 - 2.2 - Conclusion : les facteurs intervenant dans l'érosion
- 3 - ANALYSES
 - 3.1 - Choix des analyses
 - 3.1.1 - Représentativité
 - 3.1.2 - Précision (sensibilité et fidélité)
 - 3.1.3 - Influence du prélèvement
 - 3.1.4 - Conclusion
 - 3.2 - Caractéristiques des analyses
 - 3.2.1 - Détachabilité du sol
 - 3.2.2 - Capacité de ruissellement et de transport des éléments
 - 3.3 - Conclusion
- 4 - LIAISON ENTRE LE FACTEUR K ET LES CARACTÉRISTIQUES DU SOL
 - 4.1 - Résultats de la station mobile d'érosion
 - 4.2 - Comparaison aux résultats analytiques des sols
 - 4.2.1 - Méthode
 - 4.2.2 - Mise en évidence du facteur principal
 - 4.2.3 - Facteurs secondaires
 - 4.2.4 - Conclusion
 - 4.3 - Comparaison aux types pédogénétiques

* Ingénieur pédologue au Centre de recherche et d'expérimentation de Tunis, mission S.C.E.T.

1 - SITUATION DU PROBLÈME

Cette note fait partie de l'ensemble des recherches sur la conservation des eaux et du sol entreprises par le C.R.E.G.R. de Tunis. Le cadre de ces études a été défini dans une note C.G.R.-C.E.S. 08, juin 1963, Tunis, dont un résumé a été publié dans les Cahiers de l'O.R.S.T.O.M., série Pédologie, 1964, n° 3.

Rappelons que ces études sont basées sur l'utilisation en Tunisie de l'équation universelle de perte en terre de WISCHMEIER :

$$A = R (K. LS. C. P.)$$

dans laquelle :

- A représente la perte en terre en tonnes par acre ;
- R indice pluie, caractérise l'agressivité de la pluie ;
- K indice sol, facteur sans dimension, mesure la plus ou moins grande résistance relative d'un sol à l'érosion. Ses valeurs sont obtenues expérimentalement : c'est la perte de terre en tonnes par acre par unité de R, quand les autres coefficients du second terme de l'équation ont la valeur unité ;
- LS indice pente, facteur sans dimension, caractérise la pente et la longueur de pente ;
- C indice culture, facteur sans dimension, caractérise la culture. Ses valeurs sont obtenues expérimentalement : c'est le rapport des pertes de sol d'une terre cultivée dans des conditions bien définies, aux pertes de sol d'une jachère continuellement travaillée (C = 1), toutes les autres conditions étant égales par ailleurs ;
- P indice C.E.S., caractérise certaines pratiques de conservation des eaux et du sol.

Cette équation, mise au point aux U.S.A., grâce à un grand nombre de stations expérimentales fonctionnant depuis plusieurs dizaines d'années, a été adaptée pour la Tunisie à partir des nombreux résultats qu'a permis d'obtenir un simulateur de pluie (station mobile d'érosion). Elle a d'autre part été transposée dans le système métrique.

Dans les essais au simulateur de pluie, les facteurs R, LS, P étaient constants, et l'on ne faisait varier que C ou K. C'est ainsi que fut déterminée une gamme de valeur pour :

- les sols (facteur K), le facteur C étant constant (chaumes de blé) ;
- les façons culturales et couverts végétaux (facteur C) sur un même type de sol.

Cette note ne s'intéresse qu'au problème de K. Son but est d'exposer les résultats d'un travail de recherches, visant à relier les caractéristiques analytiques des sols aux valeurs K correspondantes, mesurées à la station mobile d'érosion. L'intérêt d'une telle relation est de permettre la détermination de K sans passer par l'intermédiaire du simulateur de pluie, coûteux et relativement lent.

Après avoir analysé les différents facteurs du sol susceptibles d'intervenir dans l'érodibilité (chapitre 2) et défini les analyses permettant de les caractériser (chapitre 3) nous indiquerons (chapitre 4) les résultats obtenus en ce qui concerne la comparaison entre les résultats de la station mobile (facteur K), et, soit les résultats d'analyses de sol, soit les types pédogénétiques.

2 - ASPECT THÉORIQUE DE L'ÉRODIBILITÉ DES SOLS

Le mécanisme de l'érosion envisagé ici est celui de l'érosion en nappe, et non celui intervenant sur l'ensemble d'un profil (glissement de terrain, éboulement des bords d'oued). Le deuxième type d'érosion est loin d'être négligeable en Tunisie, mais correspond à un mécanisme tout à fait différent qui implique une étude séparée.

2.1 - Mécanisme de l'érosion

Il peut se décomposer en deux phases :

- α - phénomène de détachement des éléments de terre, dont les plus fines particules entrent en suspension, détachement provoqué par l'effet de gouttes de pluie tombant sur le sol.
- β - transport de ces éléments par ruissellement.

Dans le phénomène de détachement, l'énergie de la pluie intervient pour détruire les éléments structuraux. Tous les autres facteurs étant identiques par ailleurs, cette désagrégation est d'autant plus rapide :

- que le sol est plus humide au début des pluies (influence de l'antécédent de pluie). Cet effet est négligeable ici, tous les essais ayant été faits à un taux d'humidité quasi identique ;
- que la structure du sol est plus instable ;
- que la surface du sol réellement attaquable est plus grande (intervention de la surface occupée par des cailloux).

Dans le transport des éléments, les parties les plus fines mises en suspension seront entraînées par ruissellement, et la quantité de terre transportée devrait théoriquement être fonction :

- du temps d'apparition du ruissellement ;
- du volume de celui-ci (augmentation de la charge hydraulique) ;
- de la granulométrie du sol.

Le ruissellement apparaît lorsque la vitesse d'apport de l'eau devient supérieure à la vitesse d'infiltration du sol. Celle-ci décroît d'autant plus vite que le sol a une structure plus instable (effet battance). La perméabilité couplée avec l'instabilité du sol interviendrait donc dans le phénomène d'érosion.

Enfin, la capacité de stockage de l'eau (terre à saturation) peut elle aussi intervenir quand elle devient facteur limitant avant la perméabilité. Ceci peut arriver en particulier dans le cas de sol sableux peu épais sur roche imperméable.

2.2 - Conclusion : les facteurs intervenant dans l'érosion

Les facteurs analytiques du sol susceptibles d'intervenir dans l'érosion peuvent être rassemblés dans une formule schématique telle que celle de BAVER

$$E = K \frac{D}{A P \beta S}$$

dans laquelle :

- E = érosion
- D = indice de dispersion
- A = capacité de stockage
- P = caractère de perméabilité
- β = taille des particules
- S = surface d'attaque du sol par la pluie.

C'est la recherche de méthodes d'analyses représentant ces caractéristiques qui fait l'objet du chapitre suivant.

3 - ANALYSES

3.1 - Choix des analyses

Une méthode est valable si elle est à la fois :

- représentative du phénomène à étudier ;
- sensible.

3.1.1 - REPRÉSENTATIVITÉ

On a le choix entre :

α - des modèles qui tendent à se rapprocher le plus possible du phénomène global. Par exemple ici : simulateur de pluie de laboratoire avec terre dans des bacs. Cette méthode est délicate surtout en ce qui concerne la mise en bacs de la terre qui, remaniée, ne correspond plus totalement au sol en place (pourcentage de cailloux en surface ; structure des mottes, ...). Les essais faits au Centre du Génie Rural avec un simulateur de pluie ayant des caractéristiques bien définies de pluviométrie, d'énergie et d'indice d'agressivité n'ont pas donné de résultats assez probants pour qu'on envisage de continuer pour l'instant dans cette voie.

β - des tests de laboratoire (analyses), ne représentant pas le phénomène global, mais qui mesurent théoriquement un ou plusieurs des facteurs intervenant dans le phénomène. L'utilisation de corrélations multiples permet d'associer les facteurs différemment mesurés et de calculer une relation globale.

3.1.2 - PRÉCISION (SENSIBILITÉ ET FIDÉLITÉ)

Il faut distinguer entre la fidélité et la sensibilité d'une méthode :

- la fidélité est l'aptitude à donner des résultats semblables pour un même échantillon ;
- la sensibilité est l'aptitude à donner des résultats bien distincts pour des échantillons différents.

Une méthode fidèle peut très bien n'être pas sensible si la variation des résultats entre échantillons différents est faible. C'est ainsi qu'à l'extrême, une méthode peut toujours donner le même résultat pour un même échantillon (méthode très fidèle), mais donner aussi des résultats identiques pour les autres sols (méthode totalement insensible).

Nous donnons ici le schéma du test utilisé pour la définition de la fidélité et de la sensibilité.

Fidélité : Afin de ne pas surcharger le nombre d'analyses, nous nous contentons de faire chaque mesure en double et estimons la variance de la moyenne de chaque couple de résultats par un test "bloc" classique, chaque sol correspondant au traitement et chaque répétition au bloc.

Si $a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2$, sont les chiffres obtenus pour chaque sol, le tableau des résultats se présente ainsi :

Répétition	Sol	1	2	k	n
1		a ₁	b ₁	k ₁	n ₁
2		a ₂	b ₂	k ₂	n ₂
	Moyenne	\bar{a}	\bar{b}	\bar{k}	\bar{n}

Analyse de la variance

Origine de la variation	Somme des carrés	DDL	Carré moyen
Entre sol	Q _S	k _s - 1	S _S ²
Entre répétition	Q _R	k _r - 1	S _R ²
Erreur	Q _E	k _e *	S _E ²
Total	Q _T	k _t *	S _T ²

Le test F n'étant généralement pas significatif pour la comparaison S_R^2/S_E^2 (répétitions au hasard), l'estimation de la variance de la moyenne de deux répétitions est :

$$\frac{S'E^2}{2} = \frac{Q_E + Q_R}{k_e - 1 + k_r - 1} \times \frac{1}{2}$$

Le coefficient de variation correspondant est :

$$c.v. = \frac{S'E}{\sqrt{2}} \times \frac{100}{a}$$

C'est un critère de fidélité de la méthode utilisée.

Sensibilité : Le critère choisi est S.

$$S = \frac{\sum \text{des trois moyennes les plus fortes} - \sum \text{des trois moyennes les plus faibles}}{3 \text{ p.p.d.s.}}$$

avec : p.p.d.s. = plus petite différence significative entre deux moyennes ;

$$\text{p.p.d.s.} = t(0,05, k_e) \times \sqrt{2 \times \frac{S'E^2}{k_r}}$$

t : est le nombre donné par les tables pour la probabilité 5% et le nombre de degrés de liberté de l'erreur.

S est déterminé à partir de trois moyennes au lieu d'une seule pour éviter l'influence d'une seule moyenne par hasard trop faible ou trop forte.

(*) $k_e = (k_s - 1)(k_n - 1)$
 $k_t = k_s + k_r - 1$

Pour caractériser la sensibilité de chaque analyse, on peut aussi tenir compte du seuil de probabilité de la significativité du test F.

3.1.3 - INFLUENCE DU PRÉLÈVEMENT SUR LA FIDÉLITÉ D'UNE MÉTHODE

Les tests précédents qui permettent de chiffrer la dispersion des mesures ne tiennent compte que de la variabilité introduite au niveau de l'analyse. Il convient aussi d'examiner si le nombre de prélèvements est suffisant pour que la variabilité possible à ce niveau n'augmente pas encore la dispersion entre échantillons différents.

En comparant pour chaque analyse la variabilité introduite, d'une part au niveau du prélèvement, d'autre part au niveau de l'analyse, on peut estimer si le nombre de prélèvements est suffisant.

Un exemple d'analyse permettant de déterminer si le nombre de prélèvements est suffisant est donné pour l'indice d'instabilité structurale (§ 3.2.1.2.)

3.1.4 - En définitive, les méthodes ont été caractérisées d'une part par un coefficient de fidélité (C V), d'autre part par un coefficient de sensibilité (indice S), et il a été vérifié, en outre, que le nombre de prélèvements était suffisant, compte-tenu de la dispersion introduite au niveau de l'analyse.

3.2 - Caractéristiques des analyses

3.2.1 - DÉTACHABILITÉ DU SOL

3.2.1.1 - Surface d'attaque de l'eau sur le sol : elle est basée sur la mesure du pourcentage de cailloux.

- **Mesure du pourcentage en surface :**

L'entraînement de la terre étant causé principalement par l'effet du choc des gouttes d'eau sur la terre, les cailloux, en protégeant une partie du sol, interviennent d'abord par leur surface de recouvrement. Les deux méthodes suivantes ont été étudiées afin de définir un coefficient "surface" :

- photographie d'une surface donnée du sol ;
- adaptation de la méthode Tricart de mesure des surfaces (fil de 4 m de long, tendu sur le sol, et comptage systématique du nombre de cailloux interceptés, de la longueur d'interception, et de la plus grande longueur des cailloux : cette méthode permet d'attribuer un coefficient "surface de cailloux" à chaque sol).

Les résultats de ces deux méthodes n'ont pas été concluants : la première présente des difficultés dans la reconnaissance des cailloux sur photos, la deuxième est longue, minutieuse et d'utilisation pratique difficile.

Nous nous sommes donc tenus à la définition d'un coefficient "poids" :

- **Mesure du pourcentage en poids :**

La méthode la plus simple est de racler toute la surface de l'essai avec un râteau, de recueillir ainsi la terre et les cailloux dans un tamis à maille de 0,5 cm et de peser la quantité de cailloux restant dans le tamis. La comparaison des résultats avec le pourcentage de cailloux de taille supérieure à 2 mm (tamisage normal) a été bonne.

Pratiquement, nous avons donc conservé la méthode suivante :

- faire 5 prélèvements de 500 g environ (cubes de terre de 10 x 10 cm sur une profondeur de 5 cm), ceci sur la surface de l'essai, soit 5 x 2,50 m en projection

- horizontale ;
 - mélange des 5 prélèvements ;
 - tamisage à maille ronde (2 mm).
- Précision :
- Dans ces conditions, on arrive aux résultats suivants :
 - coefficient de variation : 10 % ;
 - indice S \neq 4.

3.2.1.2 - Indice d'instabilité et de perméabilité

Méthodes : Ce sont celles décrites dans le "Profil Cultural" de S. HENIN (p. 119 et suivantes). Les prélèvements sont faits sur terre sèche, et le tamisage se fait uniquement sur mottes.

Pour l'indice d'instabilité, précisons que :

- la prise de terre est de 5 g ;
- la profondeur de plongée du tamis : 4 cm ;
- le tamisage se fait avec l'appareil de Feodoroff (1 coup par seconde pendant 30").

Précision :

Précision des résultats globaux

		Log 10 K	Log 10 I _S
Répétitions faites le même jour	S CV	1,96 15 %	9,3 3,15 %
Répétitions faites à des époques différentes	S CV	2,0 15 %	3,14 10 %

Précision de l'indice d'instabilité :

Pour des répétitions faites le même jour, cet indice est fidèle et sensible, mais la dispersion croît fortement si les répétitions sont faites à des époques différentes (1 mois dans le cas présent). Les variations ne sont d'ailleurs pas systématiques, ce qui laisse supposer qu'il ne s'agit pas seulement de l'influence du temps de séjour en laboratoire. Comme il n'est généralement pas possible de grouper toutes les analyses dans un laps de temps réduit, on doit tabler sur un coefficient de variation de 10% au moins, soit pour une valeur moyenne de 1, un intervalle de confiance de :

$$0,80 < x < 1,20 \quad (P = 0,05)$$

Pour la gamme des sols étudiés ici, la méthode est par suite peu sensible.

Précision de l'indice de perméabilité :

La dispersion n'est pas influencée par le temps, mais elle est forte (CV \neq 15%), soit pour une valeur moyenne de 1, un intervalle de confiance de :

$$0,70 < x < 1,30 \quad (P = 0,05)$$

Influence du mode de prélèvement :

Le mode de prélèvement est celui indiqué pour le pourcentage de cailloux. En faisant deux prélèvements par sol et deux analyses par prélèvement, on a obtenu les résultats suivants pour treize sols :

Tableau n° 1
Résultats de log 10 K et log 10 Is. Pour "analyse hiérarchique"

Echant.	Sacs	Log 10 Is				log 10 K			
		Répétition		Tij	Ti	1	2	Tij	Ti
1	2	1	2						
159	1	1,32	1,33	2,65	5,37	0,46	0,48	0,94	1,55
	2	1,40	1,32	2,72		0,30	0,31	0,61	
163	1	1,58	1,48	3,06	6,03	1,29	1,23	2,52	4,99
	2	1,49	1,48	2,97		1,27	1,20	2,47	
171	1	0,99	0,67	1,66	3,71	1,50	1,45	2,95	6,25
	2	1,04	1,01	2,05		1,64	1,66	3,30	
167	1	1,25	0,93	2,18	4,24	1,87	1,89	3,76	7,45
	2	1,38	0,68	2,06		1,85	1,84	3,69	
155	1	1,06	0,54	1,60	3,34	1,68	1,68	3,36	6,71
	2	1,12	0,62	1,74		1,68	1,67	3,35	
175	1	1,21	1,16	2,37	4,76	1,43	1,44	2,87	5,25
	2	1,21	1,18	2,89		1,17	1,21	2,38	
187	1	1,16	1,12	2,28	4,33	1,16	1,12	2,28	4,76
	2	1,07	0,98	2,05		1,27	1,21	2,48	
191	1	1,17	1,09	2,26	4,52	1,14	1,23	2,37	4,73
	2	1,18	1,08	2,26		1,17	1,19	2,36	
183	1	1,03	1,00	2,03	3,23	1,13	1,15	2,28	4,28
	2	0,24	0,96	1,20		1,03	0,97	2,00	
197	1	1,35	1,37	2,72	5,70	0,73	0,95	1,68	3,42
	2	1,47	1,51	2,98		0,73	1,01	1,74	
207	1	1,23	1,05	2,28	4,22	0,81	0,70	1,51	3,09
	2	1,02	0,92	1,94		0,89	0,69	1,58	
201	1	1,47	1,49	2,96	5,97	0,74	0,77	1,51	3,09
	2	1,54	1,47	3,01		0,70	0,88	1,58	
179	1	1,37	1,32	2,69	5,39	0,87	0,97	1,84	3,31
	2	1,42	1,28	2,70		1,30	1,17	1,47	

Analyse de la variance

Origine de la variation	log 10 K			log 10 Is		
	Somme des carrés	DDL	Carré moyen	Somme des carrés	DDL	Carré moyen
Entre sols	$S_i = \frac{\sum_i (T_i)^2}{4} - \frac{T^2}{52}$	12	0,6019	2,7264	12	0,2272
Entre prélèvements	$S_{j(i)} = \frac{\sum_{ij} (T_{ij})^2}{2} - \frac{\sum_i (T_i)^2}{4}$	13	0,0143	0,2818	13	0,0216
Entre répétitions d'un même prélèvement	$S_{ij} = \sum_{ij} \alpha (x_{ij})^2 - \frac{\sum_{ij} (T_{ij})^2}{52}$	26	0,0810	0,9267	26	0,0356
Total		51		3,9349	51	

$$\log 10 K : F = \frac{143}{810} \quad \text{non significatif (P = 0,05)}$$

$$\log 10 I_5 : F = \frac{216}{356} \quad \text{non significatif (P = 0,05)}$$

Par conséquent, la variabilité moyenne entre deux prélèvements d'un même sol est inférieure à celle de la manipulation au laboratoire. Le mode de prélèvement envisagé suffit donc.

Précision des éléments de la formule intervenant dans le calcul de $\log 10 I_5$:

L'indice d'instabilité intégrant de nombreux facteurs (granulométrie, influence de la matière organique, ...) une partie des éléments de la formule peut être en relation avec l'érosion. Il faut donc apprécier séparément la mesure de chaque élément.

Voici les résultats obtenus :

	$\sum (A + L)$		$\frac{\sum A_g}{3}$		A g benzène	
	Répétition à la même époque	Répétition après un mois	Répétition à la même époque	Répétition après un mois	Répétition à la même époque	Répétition après un mois
Coefficient de variation moyen	10 %	13 %	6,3 %	14 %	10 %	13 %
S	3,2		4,28		7,5	

Les trois analyses sont donc moins fidèles que le $\log 10 I_5$ pris globalement : il existerait ainsi une compensation entre les résultats. Le poids des agrégats obtenus après prétraitement au benzène, donne des résultats assez sensibles. Nous avons retenu cette analyse pour l'étude de l'érosion.

3.2.1.3 - Autres indices en relation avec la stabilité des sols

MIDDLETON a proposé un indice faisant intervenir deux coefficients :

- pourcentage de dispersion : DR
- pourcentage d'érosion : ER

Ces coefficients sont ainsi définis :

$$DR = \frac{(\text{argile} + \text{limon}) \text{ non dispersé}}{(\text{argile} + \text{limon}) \text{ dispersé}}$$

$$ER = \frac{DR}{\frac{\% \text{ de colloïdes}}{\text{humidité équivalente}}}$$

DR est en rapport avec la stabilité des agrégats : plus l'indice est fort, plus le sol est instable. Le rapport : $\% \text{ de colloïdes} / \text{humidité équivalente}$ est en relation avec la perméabilité du sol d'après MIDDLETON. D'après ANDERSON (Californie), ce rapport n'apporterait aucun élément supplémentaire et aurait même tendance à compenser les effets de DR.

	$\frac{(A + L) \text{ non dispersé}}{(A + L) \text{ dispersé}}$	$\frac{\text{Argile \%}}{\text{Humidité équivalente}}$	Humidité équivalente
Coefficient de variation	22 %	16 %	5 %
S	1,3	1,8	2

Par conséquent, seule, de ces analyses, l'humidité équivalente est "fidèle", mais la gamme des sols variant peu de ce point de vue, la sensibilité est médiocre.

Taux de matière organique :

La méthode de WALKLEY et BLACK, dite "Méthode à froid" est fidèle et sensible :

Coefficient de variation	6 %
S	11

Salure :

A l'exception d'un sol présentant une conductivité supérieure à 3 millimhos en surface, tous les autres sols ne sont pas salés. L'influence de la salure n'a donc pas été étudiée.

3.2.2 - CAPACITÉ DE RUISSELLEMENT DU SOL. TRANSPORT DES ÉLÉMENTS EN SUSPENSION

3.2.2.1 - Granulométrie

L'analyse granulométrique a été faite au laboratoire du Service Pédologique de Tunis. Les résultats ne sont pas suffisamment précis pour être utilisés dans notre travail, comme l'indique le tableau ci-après :

	Argile	Argile + Limon	Argile + Limon + Sable très fin
Coefficient de variation	15 %	8,4 %	4,5 %
S	2,9	2,7	5,2
Intervalle de confiance au seuil 0,05 pour une valeur \bar{x}	$24 < \bar{x} < 36$	$52 < \bar{x} < 58$	$54 < \bar{x} < 66$
\bar{x}	20	50	60

La précision est mauvaise pour ce genre d'analyse (notamment pour l'argile).

3.2.2.2 - Perméabilité des sols

Le coefficient de perméabilité des sols peut être défini :

- par le log 10 K de la méthode HENIN (mesure de laboratoire sur terre remaniée) ce cas a été envisagé plus haut ;
- par une méthode de mesure de la perméabilité en place (telle les méthodes de VERGIERES, de MUNTZ ou de PORCHET). A part des cas spéciaux de sol très homogène et léger, où la dispersion des résultats est généralement faible, ces méthodes ne permettent qu'un ordre de grandeur insuffisant pour ce genre d'étude ;
- par un coefficient de porosité (Macroporosité) défini comme suit :

$$\text{Macroporosité} = \frac{DR - DA}{DR} \times 100 - He \text{ Dap}$$

avec : DR = densité réelle du sol
DA = densité apparente
Dap = densité apparente partielle (= DA x % de terre fine)
He = humidité équivalente.

Le coefficient de variation de la mesure estimée à partir des éléments de la formule est de 10 %.

En fait, la densité réelle étant peu variable en fonction des sols, la densité apparente étant, de plus, difficilement mesurable sur les échantillons de surface, on finit par obtenir un critère très peu sensible qui dépend en grande partie de l'humidité équivalente et du pourcentage de terre fine.

En définitive, la perméabilité a été estimée par le log 10 K.

3.2.2.3 - Autres analyses : limites d'Atterberg

	limites de plasticité	limites de liquidité
CV	5,5 %	2,4 %
S	1,6	5

Ces méthodes sont fidèles mais peu sensibles ou moyennement sensibles (la deuxième).

3.3 - Conclusion

Les détails donnés sur les analyses envisagées ici tendent à montrer en définitive :

- que dans la recherche d'une méthode, le souci d'une trop grande représentativité ne doit pas aller à l'encontre de la précision. C'est ce qui nous a éloigné des "modèles" (simulateur de pluie, gouttes calibrées tombant sur mottes elles aussi calibrées) dont les résultats sont difficilement reproductibles ;

- que dans le domaine de la précision des méthodes, un critère de fidélité (reproductibilité des résultats) n'est pas suffisant pour juger d'une analyse. On peut, par exemple, améliorer apparemment certaines formules en introduisant des éléments de compensation qui diminuent la dispersion des résultats sur un échantillon. Si, en même temps, la variation entre échantillons différents diminue, l'amélioration est illusoire. Seul un critère de sensibilité (tenant compte de ces deux variations) permet de juger de la valeur réelle d'une analyse.

Enfin, il ne faut pas oublier que la fidélité d'une méthode doit tenir compte de la variabilité introduite au niveau du prélèvement et qu'il y a lieu d'ajuster le nombre de ceux-ci en rapport avec celle-là. L'analyse "hiérarchique" indiquée précédemment, faite pour toutes les analyses, a montré que le nombre de prélèvements envisagés ici était suffisant.

4 - LIAISON ENTRE LE FACTEUR K ET LES CARACTÉRISTIQUES DES SOLS

4.1 - Résultats de la station mobile d'érosion

La gamme des différents sols a été définie en fonction de la classification française de l'étude des sols. Dans ce cadre, le tableau n° 2 suivant indique comment se sont distribués les résultats de la station mobile (facteur K).

La gamme de ceux-ci est la suivante :

	$K \leq 0,05$	sol très peu érodible
0,05 <	$K \leq 0,1$	sol faiblement érodible
0,1 <	$K \leq 0,2$	sol moyennement érodible
0,2 <	$K \leq 0,4$	sol fortement érodible
0,4 <	$K \leq 0,6$	sol très fortement érodible

Tableau n° 2
Type de sol et coefficient d'érodibilité

Sols peu ou non évolués d'érosion	Sols peu évolués				Sols calcimorphes	facteur K
	Sol peu évolué d'apport colluvial d'ancien sol rouge	Sol peu évolué d'apport colluvial d'ancien sol B calcaire	Alluvions	Apport éolien		
Sol calcaire dur sur calcaire marneux moyennement dur conchoïdal.	Colluvion rouge calcaire de 50 à 100 cm ou plus ; très caillouteuse. 25 % de cailloux au moins.	Colluvion de sols divers très caillouteux ; 25 % de cailloux au moins.			Rendzine ou sol rendziforme sur croûte (P > 15 cm) Sol brun calcaire très érodé caillouteux, ou moyennement érodé très caillouteux.	< 0,05
	Colluvion profonde avec ou sans tendance verticale.			Lunette (marine) argileuse dessalée.	Sol brun calcaire très érodé sur limon calcaire sur calcaire blanc.	< 0,1
Sur marne feuilletée tendre.	Colluvion peu épaisse mélangée à un limon calcaire sous-jacent (texture sableuse ou équilibrée). Colluvion rubéfiée sableuse.			Lunette argileuse dessalée.	Sol brun calcaire sur calcaire marneux. Sol brun calcaire sur limon calcaire. Sol brun calcaire sur marne ou calcaire marneux tendre.	< 0,2
Sur limon calcaire.			Alluvion argilo-limoneuse (terrasse quaternaire).		Sol brun calcaire sur marno-calcaire avec passages calcaires. Sol brun calcaire sur cailloux roulés de l'éocène sur marne gypseuse.	< 0,3
Sur limon calcaire très poudreux.		de sol brun calcaire mélangé à limon calcaire peu épais.			Sol brun calcaire hydromorphe sur marne gypseuse 3 mill. < cd < 4 millimhos.	< 0,5
				Lunette salée 4 > cd > 3 mill.		< 0,6

4.2 - Comparaison aux résultats analytiques des sols

4.2.1 - MÉTHODE

Lorsqu'il s'agit de relier un facteur A (ici facteur K) à un assez grand nombre d'autres facteurs B, C, .. etc (ici résultats d'analyses) on utilise généralement la corrélation multiple. Pour sélectionner les facteurs intéressants, on commence par des corrélations simples reliant A à chaque facteur B, C, .. etc, ce qui permet de mettre en évidence l'effet d'un ou plusieurs facteurs principaux ; l'effet des autres est, ou nul, ou caché par l'action prédominante du ou des premiers. Il faut ensuite passer à des corrélations doubles puis triples, etc., et essayer toutes les combinaisons si l'on veut ne pas courir le risque d'éliminer arbitrairement certains facteurs secondaires.

Sans moyens spéciaux (type calculatrice I.B.M.) cette méthode est longue et il est préférable alors de procéder comme suit :

- corrélations simples séparées entre K et les résultats d'une analyse : % de cailloux, log 10 I_S ... etc ;
- on garde la corrélation la plus étroite : ici entre K et le pourcentage de cailloux (les autres analyses ne donnant pas de corrélations significatives) ;
- on calcule pour cette corrélation les valeurs K' en fonction de chaque valeur de l'analyse : les valeurs K' sont situées sur la droite de régression.

La différence $Z = K - K'$ entre valeurs observées et calculées intègre d'une part l'influence des autres facteurs, d'autre part l'erreur aléatoire.

Les différences Z sont mises en corrélation simple avec les résultats de chaque méthode d'analyse. Ainsi, par approximation successive, on met en évidence les principaux facteurs dignes d'être retenus pour la corrélation multiple.

4.2.2 - MISE EN ÉVIDENCE DU FACTEUR PRINCIPAL : % DE CAILLOUX EN SURFACE

Le graphique n° 1 indique la relation obtenue entre le % de cailloux et le facteur K

Vu la forme de la courbe, un ajustement linéaire peut être envisagé en utilisant le logarithme de K (ou de 1000 K pour faciliter les calculs) (graphique n° 2).

$$\log 1000 K = 2,5860 - 0,0294 X 1$$

X 1 représentant le pourcentage de cailloux en surface.

r = 0,83 pour 30 points (à P = 0,05)

Par conséquent, près de 70 % ($r^2 = 0,69$) de la variance de log 1000 K est dû à la variance du pourcentage de cailloux.

Précision de la mesure

L'écart-type d'une valeur quelconque y' , estimée à partir de la corrélation est :

$$S_{y'} = \sqrt{S_M^2 + (S_b \cdot x)^2}$$

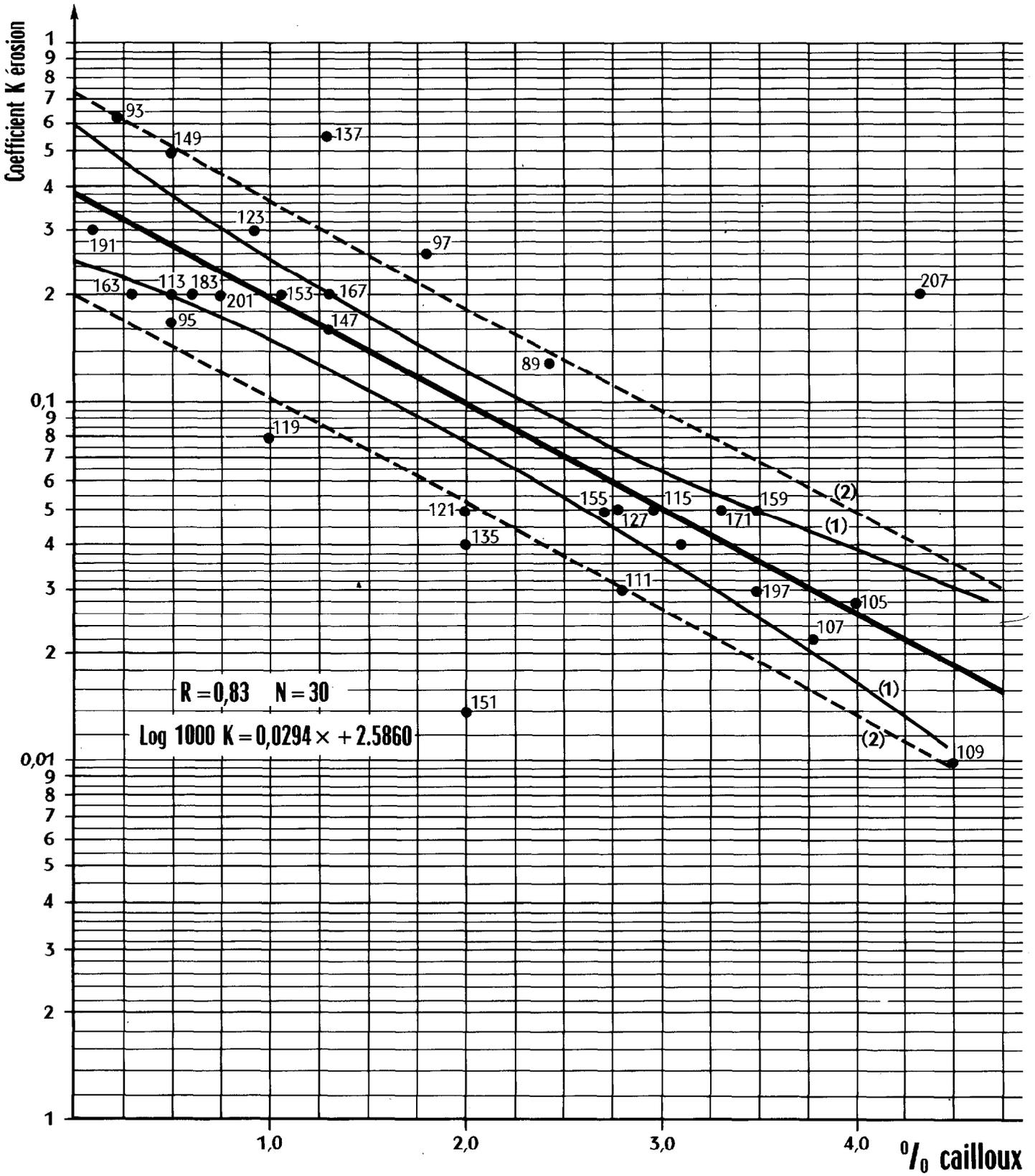
où :

S_M = écart type de la moyenne

S_b = écart type du coefficient angulaire

x = différence entre l'abscisse du point et l'abscisse de la moyenne.

Relation log 1000 K - % cailloux



Graphique n° 2

Sur le graphique n° 2, nous avons tracé l'enveloppe (1) de ces intervalles de confiance (à $P = 0,05$). Elle indique avec quelle précision une valeur de $\log 1000 K$ est donnée par la corrélation.

Plus importante est la connaissance de la précision à laquelle on peut s'attendre lorsque l'on veut prévoir, à partir d'un pourcentage de cailloux connu, la valeur correspondante du facteur K . A l'écart type précédent, s'ajoute alors l'écart type résiduel, dû aux fluctuations des valeurs réelles autour de la droite de régression (écart type de l'estimation). L'enveloppe (2) limite ces intervalles de confiance à $P = 0,33$. Il y a, par exemple, deux chances sur trois pour qu'un sol ayant un pourcentage de cailloux de :

- 10 % ait une valeur K comprise entre 0,10 et 0,4
- 20 % ait une valeur K comprise entre 0,05 et 0,18
- 30 % ait une valeur K comprise entre 0,03 et 0,09.

La précision est d'autant plus faible que le pourcentage de cailloux est faible (influence de l'utilisation du logarithme).

4.2.3 - FACTEURS SECONDAIRES

En corrélation simple, seul l'"effet cailloux" est mis en évidence. Une fois éliminée son influence (résultats ramenés à un pourcentage de cailloux constant) nous obtenons les résultats suivants (la grandeur Z définie au § 4.2.1 étant ici : $\log 1000 K + 0,0294 X_1$) :

- **matière organique** : corrélation significative à $P = 0,05$

$$Z = 2,926 - 0,176 X_2$$

avec X_2 = pourcentage de matière organique

$$r = 0,62 \text{ pour } 30 \text{ points.}$$

- **stabilité structurale** :

- **log 10 I_s** : la corrélation n'est pas significative ;

- il existe une corrélation tout juste significative avec le pourcentage d'agrégats après prétraitement au benzène. Les deux facteurs, matière organique et "agrégats benzène" étant liés, il n'y a pas intérêt à faire intervenir les deux analyses en même temps dans la corrélation (difficultés d'interprétation ultérieure). Seul le taux de matière organique a donc été conservé.

- **humidité équivalente** : la corrélation est significative

$$Z = 3,4745 - 0,0329 X_3$$

avec X_3 = humidité équivalente.

- les autres analyses ne donnent aucune corrélation, même après élimination de l'influence de l'humidité équivalente et de la matière organique.

4.2.4 - CONCLUSION

4.2.4.1 - Formules reliant K aux résultats d'analyse

Le coefficient d'érodibilité peut être relié aux trois variables suivantes :

- % de cailloux en surface ;
- % de matière organique ;
- % humidité relative.

Constatons que, d'une part ces trois facteurs sont indépendants, d'autre part leur ajustement est linéaire (en fait pour la matière organique un ajustement curvilinéaire était possible, mais l'amélioration de la corrélation se révèle minime).

Le calcul des différentes corrélations donne les résultats suivants :

- (1) $\log 1000 K = 3,4623 - 0,1695 X_2 - 0,0214 X_3 - 0,0282 X_1$ $R = 0,94$
 $R^2 = 0,88$
- (2) $\log 1000 K = 2,9263 - 0,1936 X_2 - 0,02712 X_1$ $R = 0,91 ; R_2 = 0,82$
- (3) $\log 1000 K = 3,1886 - 0,0217 X_3 - 0,0299 X_1$ $R = 0,92 ; R_2 = 0,84$
- (4) $\log 1000 K = 2,5860 - 0,0294 X_1$ $R = 0,83 ; R_2 = 0,69$
- (5) $\log 1000 K = 2,6554 - 0,0083 X_3 - 0,2597 X_2$ $R = 0,51$

avec : $X_1 = \% \text{ de cailloux}$
 $X_2 = \text{taux de matière organique } \%$
 $X_3 = \text{humidité équivalente } \%$.

Nous avons vu que, pour la corrélation simple ($\log 1000 K / \text{cailloux}$), 30 % de la variance (résiduelle) restait inexpliquée. Par la corrélation triple, on passe à 12 % seulement.

4.2.4.2 - Importance des facteurs

L'influence de chaque facteur peut, d'autre part, être mise en évidence en calculant les coefficients de corrélation partielle. Le carré de ces coefficients indique de combien est réduite la variance résiduelle restée inexpliquée par les autres facteurs. Il permet donc de juger de l'importance de chaque variable quand l'influence des autres est prise en considération.

Facteurs toujours considérés		Facteur ajouté	(coefficients partiels) ²
Cailloux	m.o.	He	0,33
m.o.	He	Cailloux	0,84
He	Cailloux	m.o.	0,52

Ainsi, l'introduction dans la corrélation " $\log 1000 K = f(\text{m.o. et cailloux})$ " de l'humidité équivalente permet de réduire la variance résiduelle de 33 %.

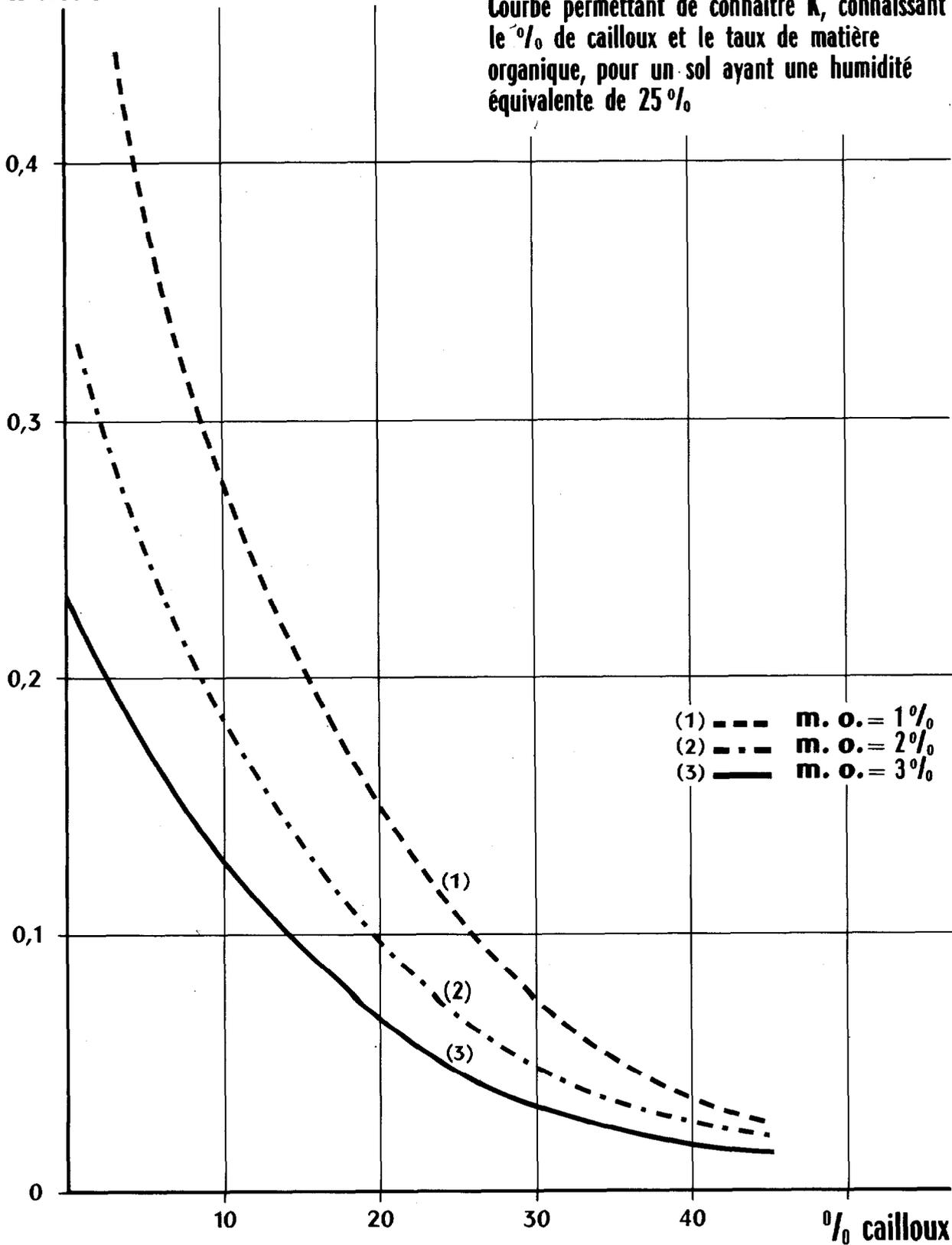
En définitive, par la corrélation triple, 88 % des variations de $\log 1000 K$ sont dûs aux trois facteurs suivants :

- % de cailloux, intervenant pour 50 % de la corrélation ;
- taux de matière organique, intervenant pour 30 % ;
- humidité équivalente, intervenant pour 20 %.

Les abaques suivants, construits pour un certain nombre de cas les plus courants à partir de la corrélation triple, permettent de mesurer K connaissant le résultat de ces trois analyses.

K érosion

Courbe permettant de connaître K, connaissant le % de cailloux et le taux de matière organique, pour un sol ayant une humidité équivalente de 25 %

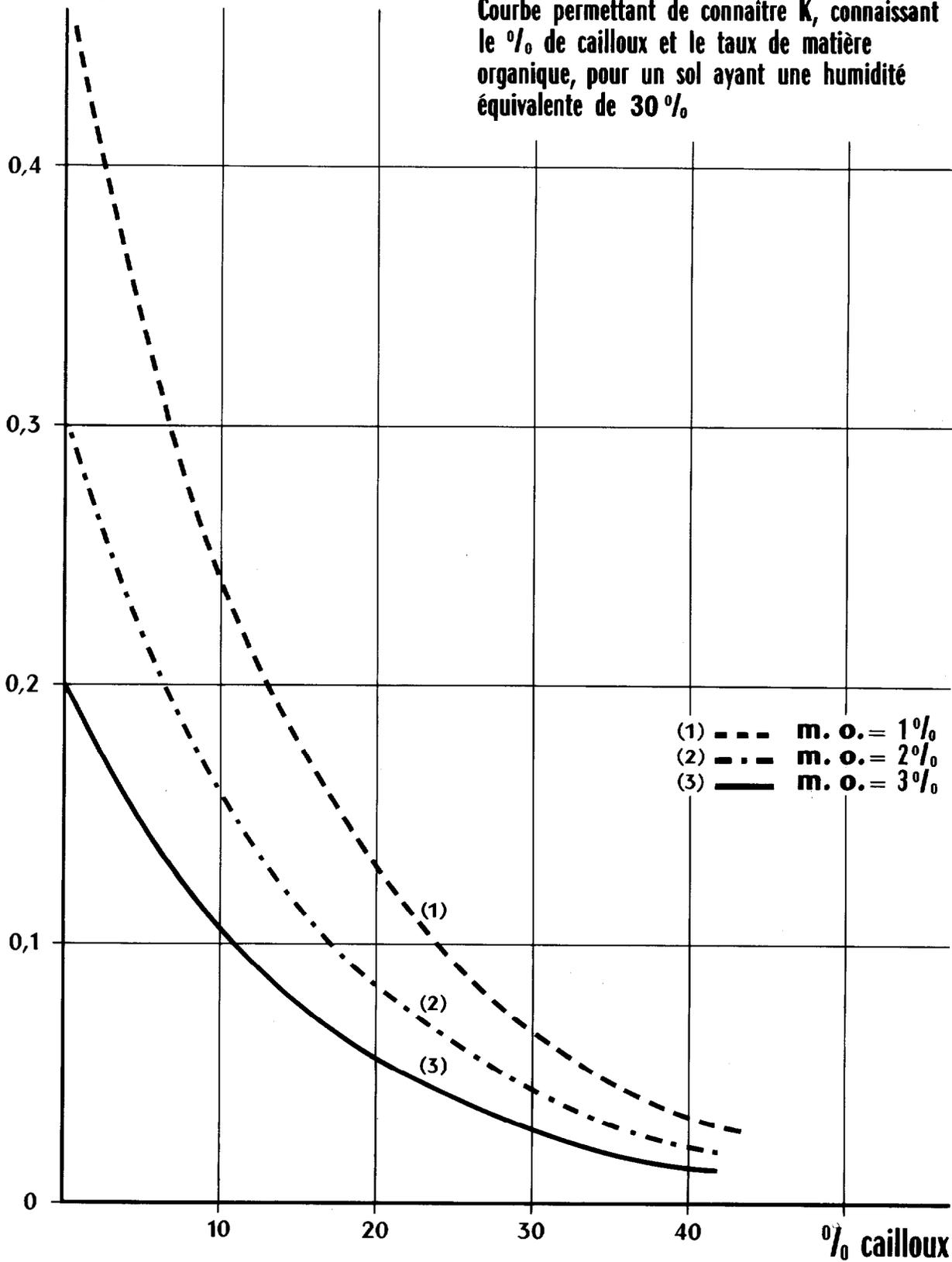


- (1) - - - m. o. = 1%
- (2) - . - m. o. = 2%
- (3) ——— m. o. = 3%

Abaque n° 1

K érosion

Courbe permettant de connaître K, connaissant le % de cailloux et le taux de matière organique, pour un sol ayant une humidité équivalente de 30 %

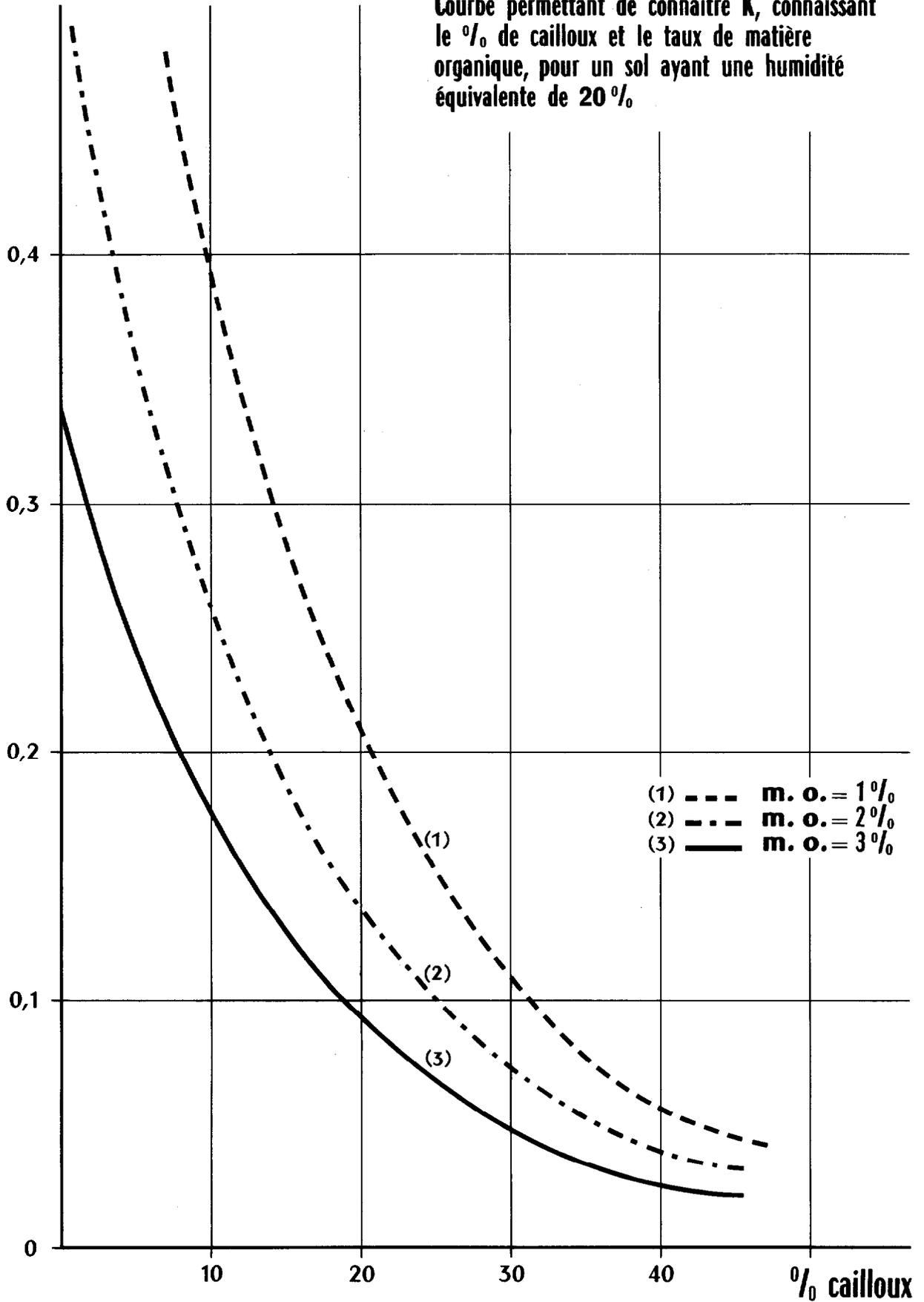


- (1) - - - m. o. = 1%
- (2) - . - m. o. = 2%
- (3) ——— m. o. = 3%

Abaque n°2

K érosion

Courbe permettant de connaître K, connaissant le % de cailloux et le taux de matière organique, pour un sol ayant une humidité équivalente de 20 %



- (1) --- m. o. = 1%
- (2) -.- m. o. = 2%
- (3) — m. o. = 3%

4.2.4.3 - Précision de la corrélation

De même que pour la corrélation simple, on peut déterminer l'intervalle de confiance d'une valeur prévisionnelle K d'un sol dont on connaît le taux de matière organique, le pourcentage de cailloux et l'humidité équivalente.

L'équation de la variance est :

$$= 29184 \left[1,333 + 0,000978 (x_2)^2 + 0,00208 (x_3)^2 + 0,000204 (x_1)^2 + 0,00215 x_3 x_1 - 0,000996 x_2 x_3 - 0,00120 x_2 x_1 \right]$$

avec :

x_i = différence entre l'abscisse de la moyenne et l'abscisse du point considéré pour chaque facteur

Cette variance permet de calculer, pour une probabilité choisie, l'intervalle de confiance d'une valeur K pour un sol, connaissant He, m.o. et le pourcentage de cailloux.

Exemple : sur le graphique de la page suivante, nous avons porté l'intervalle de confiance pour un cas particulier : (m.o. = 2 % ; He = 25 %). La comparaison avec le graphique 2 (corrélation simple : $K = f$ (% de cailloux)) permet de voir de combien la précision a été améliorée. Ainsi, pour un pourcentage de 20 % de cailloux, l'intervalle de confiance a été réduit de un tiers.

Pratiquement, ces intervalles de confiance montrent que la précision de la corrélation n'est bonne que pour une valeur du pourcentage de cailloux supérieure à 10 %.

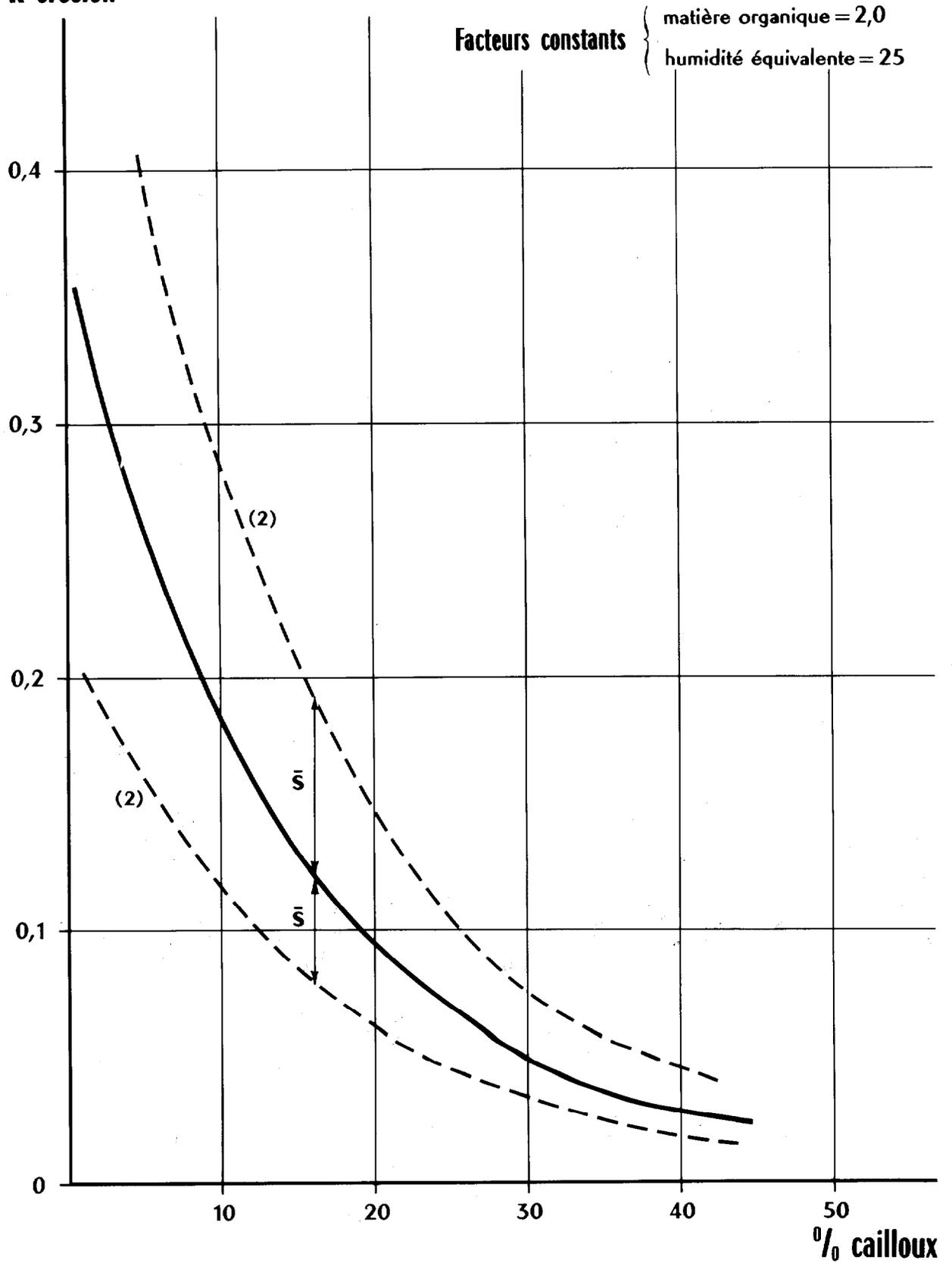
4.3 - Comparaison aux types pédogénétiques

Le tableau n° 2 précédent indique comment se répartissent les valeurs du facteur K en fonction des types pédologiques. Les relations sont peu nettes, mais, nous l'avons vu, le pourcentage de cailloux en surface est très influent. Or, ce pourcentage n'est que faiblement en rapport avec la pédogenèse des sols.

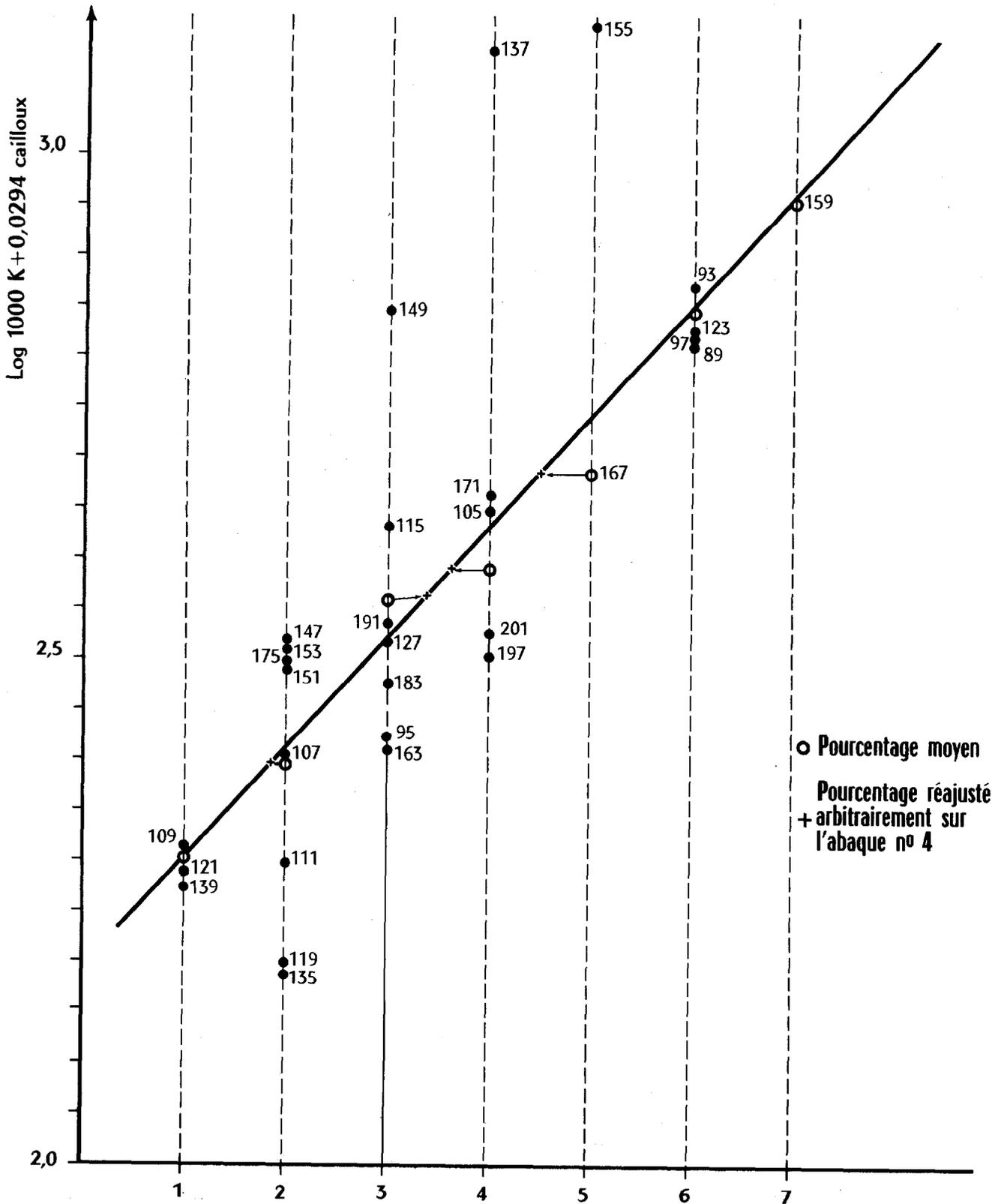
Nous avons donc cherché à comparer les types pédologiques à taux de cailloux constant (% de cailloux = 0) en utilisant la relation précédemment établie (tableau n° 3). Le graphique n° 4 ci-après représente la correspondance obtenue. Nous avons attribué arbitrairement les numéros de 1 à 7 aux différentes catégories indiquées sur ce graphique.

L'abaque n° 4 permet d'obtenir une valeur approchée de K connaissant l'un des types de sols décrits et son pourcentage de cailloux. Il a été obtenu en tenant compte de la relation précédente qu'on a rendue linéaire en réajustant l'échelle des abscisses. Des droites parallèles permettent de faire la correction du coefficient K en tenant compte du pourcentage de cailloux.

K érosion



Graphique n° 3

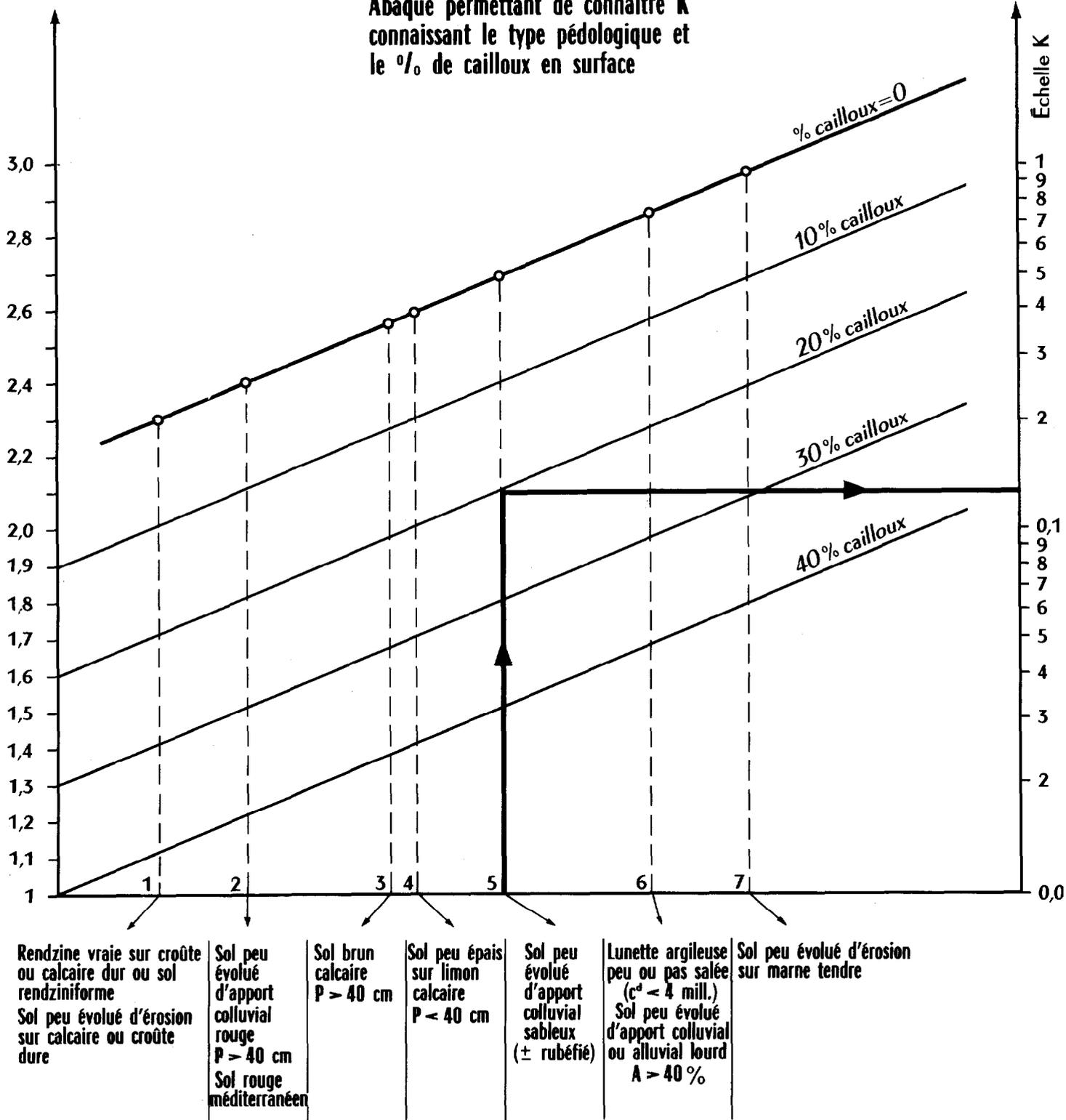


○ Pourcentage moyen
 ● Pourcentage réajusté + arbitrairement sur l'abaque n° 4

<p>Rendzine vraie sur croûte ou calcaire dur ou sol rendziniforme. Sol peu évolué d'érosion sur calcaire ou croûte dure.</p>	<p>Sol peu évolué d'apport colluvial rouge P > 40 cm Sol rouge méditerranéen</p>	<p>Sol brun calcaire P > 40 cm</p>	<p>Sol peu épais sur limon calcaire P < 40 cm</p>	<p>Sol peu évolué d'apport colluvial sableux (± rubéfié) ?</p>	<p>Lunette argileuse peu ou pas salée (c^d < 4 mill.) Sol peu évolué d'apport colluvial ou alluvial lourd A > 40 %</p>	<p>Sol peu évolué d'érosion sur marne tendre</p>
---	--	---------------------------------------	--	--	---	--

Graphique n°4

**Abaque permettant de connaître K
connaissant le type pédologique et
le % de cailloux en surface**



Abaque n° 4

Tableau n° 3

Relation entre le type de sol et le facteur K (% de cailloux constant)

N° des profils	$\log 1000 K + 0,0294 X_1$	K
155	3 124,20	Sol sableux rubéfié
137	3 100,80	Sol peu évolué, d'apport colluvial mélangé à du limon calcaire
159	2 963,20	Sol peu évolué
93	2 864,80	Lunette légèrement salée en surface
149	2 846,80	Sol brun calcaire sur marne gypseuse
123	2 829,80	Alluvion lourde non évoluée
97	2 826,60	Lunette non salée
89	2 820,60	Lunette non salée
167	2 683,20	Sol peu évolué d'apport colluvial sableux
171	2 669,20	Sol rendziniforme sur limon calcaire
105	2 653,00	Sol rendziniforme sur limon calcaire
115	2 631,00	Sol brun calcaire peu profond sur marne
201	2 536,20	Sol peu évolué d'érosion sur limon calcaire
191	2 535,80	Sol brun calcaire sur calcaire blanc profond
147	2 528,80	Sol rouge calcaire hydromorphe
127	2 522,20	Sol brun calcaire érodé sur marne feuilletée
151	2 522,20	Sol peu évolué d'apport colluvial moyennement profond
175	2 513,40	Sol rouge méditerranéen
197	2 506,00	Sol peu évolué sur limon calcaire
153	2 492,80	Sol peu évolué d'apport colluvial rouge calcaire
113	2 477,40	Colluvion de sol brun
183	2 477,40	Sol brun calcaire sur limon calcaire
95	2 426,00	Sol brun calcaire sur marne jaune
163	2 418,60	Sol brun calcaire sur calcaire marneux
107	2 418,20	Sol rendziniforme
109	2 323,00	Rendzine sur croûte dure
111	2 300,20	Sol brun calcaire ± rouge sur marne feuilletée
121	2 287,00	Rendzine typique
119	2 197,00	Sol peu évolué d'apport colluvial rouge profond
135	2 190,00	Sol peu évolué d'apport colluvial rouge

5 - CONCLUSION

D'un point de vue pratique, cette étude offre deux moyens pour déterminer le facteur K, facteur sol intervenant dans le calcul des pertes en terre tel qu'il est fait actuellement en Tunisie.

- soit une détermination rapide (§ 4.3), souvent suffisante, puisque dans l'érosion des sols, le facteur sol intervient moins que le facteur culture par exemple. Cette méthode ne demande que la connaissance du type pédologique (donné par une carte pédologique par exemple) et la mesure du pourcentage de cailloux en surface, pourcentage dont il faudra répéter les mesures pour toute zone différente à ce sujet.

- soit, si l'on peut disposer d'analyses, une détermination à partir de la corrélation triple (§ 4.2) par le calcul, ou, plus simplement, par une interpolation à partir de résultats donnés par les abaques tracés pour la gamme de sol la plus courante. En plus du pourcentage de cailloux, les analyses intervenant (taux de matière organique, humidité équivalente) sont des analyses simples et fidèles et qui risquent d'être peu modifiées par un changement de laboratoire.

D'un point de vue plus théorique, cette étude a cherché à montrer que, lorsqu'on aborde le problème des corrélations simples ou multiples, la gamme de variation des résultats a une importance primordiale et qu'il est essentiel de juger si, dans cette gamme, la fidélité de l'analyse permet la distinction d'un nombre de classes suffisant. D'une certaine manière, ceci peut servir de première sélection des analyses à retenir avant même tout essai de comparaison.

En définitive, l'absence de corrélation n'indique donc pas obligatoirement que le phénomène ou la grandeur que cherche à représenter l'analyse n'intervient pas, mais bien souvent que les analyses manquent de sensibilité dans le cadre où s'est faite l'étude.

Il n'y a donc rien d'étonnant à ce que certaines analyses expliquent un phénomène à une certaine échelle, mais deviennent inefficaces dans le cadre plus restreint d'une région.

6 - BIBLIOGRAPHIE

- ANDERSON (H.W.) - Physical characteristics of soils related to erosion. *J. Soil and Water Conserv.* 1951, 6 (3), p. 129-133.
- BAVER (L.D.) - *Soil Physics*. J. Wiley Ed. New-York, 1956.
- BENNETT (C.A.), FRANKLIN (N.L.) - *Statistical analysis in chemistry and the chemical industry*. J. Wiley and Sons, Londres, 1954.
- COMBEAU (A.), QUANTIN (P.) - Erosion et stabilité structurale du sol. *Publ. Ass. Int. Hydr. Sc.*, n° 59, Gentbrugge, 1962.
- COMBEAU (A.), MONNIER (G.) - Méthode d'étude de la stabilité structurale. Application aux sols tropicaux. *Sols africains*, 1961, vol. VI, n° 1, p. 5-32.
- CONAWAY (A.W.), STRICKLING (E.) - A comparison of selected methods for expressing soil aggregate stability. *S. Sc. Soc. Amer. Proc.*, 1962, 26, 5, p. 426-430.
- ESEKIEL (M.), FOX (K.A.) - *Methods of correlation and regression analysis linear and curvilinear*. J. Wiley and Sons, Londres 1959, 3ème éd.
- JUNG (L.) - The influence of the stone-cover on run-off and erosion on slate soil. *Publ. Ass. Int. Hydr. Sc.*, n° 53, p. 143-153.
- MacINTYRE (D.S.) - Soil splash and the formation of surface crusts by raindrop impact. *S. Sc.*, mars 1958, vol. 85, n° 5, p. 261-267.

- MIDDLETON (H.E.) - Properties of soils which influence soil erosion. *U.S. Dept. Agr. Techn. Bull.*, n° 178, mars 1930.
- MUSGRAVE (G.W.) - The quantitative evaluation of factors in water erosion. A first approximation. *J. Soil and Water Conserv.*, juillet 1947, vol. 2, n° 3.
- SEGINER (I.), MORIN (J.), SHACHORI (A.) - Run off and erosion studies in mountainous terrarossa regions in Israël. *Bull. Int. Ass. Sc. Hydrol.*, déc. 1962, n° 4, p. 79-82.
- VESSEREAU (A.) - *Méthodes statistiques en biologie et en agronomie*. J.B. Baillièrè et fils, Paris, 1960.
- WEBBER (L.R.) - Soil physical properties and erosion control. *J. Soil Water Conserv.*, janvier 1964, 19, 1.
- WISCHMEIER (W.H.) - Special report ARS. *U.S. Dept. of Agriculture, Agricultural Research Service*, 1961, p. 22-66.