

Erodibilité de quelques sols tropicaux Vingt années de mesure en parcelles d'érosion sous pluies naturelles

Eric ROOSE (1), Jean-Marie SARRAILH (2)

(1) Pédologue, Centre ORSTOM, BP 5045, 34032 Montpellier Cedex France

(2) Forestier du CTFT, BP 701, 97387 Kourou-Guyane française

RÉSUMÉ

Depuis une vingtaine d'années, le CIRAD (1) et l'ORSTOM (2) gèrent selon un protocole standard une trentaine de parcelles d'érosion en vue d'estimer l'érodibilité de différents sols tropicaux répartis dans huit pays d'Afrique, de Madagascar et de Guyane française. L'analyse des résultats montre que ces sols tropicaux sont souvent moins érodibles que certains sols des régions tempérées. Cependant leur érodibilité n'est pas constante : elle varie non seulement en fonction des sols, mais aussi des saisons, des années et des techniques culturales.

Les deux premières années après défrichement, les sols sont généralement très stables ($K < 0,1$), mais ensuite l'érodibilité évolue en fonction de la minéralisation des matières organiques et des remontées d'éléments provenant du sous-sol, plus riche en argile, en R_2O_3 ou en cailloux. Dans un seul cas on constate au bout de six ans une remontée brutale de l'indice (effet de seuil).

Les années suivantes, les sols ferrallitiques ($K = 0,01$ à $0,2$) sont généralement plus stables que les vertisols et les sols bruns tropicaux ($K = 0,1$ à $0,2$) et surtout que les sols ferrugineux lessivés ($K = 0,2$ à $0,3$). Tous les sols gravillonnaires dès la surface sont stables ($K < 0,05$) (effet mulch).

Pour ces sols, on a constaté une bonne concordance entre l'érodibilité observée sur parcelle et l'indice estimé à partir de l'abaque de WISCHMEIER (matière organique, limon + sables très fins et une correction pour les graviers) sauf dans deux cas sur douze, probablement à cause d'une situation topographique ou d'une croûte latérique à faible profondeur favorisant le ruissellement.

L'amélioration de la résistance d'un sol à l'érosion pluviale est difficile car l'augmentation de 1 % du taux de matières organiques de l'horizon superficiel exige beaucoup d'apports organiques pour compenser la minéralisation rapide en zone tropicale et ne réduit les risques d'érosion que de 2 % sur les sols sableux ou argileux (ferrallitiques) et de 5 % sur les sols limoneux (ferrugineux). Mieux vaut prévenir que guérir : prévoir un défrichement progressif, puis des techniques culturales préservant un fort taux de matières organiques, de mottes et de cailloux en surface. L'usage d'engrais minéral devrait permettre de maintenir une production élevée de biomasse aérienne et racinaire et par conséquent une productivité du sol stable et satisfaisante.

MOTS-CLÉS : Erodibilité — Sols ferrallitiques — Sols tropicaux ferrugineux — Sols bruns-vertiques — Variabilité temporelle — Variabilité spatiale — Amélioration — Mesures sur parcelles — Estimation par nomogramme — Effet taux de cailloux — Matières organiques — Travail du sol.

(1) CIRAD : Centre International de Recherche Agronomique pour le Développement.

(2) ORSTOM : Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération.

ABSTRACT

ERODIBILITY OF TROPICAL SOILS. TWENTY YEARS OF MEASUREMENTS ON RUNOFF PLOTS UNDER NATURAL RAINFALL

For twenty years, CIRAD and ORSTOM have measured erosion on 30 standard runoff plots to evaluate erodibility of various tropical soils often cultivated in Africa, Madagascar and french Guyana. Data show that tropical soil erodibility is variable in relation with soils and climate but also with seasons, years and cultural practices. Ferrallitic and vertisols are less erodible than some alfisols of loessial temperate regions.

During the two first years after clearing, these soils are very stable ($K < 0,1$) but then, erodibility is evolving with organic matter mineralization and the outcropping of \pm stable subsoil elements, richer in clay, iron + aluminium sesquioxides or in gravel. Only in one case, we observe after six years a sudden increase of the K value (threshold effet ?).

After 3-4 years of cropping, ferrallitic soils (oxisols + ultisols) ($K = 0,01$ to $0,2$) are generally more stable than vertisols ($K = 0,1$ to $0,2$) and particularly more stable than leached ferruginous soils (alfisols) ($K = 0,2$ to $0,3$). All the soils rich in gravel in the topsoil are very stable ($K < 0,05$) : gravel protection is as efficient as a mulch.

Reasonable correlation was observed between erodibility index measured on runoff plots and K estimated with WISCHMEIER's nomograph (O.M., silt + very fine sand, coarse sand and correction for gravel) except of 2 on 12 cases, probably because topography or lateritic pan increase the runoff rate.

Improving rainfall erosion resistance of a soil is not easy because increasing topsoil organic matter by 1 % is difficult in the tropics (high mineralization rate, biomass not available) but erosion risk would be decreased only by 2 % on sandy or clayey soils and by 5 % on silty soils. It is easier to prevent than to cure ! The best solution should be to maintain as long as possible a high soil organic matter by a smooth progressive clearing and by cultural practices giving a high ratio of organic residue, and good structure to the soil surface. Fertilizing should maintain good yield as well as root biomass and as a consequence, an acceptable and sustainable productivity of the soil.

KEY WORDS : Erodibility — Ferrallitic soils — Ferruginous tropical soils — Brown-vertic soils — Spatial variability — Temporal variability — Improvement of resistance — Measurement on runoff plots — Estimation on nomograph — Effect of cultural practices — Rate of organic matter — Rate of gravels.

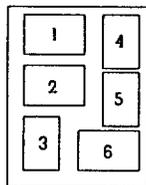


PHOTO 1. — Adiopodoumé, basse Côte d'Ivoire : sol ferrallitique très désaturé sur sédiments III sablo-argileux (pente 7 %) ; formation d'une croûte de battance protectrice. Kusa varie de 0,06 à 0,15.

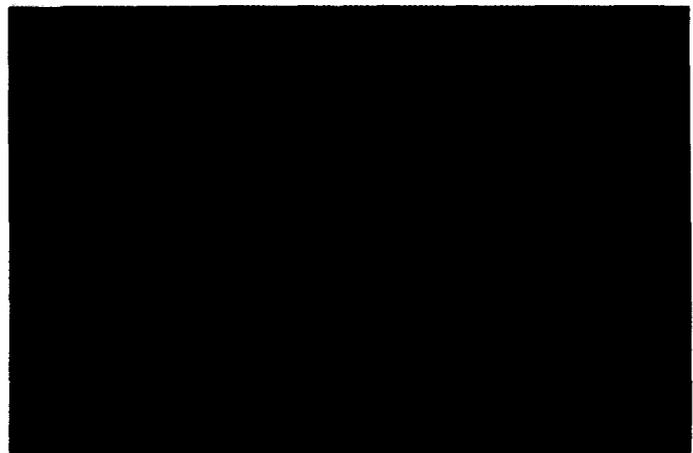
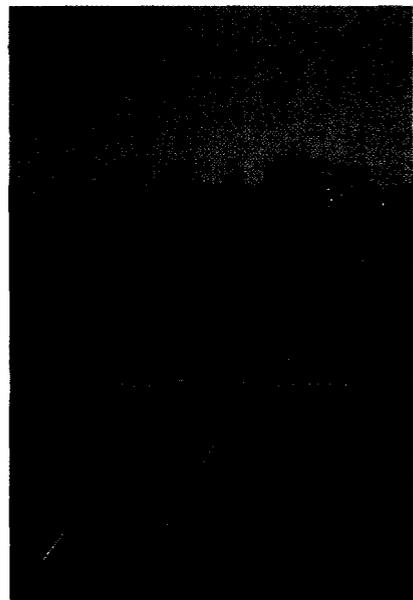
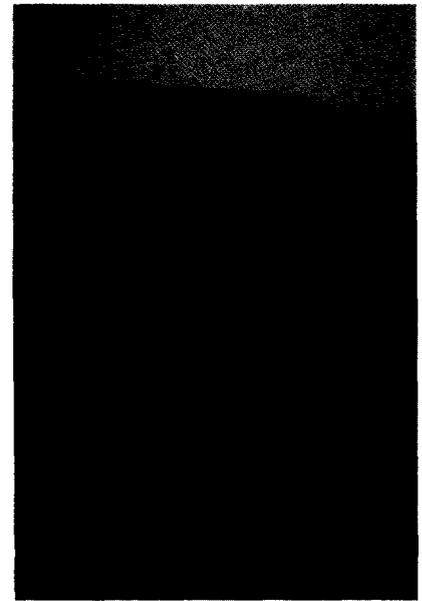
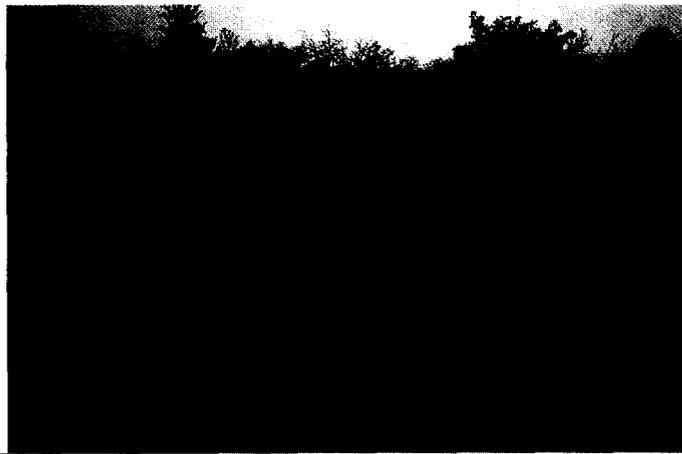
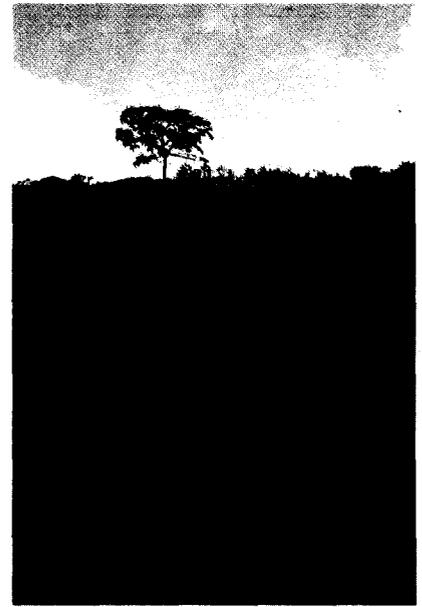
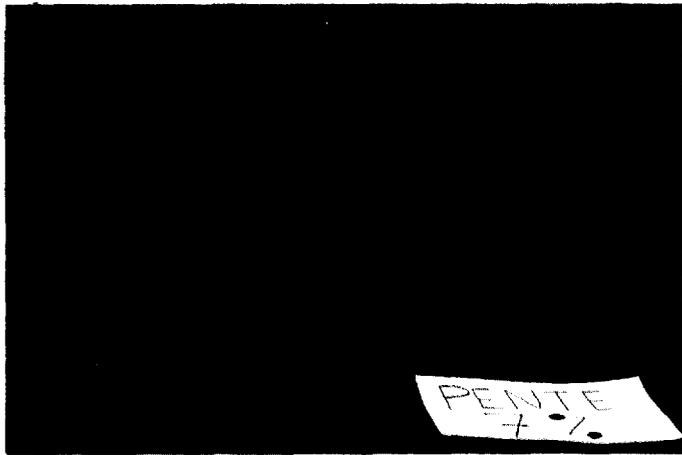
PHOTO 2. — Champ complètement dégradé : l'horizon superficiel sableux et humifère a été décapé jusqu'au fond de labour (Mali, Baramandougou).

PHOTO 3. — Parcelle standard dite « de Wischmeier » car on y respecte les règles de modèle USLE sauf pour le gradient de pente car ces sols ne se trouvent que sur des pentes faibles. (Station P7 de Saria, pente de 0,8 %, Burkina Faso.)

PHOTO 4. — Sol ferrallitique très résistant à l'érosion en nappe, décapé au bulldozer dans la ville d'Abidjan. On remarque la forte sensibilité à l'érosion linéaire : rigoles et ravines.

PHOTO 5. — Ravine de El Azizia (Algérie) : une fois le vertisol entamé se développe rapidement un ravinement généralisé (ou badland) qui met en valeur les niveaux d'hétérogénéité des marnes.

PHOTO 6. — Khef el Hamar, 10 km de Medea (Algérie), sur marne gypseuse : suite à la suffosion (trous dans le sol aboutissant à un réseau de tunnels) un énorme pan de colline s'est effondré et a donné lieu à une lave torrentielle de plusieurs milliers de mètres cubes (langue rouge qui descend jusqu'à la vallée principale au milieu des terres grises). On observe à droite l'emplacement de la colline qui, en s'effondrant, a donné la lave torrentielle.



RESUMEN

CAPACIDAD DE EROSIÓN DE ALGUNOS SUELOS TROPICALES.
VEINTE AÑOS DE MEDIDAS SOBRE PARCELAS DE EROSIÓN BAJO LLUVIAS NATURALES

Desde hace unos veinte años, el CIRAD y el ORSTOM se han encargado de estudiar según una serie de operaciones normalizadas unos treinta parcelas de erosión con objeto de evaluar la capacidad de erosión de diferentes suelos tropicales distribuidos en ocho países de Africa, Madagascar y Guayana francesa. El análisis de los resultados muestra que esos suelos tropicales son a menudo menos erosionables que algunos suelos de las regiones templadas. Sin embargo, su capacidad de erosión no es constante : varía no sólo con los suelos sino con las estaciones, los años y las técnicas de cultivo.

Durante los dos primeros años después de la roturación, los suelos son generalmente muy estables ($K < 0,1$), pero luego la capacidad de erosión cambia con arreglo a la mineralización de las materias orgánicas y a las subidas de elementos desde el subsuelo que es más rico en arcilla, en R_2O_3 o en gravas. En un solo caso, se observa una subida súbita del índice (valor límite) al cabo de seis años.

En los años siguientes, los suelos ferralíticos ($K =$ de 0,01 a 0,2) son generalmente más estables que los vertisuelos y los suelos pardos tropicales ($K =$ de 0,1 a 0,2) y sobre todo que los suelos ferruginosos lixiviados ($K =$ de 0,2 a 0,3). Todos los suelos conglomerados son estables desde la superficie ($K < 0,05$) (efecto mulch).

En esos suelos, se notó una buena concordancia entre la capacidad de erosión observada en la parcela y el índice evaluado a partir del ábaco de WISCHMEIER (materia orgánica, limo + arenas muy finas y un factor de corrección para las gravas) excepto en dos casos entre doce probablemente a causa de una situación topográfica o de una coraza laterítica poco profunda que da lugar a la escorrentía.

Es difícil mejorar la resistencia de un suelo a la erosión pluvial porque el aumento de 1 % de la tasa de materias orgánicas en el horizonte superficial requiere muchos residuos vegetales para compensar la mineralización rápida en la zona tropical y sólo reduce los riesgos de erosión en un 2 % en los suelos arenosos o arcillosos (ferralíticos) y en un 5 % en los suelos limosos (ferruginosos). Más vale prevenir que curar : prever una roturación progresiva y luego técnicas de cultivo que conservan una tasa alta de materias orgánicas, de terrones y de gravas en la superficie. La utilización de abono mineral debería permitir que se mantuviera una producción elevada de biomasa aérea y subterránea y por consiguiente una productividad del suelo estable y satisfactoria.

PALABRAS CLAVES : Capacidad de erosión — Suelos ferralíticos — Suelos ferruginosos tropicales — Suelos pardos — Verticos — Variabilidad temporal — Variabilidad espacial — Mejora — Medidas sobre parcelas — Estimación por nomogramas — Efecto de la tasa de gravas — Materias orgánicas — Trabajo del suelo.

INTRODUCTION : LE PROBLÈME
DE L'ÉVALUATION DE L'ÉRODIBILITÉ DES SOLS

Le couvert végétal, la pente, les techniques culturales conservatoires et l'agressivité des pluies sont les facteurs majeurs qui régissent l'érosion accélérée des sols cultivés (ROOSE, 1973-81).

Pendant depuis longtemps agronomes, pédologues et géographes ont reconnu que les propriétés intrinsèques des sols peuvent modifier l'intensité des phénomènes d'érosion. Certaines de ces propriétés sont assez stables (texture) mais d'autres évoluent rapidement au cours du défrichement et de la mise en valeur des terres comme leur mode d'agrégation (stabilité structurale, croûte de battance, état dispersé, matière organique, cations échangeables, agents dispersants ou flocculants,

ciments organiques, calcaires ou R_2O_3) et leurs propriétés hydrauliques (battance et dynamique de l'infiltration, l'humidité du sol et sa compacité, etc.) (QUANTIN et COMBEAU, 1962).

Or, la pression démographique entraîne inexorablement l'extension des cultures à des terres neuves de plus en plus fragiles. Il est donc urgent de mettre au point une méthode à la fois rapide et précise pour prévoir la sensibilité des sols à différents types d'érosion, l'érodibilité des sols, leur évolution sous culture et les aménagements conservatoires à mettre en œuvre dès le défrichement.

BENNET (1926) dans son étude sur les sols de Cuba fut l'un des premiers à reconnaître explicitement la variabilité de la résistance des sols à l'érosivité des pluies : il tenta de la relier aux différentes classes de sols en fonction du rapport SiO_2/R_2O_3 mais l'intérêt

de cet index n'est que local. MIDDLETON (1930) proposa ensuite un indice tenant compte de la facilité des sols à se disperser et à transmettre l'eau : indice de dispersion = $A + L$ % sur échantillon dispersé / $A + L$ sur échantillon non dispersé. Cet indice de dispersion ne convient pas non plus parfaitement car il nie la possibilité d'érosion de petits agrégats, il néglige la dispersion des agrégats par l'énergie des gouttes et manque de précision sur l'érodibilité des sols très sableux en surface (BRYAN, 1968). A la suite des travaux de YODER (1936), ELLISON (1944-54) et HENIN (1956), toute une série de tests ont été proposés qui tentent de mesurer la taille des agrégats et leur stabilité : capsules de ELLISON, test du nombre de gouttes nécessaires pour rompre une motte en agrégats inférieurs à 0,5 - 2 - 3 mm (MCCALLA, 1944), test de stabilité structurale (HENIN et MONNIER, 1956). Mais aucun de ces tests de laboratoire n'est à la fois fiable, suffisamment sensible pour distinguer l'évolution de la stabilité de la structure, et universel, car leur signification dépend du contexte pédologique et des conditions hydriques du sol (VALENTIN et JANEAU, 1989).

LE BISSONNAIS (1988) a montré que, dans les conditions d'un orage tombant sur un sol sec, c'est le processus d'éclatement qui domine et les phénomènes sont bien décrits par l'indice d'instabilité de HENIN. En revanche, la formation de croûtes de battance par liquéfactions des sols très humides est mieux corrélée avec les limites d'Atterberg (DE PLOEY, 1971). Des sols riches en argile et matières organiques sont peu sujets à l'encroûtement, mais leurs agrégats sont stables et sujets à la détachabilité sous l'impact des grosses gouttes de pluie (BOLLINNE *et al.*, 1978).

En vue de la cartographie des risques d'érosion sous différents systèmes de production, BERGSMAN (1985-86) a proposé un ensemble de tests simples à réaliser sur le terrain : il s'agit de déterminer à la fois la disponibilité en matériaux susceptibles d'être érodés, les risques de transport et de décapage par le ruissellement concentré :

- la dispersion de petites mottes séchées à l'air, soumises à l'immersion brutale pendant 10 minutes,
- la résistance au cisaillement (dynamomètre de torsion),
- la cohérence du sol manipulé en humide (texture) et la dispersabilité de l'argile,
- la capacité d'infiltration du sol soumis à une pluie simulée de 24 mm (pluie d'imbibition),
- la perte en terre sur une pente de 9 % (mini-simulateur),
- le test du cisaillement par le ruissellement concentré dans une rigole.

De ses études en Asie et en Espagne, il conclut qu'aucun de ces tests de terrain n'explique plus de 50 % de la variabilité des risques d'érosion. Dans plus de la

moitié des cas, les tests liés au ruissellement et au décapage localisé (rillabilité) expliquent mieux les risques complexes d'érosion que les tests liés à la disponibilité en matériaux érodibles (détachabilité).

Devant la complexité des processus en cause dans l'érosion des sols, on s'oriente vers des tests liés à chaque processus : la détachabilité par les gouttes de pluie ou par le ruissellement, la transportabilité, la formation de croûte et de rigoles, les risques de ruissellement.

Pour valider ces tests, l'observation de l'érodibilité des sols peut se faire à partir d'observations des processus d'érosion sur le terrain (BOIFFIN, 1984 ; VALENTIN et JANEAU, 1989) ou de mesures pendant de longues années sur des parcelles d'érosion standardisées (ROOSE, 1973-80 ; SARRAILH, 1987 ; LAL, 1981) ou encore pendant quelques averses simulées sur le terrain ou sur des échantillons plus ou moins remaniés posés sur des plateaux drainants (30 à 200 cm de long) (VANESLANDE *et al.*, 1985).

Les tests sous pluies simulées sur de petites surfaces (< 2 m²) permettent une bonne approche des risques de ruissellement par encroûtement et de détachabilité (splash) de l'horizon superficiel de certains sols (VALENTIN, 1981 ; PONTANIER *et al.*, 1984). Malheureusement, ils reflètent mal les influences complexes de la longueur et du gradient de la pente, de la position topographique, de la structure des couvertures pédologiques et de l'évolution saisonnière des états de surface sur le ruissellement et *a fortiori* sur sa charge solide (BOUDJEMLINE, 1987 ; ROOSE et CAVALIER, 1988). BRYAN (1981) montre en outre que de légères modifications du protocole ou du matériel utilisé dans les expérimentations de simulation de pluies au laboratoire ou sur le terrain pouvaient entraîner de fortes différences de perte en terre par splash ou dans les eaux de ruissellement. Il a observé des coefficients de variation des tests d'érosion de 15 % (sur Chernozem) à 39 % (sur sol brun calcaire/loess) pour 6 à 8 répétitions les plus semblables possibles. Ces « variations irréductibles » proviendraient d'interactions complexes entre les variations de la taille des gouttes, l'épaisseur de la lame ruisselante, les microrugosités et la taille des agrégats à la surface du sol. La précision des observations à partir d'un seul test varierait de 25 à 50 % ! Il a fallu dix répétitions pour réduire à 8-18 % le coefficient de variation pour ces sols.

Une grande variabilité des paramètres du ruissellement et de sa charge solide fut également observée lors des sept campagnes de simulation de pluies (type ORSTOM) effectuées dans le centre et le sud de la France (coopération université d'Orléans, ORSTOM - INRA - Chambres d'agriculture et ITCF). Cette variabilité fut attribuée à l'effet du vent sur la répartition et la taille des gouttes de pluie et à l'extrême variabilité de la capacité

de stockage et d'infiltration à la surface des sols fraîchement cultivés (et en particulier la rugosité des lits de semences) (TREVISAN, 1986 ; RAHELIARISOA, 1986 ; BOUDJEMLINE, 1987 ; ROOSE et CAVALIE, 1988).

Ces observations sur la variabilité des mesures de pertes en terre sous pluies simulées sur de petites surfaces devraient nous rendre prudents quant à leur interprétation en terme d'érodibilité des sols et à leur comparaison avec les mesures obtenues pendant de nombreux épisodes de pluies naturelles sur des parcelles d'érosion standardisées de 100 m². Ce sont précisément les résultats des mesures de l'érodibilité des sols de 25 parcelles nues standardisées (dite de WISCHMEIER), gérés par le CTFT (1), l'IRAT (2) et/ou l'ORSTOM en Afrique, à Madagascar et en Guyane française, que nous souhaitons présenter ici.

1. LA MÉTHODE

L'analyse rapide des tests de laboratoire ou de terrain et des nombreux indices proposés montre combien la sensibilité des sols à l'érosion hydrique (l'érodibilité) est complexe et variable dans le temps et dans l'espace en fonction des propriétés intrinsèques du sol mais aussi des techniques culturales qui modifient les états de la surface du sol.

Aussi WISCHMEIER et SMITH (1960-1978) ont-ils proposé dans leur modèle empirique de prévision des pertes en terre (moyenne sur 20 ans) par érosion en nappe et rigole de déterminer expérimentalement l'indice d'érodibilité des sols par le rapport entre l'érosion et l'indice d'érosivité des pluies mesurés sur parcelle de référence répondant à l'ensemble des critères suivants : il s'agit d'une jachère nue cultivée sans apport de matière organique, sur une pente homogène de 9 % et de 22,13 m de long. Durant la période de mesure (au moins 5 ans), la parcelle est labourée chaque année et travaillée dans le sens de la pente, comme une culture sarclée. Ensuite, elle est reprise superficiellement pour éviter les adventices et l'encroûtement intense de la surface qui pourraient réduire l'érosion.

Avec l'accord de WISCHMEIER, ROOSE (1968) a proposé quelques ajustements de ce standard pour appliquer ce modèle (USLE) aux conditions africaines où les techniques culturales sont très différentes de celles des USA et où certains sols érodibles ne sont jamais situés sur des pentes de 9 %.

Il s'agit d'une part de choisir des pentes caractéristiques pour chaque type de sol et d'ajuster ensuite les valeurs de perte en terre à l'aide du facteur topogra-

phique (SL). D'autre part, les parcelles sont labourées avant chaque saison de culture (donc deux fois en région à deux saisons pluvieuses) et rectifiées pour obtenir une pente homogène ; elles subissent ensuite deux sarclages à la houe comme il est généralement d'usage, puis un binage par mois pour réduire la croûte de battance et autant de traitements aux herbicides que nécessaire pour maîtriser les adventices. Sur certaines parcelles, le CTFT a appliqué en outre un ratissage superficiel après chaque averse pour détruire systématiquement les croûtes.

Dans ce système :

$$K_{usa} = \frac{E \text{ (t/ha)}}{R_{usa} \times SL \times 2,24} = \frac{K \text{ métrique}}{1,29}$$

La mesure directe de l'érodibilité (K) sur des parcelles standards universelles reflète les effets combinés de toutes les propriétés qui influencent significativement la facilité avec laquelle un sol particulier est érodé par la pluie (battance) et par le ruissellement (rigoles) s'il n'est pas couvert : c'est donc *un comportement moyen pour différents états de surface et d'humidité du sol pour toute une gamme d'averses caractéristiques de la région*. Aux USA le paramètre varie de 0,69 à 0,03 pour des sols de plus en plus résistants. D'où une classification des sols selon leur érodibilité (BOLLINNE et ROSSEAU, 1978) :

| | |
|-------------|--|
| K < 0,10 | Sols très résistants à l'érosion |
| 0,10 à 0,25 | Sols assez résistants à l'érosion |
| 0,25 à 0,35 | Sols moyennement sensibles à l'érosion |
| 0,35 à 0,45 | Sols assez sensibles à l'érosion |
| > 0,45 | Sols très sensibles à l'érosion |

2. LES RÉSULTATS

Sur le tableau I, sont présentés les caractéristiques des parcelles d'érosion (climat, indice d'érosivité moyen de pluies, type de sol, roche mère, pente) ainsi que les résultats des mesures de l'érodibilité (Kusa annuels, minimum, maximum, K médian exprimés en tonne par hectare et par unité de EI₃₀) ou leur estimation à l'aide du nomogramme (K tex. ne tenant compte que de la texture et des matières organiques, Kgr prenant en plus en compte le taux de gravier, K tenant compte en plus de la structure de l'horizon superficiel et de la capacité d'infiltration du profil) (WISCHMEIER *et al.*, 1971). L'indice K est exprimé en unités anglaises comme dans la majorité des publications sur le modèle de prévision

(1) CTFT : Centre Technique Forestier Tropical.

(2) IRAT : Institut Français de Recherche en Agronomie Tropicale.

des pertes en terre (USLE). En multipliant Kusa par 1,29 on obtient K en valeur métrique décimale.

Les résultats proviennent de 38 parcelles d'érosion (dont 25 sont standardisées, et ont duré plus de 4 ans) réparties dans 30 stations situées à Madagascar (11), au Burundi (3), au Burkina Faso (8), en Côte d'Ivoire (3), au Bénin (1), au Niger (1), au Sénégal (1) et en Guyane française (2). Nous y avons joint les résultats obtenus par LAL (1981) dans la station IITA d'Ibadan au Nigeria sur un sol très voisin de celui de la station de Bouaké en Côte d'Ivoire.

Dans la majorité des cas, il s'agit de parcelles nues répondant aux normes et mises en place dans le but exclusif d'étudier la sensibilité du sol (indice K) à l'agressivité des pluies (ROOSE, 1968). Cependant en l'absence des parcelles nues standard dans certaines stations où l'érosion fut mesurée pendant de longues années, nous avons tenté d'estimer l'érodibilité du sol (K') à partir des pertes en terre les plus fortes soit à l'occasion de cultures couvrant mal le sol (mauvaise levée, attaque de maladie, rendement nul, période de sol nu entre deux cultures) soit en corrigeant les valeurs de perte en terre par un facteur C (couvert végétal) bien connu par ailleurs (ex. : Sefa, Agonkamey, Niangoloko). Un certain nombre de ces résultats ne seront pas discutés soit parce que la durée d'expérimentation fut trop brève pour atteindre la stabilité des matières organiques (Sefa, Agonkamey) soit parce que les résultats disponibles sont trop sommaires (Sirgui, Bane, Niangoloko) ou entachés d'erreurs par apport de sables éolisés juste avant les gros orages (Oursi).

3. ANALYSE DES RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les données dont nous disposons aujourd'hui montrent que les sols tropicaux testés (les plus utilisés, les plus répandus) ont une sensibilité à l'érosion assez variable (K en t/ha/R. index = 0,001 à 0,38), mais moins étendue vers les valeurs de forte érodibilité que les sols des USA et de Hawaï (K = 0,03 à 0,69) (WISCHMEIER et SCHMIDT, 1978 ; El SWAIFY *et al.*, 1982). On pourrait les classer parmi les sols très résistants à moyennement sensibles.

On constate au tableau I que la valeur « retenue » (généralement la médiane) représente assez mal l'ensemble des valeurs observées au cours des années, car l'érodibilité est fonction de caractéristiques assez stables (comme la texture) mais aussi des propriétés structurales et hydrodynamiques des sols qui dépendent fortement du travail du sol et des matières organiques qui évoluent très rapidement en région chaude. Contrairement à WISCHMEIER qui suggère qu'à chaque sol correspond un indice d'érodibilité, nous avons observé

en chaque station une évolution de l'érodibilité du sol en fonction du temps, des techniques culturales, du climat, du type de sol et des caractéristiques du profil.

3.1. L'érodibilité des sols, une variable en fonction du temps

A l'échelle de l'averse, la sensibilité du sol évolue continuellement. D'une part, la charge solide du ruissellement varie au cours de la pluie selon quatre types de courbe même si l'intensité reste constante (ROOSE et ASSELINE, 1977 ; COLLINET et VALENTIN, 1980). D'autre part, on observe généralement que la sensibilité des sols à la pluie est généralement plus faible sur sol sec et encroûté que sur les sols humides et travaillés (ROOSE, 1973 ; VANELSLANDE *et al.*, 1984).

A l'échelle mensuelle ou saisonnière (voir tableau II), se retrouve cette résistance plus élevée des sols au début de la saison des pluies (sol sec) qu'au cœur de celle-ci (sol humide) (ex. : juin et novembre à Adiopodoumé). En plus de la cohésion et de la sécheresse du sol, l'augmentation de l'érodibilité des sols au cours des saisons pluvieuses s'explique par la détérioration progressive de leur capacité d'infiltration et de leur stabilité structurale (QUANTIN et COMBEAU, 1962).

A l'échelle des années, l'évolution de l'érodibilité diffère d'un sol à un autre, à mesure qu'on s'éloigne du défrichement (voir fig. 1) :

— Les premières années, (1 à 3 ans), les valeurs de K sont généralement faibles (K < 0,05 à 0,15) mais croissantes à mesure que le réseau racinaire primitif (antérieur) et les matières organiques se dégradent (25 à 50 % du carbone organique sont généralement perdus en 2 ans en régions tropicales).

— Vers la 3^e ou 4^e année selon les conditions initiales d'évolution des matières organiques du sol, l'indice d'érosivité grimpe jusqu'à la valeur maximale pour osciller ensuite en fonction des interactions entre l'état du sol (rugosité, humidité, porosité) avant l'averse et la distribution des averses (ex. : Adiopodoumé, Nanokely, Saria, Pô, etc.).

— Ensuite, dans bons nombres de cas où les propriétés du sous-sol diffèrent de celles de l'horizon travaillé, après 5 à 6 années de mesure, l'indice d'érodibilité diminue, parce que l'horizon humifère a été décapé ou tout au moins mélangé au sous-sol plus graveleux ou enrichi en argile, en fer ou en calcaire) (ex. : Nanisana, Kianjasoa, Miadana, Linoghin, Gampela, Ibadan, etc.).

— L'érodibilité des sols gravillonnaires ou caillouteux dès la surface est généralement faible et décroissante à mesure que les particules fines sont entraînées sélectivement et que les éléments grossiers forment une sorte de mulch protecteur à la surface du sol (ex. : Korhogo, Rushubi). Ce mulch est très efficace dès les faibles taux de couverture puisque 10 % de cailloux réduisent K de

TABLEAU I

| Stations (époque) | Climat (Rusa) | Pente % l en m. s.l. | Type de sol roche mère, gravier | Kusa mesuré | | | K estimé Homogr. (N x C gra.) | Références | |
|-----------------------------|-------------------------------------|----------------------------|--|--|-------|------|-------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| | | | | Evolution | Mini | Maxi | | | |
| MADAGASCAR | | | | | | | | | |
| Beforona 1974 - 79 | Perhumide (788) | 38 % 20 m. (8,88) | Ferrall. typique sur migmatite | 0,001 - 0,01 - 0,01 0,001 - 0,001 | 0,001 | 0,01 | 0,01 | - | SARRAILH, 87 |
| Ivoloina 1966 - 72 | Perhumide (957) | 40 % 25 m. (13,0) | Ferrall. typique Jaune / Rouge | 0,001 - 0,01 - 0,01 0,02 - 0,01 - 0,01 | 0,001 | 0,02 | 0,01 | - | BAILLY et al, 76 SARRAILH, 87 |
| Ampaherana 1972 - 75 | Tropical altitude (476) | 37,7 % 20 m. (10,4) | Ferrall. typique Jaune / Rouge | 0,001 - 0,03 - 0,03 | 0,001 | 0,03 | 0,03 | - | BAILLY et al, 76 SARRAILH, 87 |
| Hanisana 1965 - 73 | Tropical altitude (370) | 8,0 % 18 m. (0,69) | Ferrall. typique 1 rouge 2 non ratissé 3 | 0,01-0,05-0,14-0,20 -0,20-0,11-0,11 H-0,13-0,15-0,07-0,07 H-0,12-0,13-0,08-0,13 | 0,001 | 0,20 | 0,12 | - | BAILLY et al, 76 SARRAILH, 87 |
| Ambatoainty 1972 - 77 | Tropical altitude (388) | 12,5 % 20 m. (1,6) | Ferrall. ramanié très désaturé | 0,02 - 0,19 - 0,17 - 0,22 - 0,14 | 0,02 | 0,22 | 0,17 | text. (0,11) | BAILLY et al, 76 SARRAILH, 87 |
| Hanokely 1965 - 72 | Tropical altitude (359) | 14,0 % 20 m. (1,97) | Ferrall. rouge sur basalte | 0,02-0,12-0,22-0,18- 0,21-0,18-0,17 | 0,02 | 0,22 | 0,18 | - | BAILLY et al, 76 SARRAILH, 87 |
| Hanankazo 1968 - 77 | Tropical altitude (511) | 13,0 % 20 m. (1,7) | Ferrall. ramanié très désaturé | H-H-0,01-0,03-0,03- 0,18-0,24-0,20-0,09 | 0,001 | 0,03 | 0,03 0,24 0,20 | text. (0,04) | BAILLY et al, 76 SARRAILH, 87 |
| Ampangabe 1975 - 79 | Tropical altitude (388) | 10,0 % 20 m. (1,11) | Ferrall. typique argilo-sableux | - 0,15 - 0,15 - 0,25 | 0,15 | 0,25 | 0,15 | - | BAILLY et al, 76 SARRAILH, 87 |
| Kianjasoa 1967 - 75 | Tropical altitude (718) | 6,5 % 20 m. (0,60) | Ferrall. typique rouge | 0,12-0,38-0,26-0,23- 0,28-0,29-0,17-0,14 | 0,13 | 0,38 | 0,27 | - | BAILLY et al, 76 SARRAILH, 87 |
| Befandriana II 1968 - 72 | Semi-Humide (1200) | 9,0 % 20 m. (1,0) | Ferugineux/Fersal- litique peu battant | 0,09-0,09-0,14-0,16 | 0,09 | 0,16 | 0,14 | - | BAILLY et al, 76 SARRAILH, 87 |
| Miadana 1970 - 75 | Semi-humide (888) | 4,3 % 20 m. (0,36) | Ferugineux tropi- cal. | 0,08-0,16-0,23-0,21- 0,19 | 0,08 | 0,23 | 0,21 | - | BAILLY et al, 76 SARRAILH, 87 |
| BURUNDI | | | | | | | | | |
| Rushubi (1) 1979 - 85 | Tropical altitude (444) | 40 % 20 m. (11,63) | Regosol humique (A-C) sur grès cailloux > 40 % en 1985. | 0,02-0,07-0,04-0,03- 0,03-0,02 | 0,02 | 0,07 | 0,03 | - | SARRAILH, 87 |
| Rushubi (2) 1985 - 86 | Tropical altitude (5,71) | 27 % 20 m. (5,71) | Ferrosol humique sur schiste mica- se. | 0,07 | | | | - | QUIZOL et al, 86 |
| Muzinda 1984 - 85 | Tropical altitude (84) | 35 % 22 m. (9,55) | Ferrall. brun profond sur ? | 0,03 | | | | - | SARRAILH, 87 QUIZOL, 86 |
| GUYANE | | | | | | | | | |
| Ecerex 1979 - 84 | Equatorial hyper humide (944) | 11 % 20 m. (1,28) | Ferrall. très dé- saturé. Schistes de Bonidoro. Drainage latéral. | 0,10 - 0,04 - 0,04 - 0,02 | 0,02 | 0,10 | 0,04 | K text = 0,13 K'c40 = 0,05 | SARRAILH, 87 |
| Cabassou | Equatorial hyper humide (?) | ? | Ferrall. sur sédi- ments argileux. | 0,08 - 0,12 | | | | ? | IRAT ? |

TABLEAU I (suite)

| | | | | | | | | | | |
|---------------------------------|-----------------------------------|---|---|--|------------------------------|------------------------------|------------------------------|---|--|--|
| COTE D'IVOIRE | | | | | | | | | | |
| Adiopodoumé 1956 - 76 | Subéquatorial (1260) | 4,5 % 7 % 23 % 15 m. (0,33) (0,57) (3,73) | Ferrals. modal très desaturé sur séd. III S.A. pas de gravier | 0,054-0,101-0,094- 0,095-0,081-0,087- 0,057-0,065-0,059- 0,057 0,142-174-87-83 0,085-67-70-112-59 | 0,05 0,17 | 0,10 0,10 | 0,08 0,10 | 0,10 0,10 | ROOSE, 73 | |
| Bouaké 1960 - 74 | Subéquatorial Guinéen (512) | 4 % 22,5 m. (0,35) | Ferrals. rajeuni L remanié/granite LP gravill. 25 % P 0 | 0,02-0,08-0,08-0,03 0,04-0,04-0,03-0,03 0,03-0,10-0,18-0,12 - -0,07-0,15-0,14 | 0,02 | 0,18 | 0,07 | K text = 0,07 K'C20 % = 0,04 | KALMS, 1975 BERTRAND, 1967 | |
| Korhogo 1972 - 75 | Tropical soudanien (870) | 2,9 % 20 m. (0,24) | Ferrals. rajeuni sur granite grav. 30 % | 0,021-0,022-0,01-0,01 -0,02-0,02-0,01-0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | K text = 0,08 K'C30 = 0,04 | ROOSE, 1979 | |
| BENIN | | | | | | | | | | |
| Agonkamey 1964 - 68 | Subéquatorial (705) | 4,4 % 30 m. (0,45) | Ferrals. très sur S.A. tertiaire Terre de Barre. | 0,03 - 0,10 - 0,10 - 0,11 | 0,03 | 0,11 | 0,10 | K' = 0,09 K = 0,08 | VERNEY et al, 197 ROOSE, 1973 | |
| BURKINA FASO | | | | | | | | | | |
| Gampela 1968 - 72 | Tropical s. soudanien | 0,8 % 25 m. (0,11) | Ferrugineux trop. sur carapace à 20 cm. Gravillons % | 0,05 - 0,09 - 0,32 - 0,24 - 0,17 | 0,05 | 0,32 | 0,24 | ? | CTFT, 1974 ROOSE et PIOT, 1974 MIETTON, 1988 | |
| Niangoloko 1956 - 61 | Tropical soudanien (485) | 0,5 % 30 m. (0,11) | Ferrals./cui rasse à 60 cm sur granite | Moyen/6 ans = 0,07 | - | - | 0,07 | K = 0,08 | CHRISTOI, 1961 " 1966 | |
| Saria 1971 - 74 1978 - 80 | Tropical s. soudanien (455) | 0,7 % 22,2 m. (0,100) | Ferrugineux trop lessivé. Cui rasse à 50 cm/granite. | 0,06 - 0,21 - 0,35 - 0,23 - 0,23 | 0,06 | 0,35 | 0,24 | K tex = 0,27 K prof. = 0,34 | ROOSE, 1979 MIETTON, 1988 | |
| Pé - Banon 1978 - 82 | Tropical soudanien (400) | 1,7 % 25 m. (0,170) | Ferrugineux trop lessivé à taches + concrétions. | 0,02 - 0,05 - 0,05 - 0,07 - 0,08 par défaut pioché après chaque pluie | - | - | - | - | MIETTON, 1988 | |
| Sirgui 1980 - 81 | Tropical S. sahélien (350) | 0,8 % 25 m. (0,112) | Sol brun eutrophe sur roche verte gravillons. | 0,45 - 0,59 valeur très élevées prudence carapace à faible profondeur | 0,45 | 0,59 | 0,50 | - | MIETTON, 1988 HER | |
| Linghin 1973 - 78 | Tropical S. soudanien (400) | 1 % 25 m. (0,124) | Sol brun vertique | 0,008 - 0,05 - 0,11 - 0,28 - 0,19 - 0,14 | 0,01 | 0,28 | 0,14 | Analyses ? | PIOT, MILLOGO, 1980 ROOSE, PIOT, 1984 | |
| Bane 1976 - 80 | Tropical S. soudanien (480) | 3,7 % 22 m. (0,32) | Vertisol topomorphe dégradé. | 0,12.....0,21 | 0,12 | ? | 0,20 | - | CTFT, 1981 MIETTON, 1988 | |
| Oursi 1977 - 79 | Tropical sahélien (200) | 6,2 % 20 m. (0,57) | Sol ferrugineux peu lessivé sableux sur dune ancienne sur roche basique. | 0,13 - 0,21 - 0,18 mais dépôts éoliens ! | 0,13 | 0,21 | 0,18 | - | PIOT, MILLOGO, 1980 MIETTON, 1988 | |
| NIGER | | | | | | | | | | |
| Allokoto 1967 - 71 | Tropical S. sahélien (210) | 3 % 25 m. (0,275) | Vertisol lithomor- phe. Cailloux >10 % sur calcaire/schist | (0,10)-0,13-(0,10)- 0,07-(0,04) piochage 1/15 jours | 0,04 ? | 0,13 ? | 0,10 ? | K' text = 0,13 K'grav.10 % = 0,10 | BIROT et al, 1970 DELWAULLE, 1973 | |
| SENEGAL | | | | | | | | | | |
| Séfa 1954 - 68 | Tropical soudanien (655) | 2 % 40 m. (0,33) | Ferrugineux trop lessivé à taches et concrétions. | (0,04) (0,06) (0,7) * (0,17) sol presque nu | 0,04 | 0,17 | 0,25 | K' text = 0,16 K prof. = 0,28 | ROOSE, 1966 CHARREAU, 1968 SEGUY | |
| NIGERIA | | | | | | | | | | |
| Ibadan (IITA) | Subéquatorial guinéen (700) | 1 % 5 % 10 % 15 % 25 m. | Oxic Paleustalf ferrals. sur gra- nite avec gravier. | voir figure... | 0,02 0,07 0,08 0,04 | 0,08 0,28 0,16 0,06 | 0,04 0,20 0,13 0,04 | - | LAL, 1981 | |

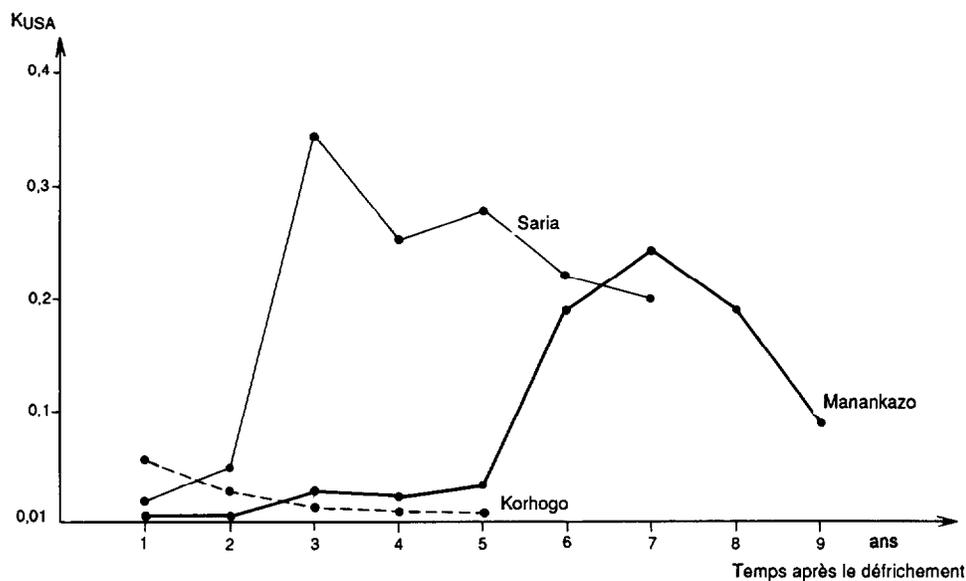


FIG. 1. — Evolution de l'érodibilité (Kusa) de trois sols tropicaux en fonction des années écoulées après le défrichement.
Tropical soils erodibility is evolving with time after forest removal.

23 %, 20 % de cailloux le réduisent de 40 %, 30 % de cailloux, de 52 % et 40 %, de 62 % (voir fig. 7).

— Dans un seul cas (Manankazo), l'érodibilité du sol, très faible au début ($K = 0,001$ à $0,03$), a crû brutalement la sixième année de mesure à la suite d'un cyclone ($K = 0,19$ à $0,24$). BAILLY *et al.* (1976) pensent qu'il s'agit du passage au-delà d'un seuil de dégradation de la stabilité structurale. Ces seuils ont également été observés sur les sols limoneux européens quand le taux de matières organiques est inférieur à 1,5-1,2 % (BOIFFIN, MONNIER, 1982).

Devant une telle variabilité de l'indice K au cours des années, il faut se poser la question de savoir quel est le K que choisirait WISCHMEIER ?

— La valeur maximale donnerait une image trop alarmiste de la réalité.

— La moyenne de valeurs aussi hétérogènes n'aurait pas

de sens : quel sens en effet donner à la moyenne entre 0,001 et 0,24 (Manankazo).

— La médiane donne moins de poids aux valeurs extrêmes (ne sont-elles pas entachées d'erreur ?) qu'aux valeurs les plus fréquentes. Comme le modèle vise l'estimation des pertes en terre moyennes sur 20 ans, c'est la médiane qui répond le mieux aux hypothèses du modèle... si le nombre d'années d'expérimentation est suffisant. Compte tenu des évolutions possibles, 4 à 5 années de mesure après 2 à 3 ans de culture sans enfouissement de matières organiques semblent un minimum pour déterminer le type d'évolution de l'érodibilité du sol et donc l'érosion potentielle. Rares sont les expérimentations sur le terrain qui répondent à cette exigence et il n'est donc pas étonnant de trouver dans la littérature bon nombre de conclusions hâtives sur l'utilisation de ce modèle après 3 ans, 1 an, voire une saison, ou 1-2 averses simulées sur le terrain... ou même au laboratoire !

TABLEAU II

Evolution de l'érodibilité du sol (K) au cours de l'année 1971 à la station d'Adiopodoumé (Côte d'Ivoire)
Jachère nue sur parcelle de 7 % de pente

Soil erodibility index evolution during the year 1971 at the bare fallow 7 % gradient runoff plot of Adiopodoumé (South Ivory Coast)

| | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D |
|----------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|-----|-------|-------|-------|------|
| Pluie mm | 29,5 | 86,5 | 115,5 | 155,2 | 447,5 | 294,5 | 140,0 | 9,5 | 57,7 | 159,5 | 128,3 | 31,0 |
| Rusa | 2,80 | 87,19 | 79,82 | 57,25 | 610,16 | 175,11 | 119,48 | 0 | 9,83 | 89,74 | 32,85 | 6,70 |
| K | 0,061 | 0,153 | 0,102 | 0,074 | 0,110 | 0,156 | 0,071 | - | 0,019 | 0,034 | 0,112 | - |

Pluie annuelle : 1 654,7 mm

Rusa = 1 251

K annuel moyen = 0,106

3.2. L'érodibilité des sols : une variable en fonction des techniques culturales

WISCHMEIER a bien précisé l'état de la surface du sol dont on mesure l'érodibilité : « Il s'agit d'une jachère continue, cultivée dans le sens de la pente (vers le haut et vers le bas), qui antérieurement a été cultivée et maintenue dépourvue de végétation durant plus de 2 ans. Durant la période de mesure, la parcelle est labourée et placée dans les conditions d'un lit de semence conventionnel pour le maïs à chaque printemps et est travaillée selon les besoins pour prévenir le développement des adventices et la formation d'un encroûtement intense. » (WISCHMEIER et SMITH, 1978, p. 8.)

Transposée aux conditions des cultures tropicales, la parcelle standard, devrait être labourée à la houe sur 15 cm avant chaque saison culturale, homogénéisée, puis sarclée à la houe sur 5 cm chaque mois pour réduire la couverture végétale à moins de 5 % et fragmenter la croûte de battance éventuelle. En cas de besoin, il est conseillé d'utiliser un herbicide total (ROOSE, 1968)...

WISCHMEIER n'a jamais proposé un ratissage systématique après chaque averse pour éviter toute pellicule de battance ! Malgré un net effort de standardisation des protocoles, il reste donc une certaine hétérogénéité dans les résultats car le travail du sol améliore temporairement l'infiltration mais réduit la cohésion du matériau. *A priori* on ne sait qui va l'emporter de la réduction du ruissellement ou de l'augmentation de la charge solide (ROOSE, 1973).

Trois essais peuvent nous donner des indications sur ce problème.

TABLEAU III

Influence d'un léger ratissage sur l'indice K à la station de Nanisana (BAILLY *et al.*, 1976)

Influence of a light raking of the soil surface on the annual erodibility index at the Nanisana runoff plots (Madagascar)

| | Indice de pluie | K | | |
|------|-----------------|------|-------|-------|
| | | W1 | W2 | W3 |
| 1966 | 289 | 0,01 | - | - |
| 1967 | 334 | 0,05 | - | - |
| 1968 | 243 | 0,14 | Négl. | Négl. |
| 1969 | 247 | 0,20 | 0,13 | 0,12 |
| 1970 | 335 | 0,20 | 0,15 | 0,13 |
| 1972 | 711 | 0,11 | 0,07 | 0,08 |
| 1973 | 430 | 0,11 | 0,07 | 0,04 |
| | K max | 0,20 | 0,15 | 0,13 |
| | K médian | 0,11 | 0,10 | 0,10 |

1. A la station de Nanisana, les parcelles W1 et W2 ont fait l'objet d'un léger ratissage après chaque averse, contrairement à W3 labourée mais non ratissée.

— BAILLY *et al.* (1976) en ont conclu que l'érodibilité

de W3 (non ratissée) était plus faible que celle de W1 qui atteignait au bout de 4 ans des valeurs maximales nettement plus élevées (0,14 à 0,20) que W3 (0,13).

— Si, en revanche, on compare les valeurs médianes et les comportements des parcelles W2 (ratissée) et W3 (non ratissée) mises en place la même année, on observe des valeurs de K très voisines. La démonstration n'est donc pas nette !

2. Au centre ORSTOM d'Adiopodoumé, vers la même époque, une couple de parcelles d'érosion cultivées depuis plus de dix ans sur un sol ferrallitique sableux très désaturé et de 7 % de pente a été mise à nu pour évaluer l'effet d'un labour suivi ou non de binages mensuels. Le couvert végétal a été maintenu négligeable (< 5 %) à l'aide d'herbicide (voir tableau IV).

TABLEAU IV

Comparaison de l'érodibilité d'un sol soumis ou non à un sarclobinage mensuel (pente 7 %)

Adiopodoumé (ROOSE, 1973)

Comparison of the soil erodibility index of two runoff plots with or without monthly harrowing (Adiopodoumé : Southern Ivory Coast)

| | Rusa | labour seul (1) | labour puis binage mensuel (2) | Rapport 2/1 | |
|------|------|-----------------|--------------------------------|-------------|---------------|
| 1967 | 832 | 0,142 | 0,174 | 122 | |
| 1968 | 861 | 0,063 | 0,087 | 138 | |
| 1969 | 989 | 0,118 | 0,129 | 109 | Moyenne 121 % |

L'indice d'érodibilité d'une parcelle de sol ferrallitique sableux soumise à un binage superficiel tous les mois est en moyenne 21 % plus élevé qu'en absence de ce travail régulier mais l'écart est variable d'une année à l'autre. Cette valeur ne peut être généralisée à tous les types de sols sans vérification expérimentale, mais donne un ordre de grandeur de l'erreur à laquelle on peut s'attendre si on ne travaille pas le sol.

3. A la station de Bouaké, une troisième expérimentation sur l'influence des techniques culturales fut mise en place par l'IRAT à la station de Bouaké sur quatre parcelles d'érosion de 4 % de pente sur un sol ferrallitique rajeuni comportant des gravillons et des graviers (10 à 30 % en surface, plus de 60 % vers 40 cm). Comme le sol a été maintenu dénudé, on peut calculer l'indice K pour chaque année (voir tableau V).

La parcelle témoin (labour + pulvérisage) et la parcelle labourée se comportent comme un sol gravillonnaire (K faible et décroissant lentement) ; en effet le labour remonte en surface des graviers que l'érosion sélective concentre en surface comme un mulch.

TABLEAU V

Evolution de l'indice Kusa d'érodibilité du sol en fonction des techniques culturales : labour à 25 cm, labour plus pulvérisation aux disques, pulvérisation seule et sol non travaillé (d'après KALMS, 1975)

Evolution of the soil erodibility index of a gravelly sandy clay ferrallitic soil in relation with cultural practices : plowing up to 25 cm ; plowing and then pulverization ; pulverization alone, zero tillage

| | Rusa | Labour | Labour. + Pulvérisation | Pulv. | Non travail |
|---|------|--------|-------------------------|-------|-------------|
| 1971 | 523 | 0,02 | 0,04 | 0,03 | - |
| 1972 | 329 | 0,08 | 0,04 | 0,10 | 0,07 |
| 1973 | 352 | 0,06 | 0,03 | 0,18 | 0,15 |
| 1974 | 464 | 0,03 | 0,03 | 0,12 | 0,15 |
| Teneur en éléments grossiers en 1974 sur 5 cm | 28 % | | 22 % | 13 % | 10 % |

En revanche sur les parcelles non travaillées ou seulement pulvérisées en surface, l'indice d'érodibilité augmente significativement au fil des années ($K = 0,03$ à $0,12-0,18$) car le taux d'éléments grossiers reste plus faible.

En conclusion, la préparation du lit de semence et les sarclages superficiels ultérieurs influencent l'état de la surface du sol, donc sa capacité d'infiltration et aussi son érodibilité. Leur influence est variable dans le temps et selon le type de sol. L'érodibilité n'est donc pas entièrement dépendante des propriétés intrinsèques du sol mais aussi des effets variés des techniques culturales : ceci justifie la tentative de ELWELL (1978) de grouper sous un même indice d'érodibilité les interactions entre les propriétés intrinsèques du sol et leur évolution sous l'influence des techniques culturales.

3.3. L'érodibilité des sols : une variable peu dépendante de la pente

Dans la définition de la parcelle standard, WISCHMEIER a bien précisé qu'il fallait choisir une pente homogène (ni concave, ni convexe) de 9 % d'inclinaison et de 22,13 m de long.

Cependant très peu de chercheurs ont précisé le profil topographique de leurs parcelles, ni vérifié leur évolution en cours d'essais. Or ce profil devient souvent concave après quelques années, puisque l'essentiel de l'érosion se forme au milieu de la parcelle, les extrémités étant figées. C'est pourquoi le protocole adapté aux régions tropicales prévoit chaque année au moins un labour suivi d'un planage pour rétablir l'homogénéité de la pente. Mais cette évolution des parcelles d'éro-

sion vers une forme concave est l'une des causes de diminution de K après quelques années.

Comme il a fallu choisir pour chaque sol la pente caractéristique, généralement différente des 9 % prévus aux USA, il faut vérifier que la correction des pertes en terre par le facteur topographique « SL » n'interfère pas trop systématiquement sur l'indice d'érodibilité (voir tableau VI).

TABLEAU VI

Influence de l'inclinaison sur l'indice d'érodibilité d'un sol ferrallitique sableux très désaturé : Adiopodoumé 1968-1972
Influence of slope gradient on the erodibility index of a sandy clay ferrallitic soil (ultisoil)
(Adiopodoumé, Southern Ivory Coast)

| | | Kusa annuel d'après les mesures d'érosion sur parcelles de 15 m de long | | | |
|----------|------|---|-------------|-----------|--------------|
| | | Rusa | Pente 4,5 % | Pente 7 % | Pente 23,3 % |
| SL | | | 0,3286 | 0,5748 | 3,8141 |
| 1968 | 861 | 0,054 | 0,063 | 0,085 | |
| 1969 | 989 | 0,101 | 0,118 | 0,067 | |
| 1970 | 1251 | 0,094 | 0,106 | 0,070 | |
| 1971 | 821 | 0,096 | 0,131 | 0,112 | |
| 1972 | 818 | 0,081 | 0,113 | 0,059 | |
| Moyennes | | | 0,085 | 0,106 | 0,079 |

On peut constater au tableau VI que sur le sol ferrallitique sableux très désaturé, il n'y a effectivement pas eu de grosses différences systématiques entre les valeurs annuelles de K obtenues sur trois pentes différentes après correction par le facteur topographique prévu par WISCHMEIER. De plus, les différences entre pentes sont inverses d'une année à l'autre et elles sont souvent moins importantes que celles qu'on observe sur la même parcelle d'une année à l'autre.

Cependant, il est rare de trouver des sols aussi homogènes le long d'une toposéquence et il est vraisemblable que l'effet de la pente diffère d'un sol couvert d'un épais horizon humifère sableux à un sol très argileux dès la surface.

L'effet de la longueur de pente est un autre point délicat de l'USLE. Bien que WISCHMEIER ait constaté que l'effet de la longueur de pente varie en fonction des états de surface, il a adapté une valeur moyenne ($E = f L^{0,5}$). Nous nous sommes donc efforcés depuis 1968 à comparer des pentes proches de 22 m de long plutôt que de les faire décroître quand les pentes sont plus raides (suivant l'équation de RAMSER).

VALENTIN (1979) et LAFFORGUE ont monté à Adiopodoumé une expérience intéressante avec le simulateur

TABLEAU VII

Evolution de l'érosion en fonction de la longueur de pente

Adiopodoumé : sol ferrallitique très désaturé sablo-argileux, pente de 6 %, sol nu sur ancienne prairie retournée
simulation de douze averses totalisant 1 151 à 1 161 Rusa d'après VALENTIN (1979)*Runoff, turbidity and erosion as a function of the slope length. Adiopodoumé, 6 % slope on broken grassland. Simulation of 12 rainstorms of Rusa similar to average yearly Rusa*

| Longueur de pente mètres | Coefficient de Ruissellement KR % | Turbidité g/litre | Erosion T/ha | SL |
|-----------------------------|---|----------------------|-----------------|-------|
| 1 | 27 | 4,9 | 8,0 | 0,095 |
| 2 | 29 | 10,4 | 8,6 | 0,117 |
| 5 | 23 | 11,8 | 11,3 | 0,155 |
| 10 | 20 | 27 | 13,7 | 0,190 |

K = 0,03 quelle que soit la longueur de pente.

Mais $E = f(L^{0,3})$ l'érosion croît moins vite que prévu par l'USLE.

de pluies type Swanson pour voir l'impact de la longueur de pente (1, 2, 5, 10 m) sur le ruissellement et l'érosion sur une vieille prairie récemment retournée, de 6 % de pente (voir tableau V).

Une série de douze averses simulées d'intensité (60, 90, 120 mm/h) et de caractéristiques variées totalisant un indice d'érosivité ($R = 1\,151$ à $1\,161$) voisin de l'indice annuel ($R = 1\,260$) ont permis de déterminer un indice d'érodibilité $K = 0,03$ constant, mais légèrement inférieur aux valeurs obtenues sur les parcelles d'érosion voisines ($K = 0,05$ à $0,17$; ROOSE, 1973). Ce résultat semble raisonnable puisque la prairie vient d'être retournée et les matières organiques ne sont pas encore stabilisées (3 années de culture réglementaires après défrichement). Cet indice d'érodibilité s'avère constant pour les pentes variant de 1 à 10 m, mais les pertes en terre pour ce sol très sableux en surface croissent moins vite $E = f(L^{0,3})$ que prévu par WISCHMEIER $E = f(L^{0,5})$.

Avec le petit simulateur de l'ORSTOM couvrant 1 m^2 , la valeur de K est nettement sous-estimée ($K = 0,016$). D'après VALENTIN (1979), il faut y voir moins l'effet d'une pente trop courte qu'un nombre trop réduit d'averses. ROOSE a constaté sur sols limoneux en France qu'à l'échelle du m^2 on observe bien la dynamique de l'infiltration, mais assez mal l'érosion, car les phénomènes de battance, microravinement et micro-sédimentation entre les mottes sont trop dépendants des états de surface lors de la préparation du sol avant la série de tests. Sur beaucoup de parcelles de culture, les rigoles ne se développent qu'au bout de quelques mètres ou dizaine de mètres de circulation des eaux. Les expé-

rimentations au minisimulateur de pluie offrent donc plus qu'un simple test de battance du sol mais les filets d'eau n'ont pas encore assez de vitesse et d'énergie au bout d'un mètre pour entailler la surface du sol et cisailier les mottes comme sur les champs.

En conclusion, sur le sol sableux d'Adiopodoumé, la pente (%) et longueur au-delà de 2 m) semble peu modi-

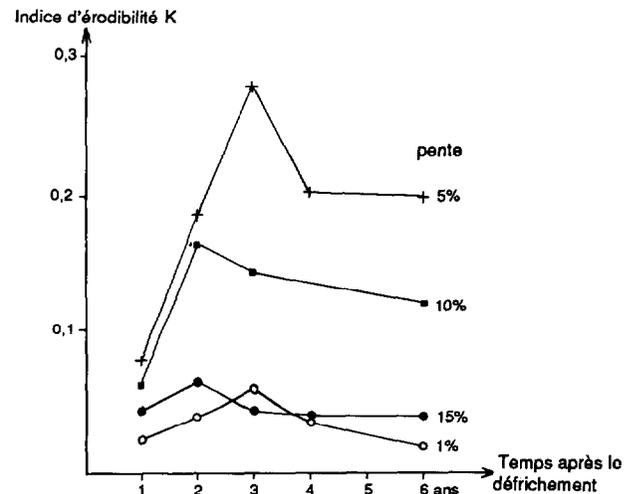


FIG. 2. — Evolution de l'indice d'érodibilité (K) d'un sol ferrallitique de la station IITA à Ibadan, Nigeria en fonction de la pente et des années (d'après LAL, 1981).

Evolution of a ferrallitic soil erodibility in relation with slope gradient and time after forest removal (LAL, 1981).

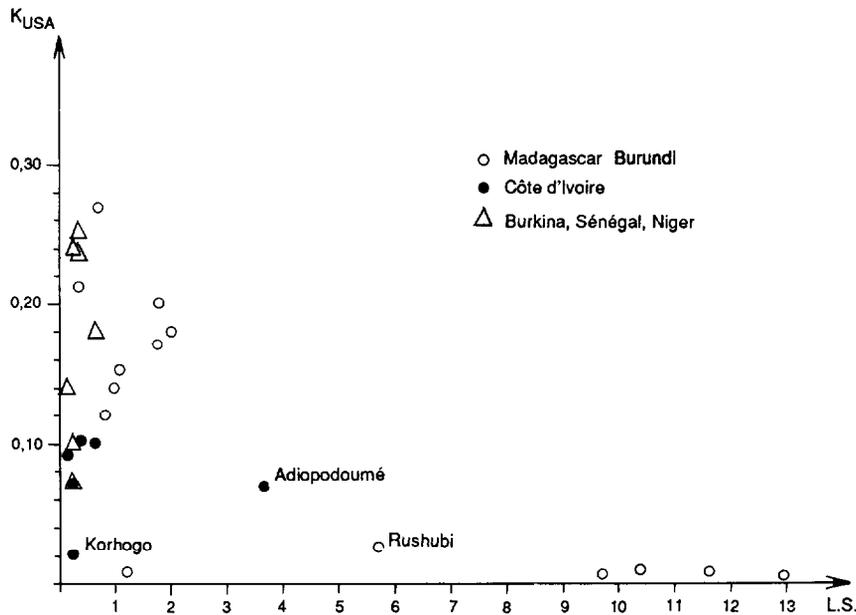


FIG. 3. — Indice d'érodibilité du sol (Kusa) en fonction de l'indice topographique SL de WISCHMEIER et SMITH (1978).
Erodibility index in relation with the topographic factor S.L. after WISCHMEIER and SMITH, 1978.

fier l'indice d'érodibilité du sol, à condition de corriger les pertes en terre par le facteur topographique établi par WISCHMEIER. Mais rien n'indique qu'il en est de même ailleurs. Sur une toposéquence de sols ferrallitiques à charge graveleuse de la station IITA d'Ibadan au Nigeria (Paleustalf) LAL a montré que, si la première année l'indice était faible ($K = 0,02$ à $0,07$) sur toutes les pentes (1 à 15 %), il évolue très différemment les années suivantes surtout pour les sols de 5 à 10 % de pente peu chargés en gravier (fig. 2).

A la figure 3, on a simplement transcrit les indices Kusa trouvés pour des parcelles dont l'indice topographique augmente. Il apparaît clairement que les sols les plus fragiles ($K = 0,10$ à $0,27$) sont tous groupés vers les indices topographiques faibles (souvent inférieurs à 1) : en revanche, les indices topographiques forts sont associés à des sols très résistants. Ceci est conforme aux principes géomorphologiques selon lesquelles les matériaux géologiques résistants dominent les paysages (et sont associés aux fortes pentes) tandis que les matériaux fragiles sont rapidement évacués et forment les plaines ou des zones dominées... (avec le temps !). Korhogo fait exception car la parcelle est peu érodible étant située sur un glaciais gravillonnaire peu pentu. Nous ignorons pourquoi la parcelle de Sirgui, sur une pente de 0,8 % ($SL = 0,1$) d'un champ de case cultivé depuis des dizaines d'années est si érodible ($K = 0,50$!) : il est pourtant gravillonnaire et riche en fer et argile et les sols

bruns eutrophes sont réputés pour leur stabilité structurale favorable.

En conclusion, si la correction des pertes en terre par l'indice topographique ne semble pas trop modifier l'indice d'érodibilité (tout au moins pour le sol ferrallitique sableux testé), on observe que les sols les plus fragiles sont associés aux pentes faibles et les sols les plus résistants aux pentes fortes.

3.4. L'érodibilité des sols en fonction du climat

L'indice d'érodibilité du sol pourrait être influencé soit par le type de climat qui détermine en partie le mode d'altération et de pédogenèse, soit par l'indice d'érosivité climatique qui intervient dans le calcul de l'indice K.

La figure 4 montre qu'il n'y a pas de relation directe entre les indices K et R : cependant il est possible de distinguer les ensembles « R, climat, érodibilité du sol » suivants :

- climats très humides — R supérieur à 750- K faible ($0,01$ à $0,1$) et sols ferrallitiques,
- climats tropicaux d'altitude et climats soudano-guinéens — R de 500 à 1 200- K faible à moyen ($0,03$ à $0,20$) et sols ferrallitiques ou graveleux),
- climats soudano-sahéliens — R = 200 à 450-, K moyens ($0,14$ à $0,24$) et sols ferrugineux ou sols bruns + vertisols.

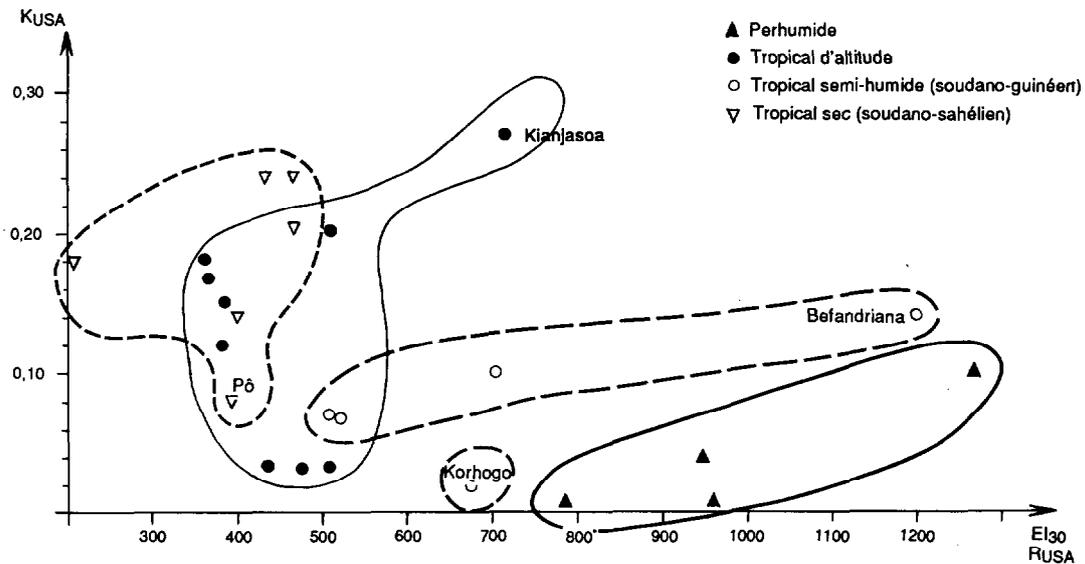


FIG. 4. — Indice d'érodibilité du sol (Kusa) en fonction du climat et de l'indice d'érosivité climatique EI30 de WISCHMEIER et SMITH (1978).

Erodibility index in relation with the climate and the erosivity index EI30 (after WISCHMEIER and SMITH, 1978).

Les résultats de Sirgui, Kianjasoa et Befandriana Nord sont nettement différents des ensembles « climat-sol » concernés : les forts taux d'érosion concernés proviennent peut-être d'une situation topographique particulière entraînant un ruissellement abondant dont l'énergie vient s'ajouter à celle des pluies. A Korhogo l'influence prépondérante de la couche gravillonnaire protectrice est évidente.

3.5. L'érodibilité des sols, une variable en fonction de leurs différents types

On ne peut pas dire que les sols tropicaux soient en général plus résistants à l'érosion pluviale que les sols tempérés, car de part et d'autre on observe une grande variabilité. De même il n'y a pas de relation stricte entre les grandes classes de sols (des différentes classifications) et leur érodibilité, car les classifications n'ont pas été basées sur les critères qui influencent l'érodibilité des sols. Tout au plus peut-on trouver des liens au niveau des familles de sols qui se distinguent par leur texture et la roche d'origine (El SWAIFY *et al.*, 1982).

On constate cependant que la plupart des sols tropicaux testés sont stables les deux premières années après leur défrichement (ROOSE, 1980). En général les *sols ferrallitiques*, pauvres en limons, riches en fer et alumine libres, quelquefois en gravillons et/ou en graviers de quartz, ont une structure stable et une grande capacité d'infiltration : ils sont assez résistants à très résistants

($K < 0,20$). Seul le sol ferrallitique rouge de Kianjasoa sur le plateau malgache est nettement plus érodible (K Maxi = 0,38 ; K Médian = 0,27) : il aurait été recouvert à plusieurs reprises de fines poussières volcaniques de la taille des limons, selon P. ROCHE (communication orale).

Après deux années de culture, les *sols ferrugineux tropicaux lessivés* ou appauvris sont nettement plus fragiles ($K = 0,2 - 0,3$) que les sols ferrallitiques. Ils sont très pauvres en matières organiques ($MO = 0,5$ à $1,5 \%$), riches en limons et sables très fins ; l'horizon superficiel est instable, battant, encroûté, très dur en saison sèche mais vite boueux en saison des pluies. Le sol ferrugineux des parcelles de Befandriana Nord, assez résistant ($K = 0,14$), serait en fait un sol ferrallitique peu battant selon DE BOISSEZON (communication orale, 1989). Le sol ferrugineux peu lessivé sur dune (Oursi) semble très perméable et assez résistant à l'érosion pluviale (mais sensible à l'érosion éolienne).

Les *vertisols* et les *sols bruns vertiques* s'ils sont *lithomorphes*, c'est-à-dire situés sur une roche mère riche en ferromagnésiens, ces sols sont bien structurés et très résistants à l'érosion pluviale ($K = 0,10 - 0,15$). En revanche les *vertisols topomorphes* mal drainés sont moins bien structurés et sujets à la battance. Tous ces sols à argile gonflante sont très sensibles au ruissellement et à l'érosion ravinante dès qu'ils sont engorgés et que leurs fissures profondes se sont refermées.

Aucun indice n'explique la raison de la forte érodibilité du sol brun eutrophe sur roche verte de Sirgui sinon la présence d'une cuirasse peu perméable à faible profondeur (communication orale de MIETTON, mai 1989). LEPRUN *et al.* (1986) ont trouvé des résultats du même ordre sur les latosols, les régosols et les sols podzologiques rouge-jaune du Brésil ($K = 0,08$ à $0,20$). En revanche les « terra rossa » seraient plus sensibles ($K = 0,20$ à $0,30$).

El SWAIFY *et al.* (1982) insistent sur la grande variabilité de l'indice d'érodibilité des sols classés d'après la taxonomie américaine. Par exemple les ultisols sont généralement classés comme des sols très résistants, mais POPENHOE (1976) et PLA (1977) trouvent que l'érodibilité des ultisols d'Amérique centrale et du Venezuela varie des plus résistants aux plus sensibles : il en est de même aux USA (WISCHMEIER et SMITH, 1978). Mais on trouve un accord plus général pour dire que, des oxisols très bien agrégés, aux vertisols argileux et aux alfisols à structure fragile, l'indice d'érodibilité de ces ordres passe de faible à modéré puis à élevé. S'il est si difficile d'y voir clair c'est peut-être aussi parce que les chercheurs utilisent des classifications différentes, ou ne maîtrisent pas parfaitement les classifications, mais s'abstiennent de joindre une description complète du profil et des caractéristiques physico-chimiques importantes.

Une autre source d'erreur pourrait être le calcul erroné des indices d'érosivité des pluies, de la topographie ou de l'observation de pertes en terre collectées sur des parcelles trop petites, pendant des périodes trop courtes, avec des averses et des états de surface non représentatifs des situations régionales.

ONSTAD *et al.*, au Kenya, ont évalué l'indice Kusa = $0,24$ pour un alfisol de Katumani (probablement un sol ferrugineux tropical lessivé).

Au Nigeria, LAL (1981) puis VANELSLANDE *et al.* (1984-85) obtiennent sur parcelles d'érosion des valeurs de K variant de $0,03$ à plus de $0,20$ en fonction des années, de la pente et des sols (ultisols, oxisols, alfisols).

Signalons enfin l'importance des phénomènes d'érosion (nappe, rigole, ravine ou glissements) fréquemment observés sur les terres issues de marnes, de schistes micassés, de grès fins peu consolidés de gneiss et de basaltes : les sols issus de leurs altérites riches en limons et sables fins sont souvent profondément érodés dès qu'ils sont dénudés pour la culture.

3.6. Comparaison de l'indice d'érodibilité calculé à partir des mesures sur parcelles à l'indice K estimé à partir des caractères analytiques

Etant donnée l'insuffisance des tests actuels d'érodibilité d'une part, la durée, le coût et la difficulté des

mesures directes de l'érosion sous pluies naturelles ou simulées d'autre part, de nombreux chercheurs ont tenté d'établir des corrélations entre l'érodibilité des sols testés et leurs caractéristiques analytiques et/ou morphologiques : leurs résultats n'ont souvent qu'une valeur régionale.

Ainsi DUMAS (1965) a montré qu'il était possible d'estimer la sensibilité à l'érosion des sols tunisiens testés sous pluies simulées à partir du taux pondéral de cailloux ($d > 0,5$ mm) dans les cinq premiers centimètres (= X_1), du taux de matières organiques (= X_2) et de l'humidité équivalente (X_3) (fig. 5).

$$\log 1\ 000\ K = 3,4623 - 0,1695\ X_2 - 0,0214\ X_3 - 0,0282\ X_1$$

$$(R_2 = 88\ \%)$$

La majorité de la variance (69 %) est expliquée par le taux de cailloux de ces sols peu évolués ou calcimorphes (rendzimes, sols bruns calcaires ± vertiques). Cette régression multiple, valable dans certaines conditions méditerranéennes dominées par le rôle du calcaire (sols floculés, souvent riches en cailloux) s'applique mal aux zones tropicales humides (autres types d'argile, milieu acide, rôle des R_2O_3).

Aux USA, WISCHMEIER *et al.* (1969, 1971, 1978) s'appuyant sur de longues séries de mesures d'érosion sur 55 sols de référence ont conclu que l'érodibilité de ces sols est dépendante avant tout du taux de limon et de sables très fins (2 à 100 microns) et de leur interaction avec le taux d'argile ou de sables (indifféremment), puis du taux de matières organiques (fig. 6). Secondairement, interviennent des corrections (de 0,03 unités par différence de classe) en relation avec la morphologie des profils (déviations par rapport à la moyenne de quatre classes de structure de l'horizon superficiel et six classes de perméabilité du profil). Après des études sur plus de vingt-trois paramètres, WISCHMEIER, JOHNSON et CROSS (1971) ont finalement proposé le nomogramme suivant l'équation :

$$100\ K = 2,1\ (M^{1,14} \cdot 10^{-4})\ (12\ -a) + 3,25\ (b-2) + 2,5\ (C-3)$$

où $M = \%$ (2 à 100 microns) \times $\%$ (100 à 2 000 microns)

$a = \%$ de matières organiques, $b =$ cote de structure de l'horizon superficiel, $C =$ classe de perméabilité du profil.

Dans 95 % des cas, les estimations de K sur les horizons de surface diffèrent de moins de 0,04 de l'indice calculé. Pour les horizons profonds mis à nu, ROTH, NELSON et ROMKEN (1974) ont remplacé le taux de matières organiques par les teneurs en sesquioxydes de fer et d'alumine et en S_1O_2 . Si le sol comporte des éléments grossiers, il faut apporter une correction (C') semblable à celle du couvert d'un mulch de paille.

| taux de cailloux | C' |
|------------------|------|
| 10 ‰ | 0,77 |
| 20 ‰ | 0,60 |
| 30 ‰ | 0,48 |
| 40 ‰ | 0,37 |
| 60 ‰ | 0,22 |
| 80 ‰ | 0,10 |
| 100 ‰ | 0,03 |

La réduction de l'érosion est très rapide pour les premiers ‰ de sol couvert par les cailloux (voir fig. 7), comme la majorité des analyses font l'impasse sur ce terme, on comprend qu'il y a là une raison qui explique le désaccord de certains résultats avec le nomogramme de WISCHMEIER. BOLLINNE et ROSSEAU (1978) ont bien fait ressortir l'importance relative des différents facteurs de ce modèle :

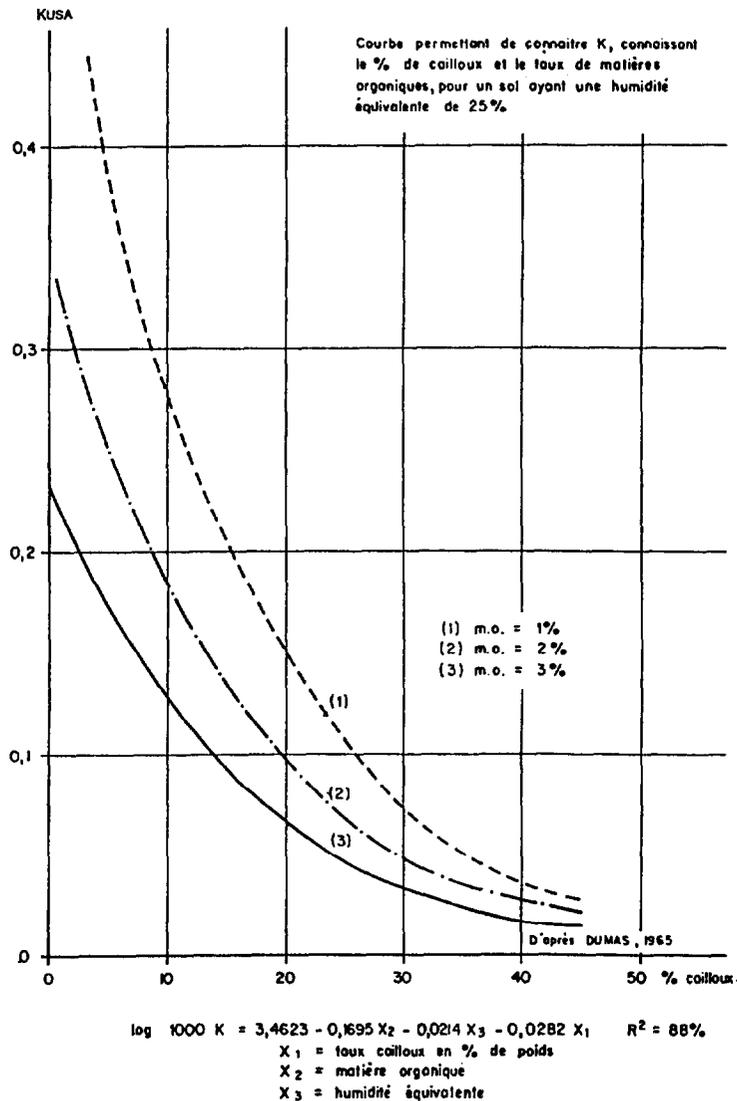


FIG. 5. — Influence des taux de cailloux (en poids dans les 5 cm supérieurs) et de matières organiques (‰) sur l'érodibilité (Kusa) de sols tunisiens (d'après DUMAS, 1965).
Influence of gravel rate (weight ‰ in the 5 cm topsoil) and organic matter (‰) on erodibility index (Kusa) of tunisian's soils (after DUMAS, 1965).

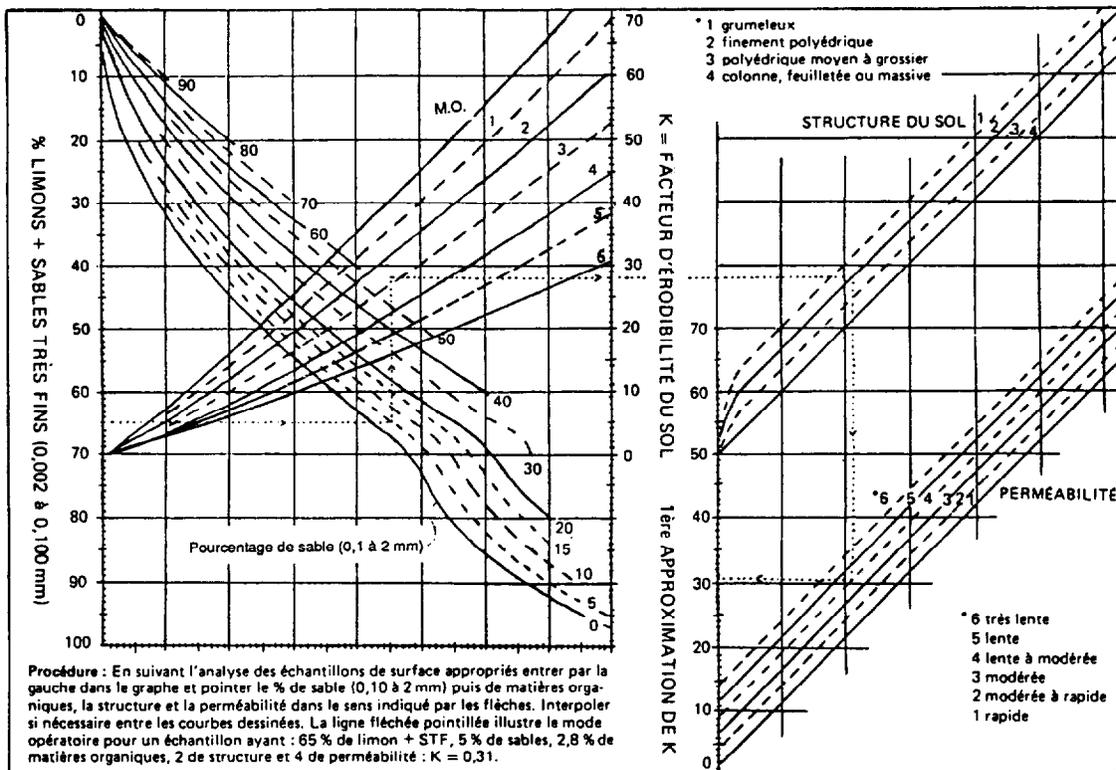


FIG 6. — Nomogramme permettant une évaluation rapide du facteur K d'érodibilité des sols (d'après WISCHMEIER, JOHNSON et CROSS, 1971).

Nomogram giving a first evaluation of the erodibility index Kusa (after WISCHMEIER, JOHNSON and CROSS, 1971).

K diminue de :

- 0,05 % si la teneur en silt diminue de 5 % ;
- 0,02 si le taux de matière organique croît de 1 % sur argile ou sur sable ;
- 0,05 si le taux de matière organique croît de 1 % sur limon ;
- 0,03 si on améliore la structure ou la perméabilité d'une classe ;
- 0,23 si on trouve 10 % de cailloux !

Nous n'avons malheureusement pu retrouver certaines analyses des sols et les descriptions des profils que pour une douzaine de parcelles avant l'expérimentation ; il nous manque le suivi analytique nécessaire à l'interprétation fine des variations dans le temps de l'indice d'érodibilité.

Dans dix cas sur douze, la valeur de k estimée sur le nomogramme à partir de la texture et des matières organiques diffère de moins de 0,04 unités, (après correction due au taux pondéral des graviers > 5 mm) : il s'agit essentiellement de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux (oxisols, ultisol, alfisol) mais aussi d'un vertisol lithomorphe.

Le cas du sol ferrallitique de Manankazo est particulier puisque durant les cinq premières années, l'indice K estimé (0,03) est conforme à l'érodibilité très faible observée ($K = 0,001$ à $0,03$). Mais nous ne disposons pas des analyses de l'horizon de surface qui a donné lieu à une brusque augmentation de K (0,19 à 0,24) au bout de six années de mesure après un cyclone. A Ambatomainty en revanche l'indice estimé est plus faible ($K = 0,11$) que l'indice mesuré ($K_{Med} = 0,17$) : il faudrait probablement péjorer la valeur estimée à partir de la texture pour tenir compte d'une dégradation de la structure de l'horizon superficiel ou d'un horizon profond du sol.

D'autres auteurs ont trouvé des valeurs nettement moins concordantes (VANESLANDE *et al.*, 1984-85). Dans bien des cas, ce n'est pas étonnant car on compare une valeur de K du nomogramme ajustée une fois pour toute à partir de longues séries d'observations de terrain aux Etats-Unis, à des K évalués au cours d'une ou deux pluies simulées sur le terrain (pente trop courte), en laboratoire (terre remaniée, profil réduit à 10 cm) ou, dans le meilleur des cas, à de trop brèves périodes

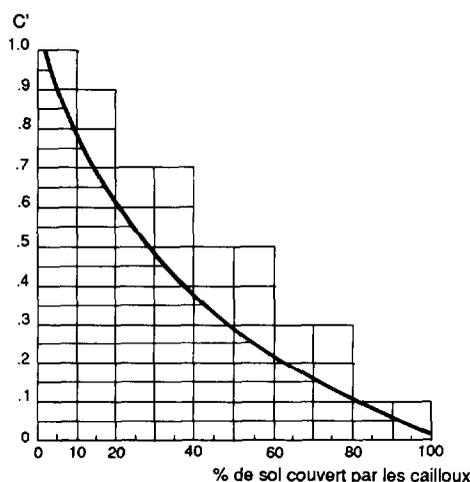


FIG. 7. — Influence des cailloux (C' = % de surface du sol couverte par les cailloux) sur l'indice d'érodibilité des sols (Kusa de WISCHMEIER et SMITH, (1978).

Influence of gravel rate (% of the soil covered by gravels) on erodibility index Kusa (after WISCHMEIER and SMITH, 1978).

de mesure en parcelles (\pm standard) (de 1 mois à 3 ans) qui ne respectent pas assez la variabilité des conditions de surface du sol, des types d'averse et d'engorgement du profil caractéristiques d'une région. Peu nombreux sont les essais qui respectent la période préalable de deux ans sans enfouissement de matières organiques. Par ailleurs, certains sols ont des propriétés inconnues dans

les sols testés initialement (ex. : sols volcaniques à structure hydrophobe irréversible après dessiccation). EL SWAIFY (1982) critique à juste titre l'extrapolation sans précaution des variables testées sur des sols des régions tempérées américaines à des sols tropicaux du monde où ces variables peuvent prendre des valeurs bien plus élevées. Par exemple le nomogramme a été testé sur des sols où les matières organiques varient de 0,9 à 3 % tandis que sur certains sols tropicaux elles peuvent varier de 0,4 à plus de 10 %. De même le taux d'argile des sols testés varie de 4 à 45 % alors qu'il peut atteindre 88 % dans certains sols de Hawaï. De plus, il faudrait tenir compte de l'évolution des sels solubles, des cations adsorbés (en particulier du Na et du Ca), des oxydes de fer, d'alumine et de silice solubles et du type d'argile, qui, dans les sols tropicaux, jouent un rôle important dans la stabilité structurale (SINGER *et al.*, 1978).

Enfin, l'érodibilité est supposée être un caractère constant, spécifique d'un type de sol (WISCHMEIER *et al.*, 1971). Or les résultats exposés, et ceux de la littérature (EL SWAIFY *et al.*, 1982), montrent clairement que l'érodibilité d'un sol varie dans le temps et dans l'espace en fonction des propriétés dynamiques du sol et des techniques culturales. Il faudrait donc prévoir un modèle où l'érodibilité du sol évoluerait avec les propriétés du sol susceptibles d'évoluer, en particulier les différents paramètres structuraux et les composants des matières organiques.

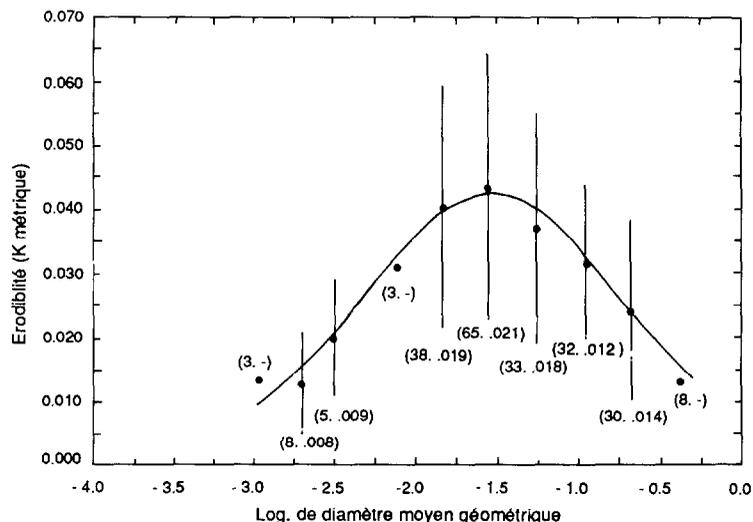


FIG. 8. — L'indice d'érodibilité (K métrique) en fonction du diamètre moyen géométrique des particules de l'horizon superficiel (ROMKENS, POESEN, WANG, 1988).

The soil erodibility factor as a function of the mean geometric particle diameter (ROMKENS, POESEN, WANG, 1988).

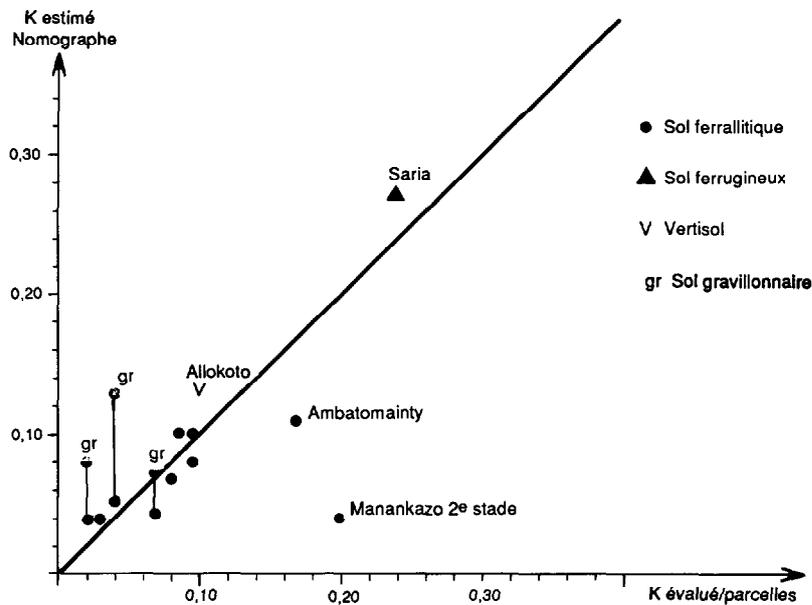


FIG. 9. — Relation entre l'indice d'érodibilité mesuré aux champs et l'indice estimé à partir du nomogramme de WISCHMEIER *et al.*, (1971).
Relation between the erodibility index measured on the field and the index evaluated from the nomogram of WISCHMEIER et al., 1971.

Signalons pour terminer, la possibilité d'estimer le facteur K d'érodibilité des sols à partir du diamètre moyen géométrique (DG) des particules de l'horizon de surface (ROMKENS *et al.*, 1988) (fig. 8). Bien que la variance soit forte autour de la moyenne, cette corrélation calculée pour 223 sols tirés de la littérature permet de se faire une première idée de l'érodibilité d'un sol, à partir de sa texture.

On peut remarquer sur la figure 8 que les sols argileux, bien structurés, sont assez résistants, de même que les sols très sableux généralement très perméables. Les sols limoneux ou finement sableux sont les plus fragiles face à la battance des pluies, mais leur érodibilité est la plus variable (en fonction de la structure, des matières organiques, de leur état de surface, du drainage, etc.). Ceci confirme bien les conclusions du nomogramme de WISCHMEIER, JOHNSON et CROSS (1971).

Curieusement l'inclusion du taux de matières organiques et du type d'argile n'a guère amélioré la précision de leur analyse en composantes principales :

$$K = 0,0034 + 0,0387 \exp \frac{[-0,5 \log DG + 1,533]^2}{0,7671}$$

$$\text{où } DG \text{ (mm)} = \exp 0,01 \sum^n f_i \ln mi$$

$$= \pm 1$$

où f_i = le % en poids d'une fraction granulométrique

mi = la moyenne arithmétique des limites de la classe texturale

n = le nombre de classes texturales.

4. L'ÉRODIBILITÉ DES SOLS TROPICAUX ET LA LUTTE ANTIÉROSIVE

L'érodibilité des sols tropicaux testés varie de 0,01 à 0,30 après quelques années de culture : la marge de manœuvre est donc étroite.

Tant qu'il reste des réserves de terre, l'aménagiste peut choisir les sols les plus résistants et les plus profonds pour les cultures sarclées, et maintenir les terres fragiles sous couvert permanent : c'est l'objectif des cartes de potentialité des terres.

Mais sous la pression démographique, les cultures s'étendent sur des terres de plus en plus fragiles. On observe alors une minéralisation rapide des matières organiques des sols et une dégradation inexorable de leurs propriétés physiques, en particulier de leur capacité d'infiltration et de leur résistance à l'énergie des pluies et du ruissellement. Dans la plupart des cas on passe brutalement d'un milieu naturel ± dégradé, où le ruissellement et l'érosion sont modestes, à des terrains massacrés lors du défrichement... ou dégradés progressivement après 2 à 10 ans de culture, où le ruissellement peut atteindre de 5 à 40 % et l'érosion de une à plusieurs centaines de tonnes/ha/an.

La lutte antiérosive passe par la mise au point d'un système cultural conservatoire réduisant au minimum le ruissellement (sol couvert, rugueux, éviter la pulvérisation aux disques, effet temporaire du travail du sol, billonnage cloisonné sur faible pente, sous-solage des sols encroûtés) et favorisant la résistance à l'agressivité des pluies (matières organiques, CaCO_3). L'action favorable des apports de matières organiques sur la structure est bien connue (voir 3.3, 3.6) mais un gain de 1 % de matières organiques dans l'horizon labouré n'entraîne qu'une faible diminution de l'érosion (2 à 5 % selon la texture) : or c'est une opération de longue haleine surtout en région tropicale où la minéralisation est très active et où la biomasse disponible sous culture est réduite (1 à 5 t/ha/an) et souvent utilisée par ailleurs (fourrage, artisanat, énergie domestique).

Si l'essentiel de la lutte en vue de réduire l'érodibilité des sols consiste à gérer la biomasse disponible, en particulier les résidus de culture, ce n'est pas en les brûlant, ni même en les enfouissant profondément pour améliorer la structure qu'on obtiendra la plus forte réduction des risques érosifs, mais en les maintenant à la surface du sol (voir tableau VIII) : c'est là que s'exerce l'agressivité des pluies et du ruissellement (ROOSE, 1980) ! D'où l'efficacité remarquable des mulchs de paille ou de pierres : 20 % de surface couverte réduisent l'érosion de 40 % (voir fig. 7). Il n'est donc pas étonnant que les sols gravillonnaires ou graveleux soient très résistants à l'érosion : d'ailleurs des techniques ont été mises au point pour cultiver la vigne et diverses cultures pérennes sous une couche de pierres en région méditerranéenne.

TABLEAU VIII

Erosion (t/ha) sur sol nu, sous ananas en fonction de la pente (%) et des techniques d'utilisation des résidus de culture (Adiopodoumé 1975-1976) (ROOSE, 1980)

Soils losses (t/ha) on 12 runoff plots bare or cultivated with pineapple with residues burnt, plowed in or mulched. Effect of slope gradient

| PLUIE/16 mois H = 3 336 mm | Sol nu labouré | ANANAS + RESIDUS | | | MOYENNE pour chaque pente | |
|-----------------------------------|-------------------|------------------|---------|------------|---------------------------------|-------|
| | | Brûlés | Enfoués | En surface | | |
| Pentes | 4 % | 45 | 1.2 | 0.7 | 0.1 | 11.8 |
| | 7 % | 136 | 4.1 | 0.8 | 0 | 35.2 |
| | 20 % | 410 | 69 | 33.2 | 1 | 128.3 |
| Moyenne pour chaque traitement | | 197 | 24.8 | 11.5 | 0.4 | 58.4 |

Le travail du sol produit une macrostructure instable qui augmente temporairement l'infiltration, mais réduit la cohésion du matériau et peut créer des discontinuités hydrauliques (fond du labour) : il peut donc aug-

menter l'érodibilité du sol et doit être combiné à l'enfouissement de matières stabilisantes (matières organiques et chaux) et à une culture couvrant rapidement le sol. Le travail localisé aux dents exige moins d'énergie que le labour et peut être réalisé plus tôt. Le sous-solage peut améliorer l'infiltration, mais il ne se justifie, économiquement, que pour rompre des couches encroûtées du sol situées à faible profondeur. Il faut éviter le pulvérisage aux disques qui accélère la formation de croûtes de battance. Plus on travaille le sol et plus il devient sensible à l'érosion (LEPRUN *et al.*, 1986).

CONCLUSION

Depuis une vingtaine d'années les instituts du CIRAD et l'ORSTOM ont géré un réseau de parcelles d'érosion en huit pays d'Afrique, de Madagascar et de Guyane en vue d'estimer l'indice d'érodibilité de divers sols tropicaux. L'analyse des résultats, incomplète par manque de suivi analytique des parcelles, montre que les deux premières années de culture, tous ces sols sont très résistants ($K = 0,01$ à $0,1$). Ensuite, les sols ferrallitiques ($K = 0,01$ à $0,2$) sont généralement plus résistants à l'érosion pluviale que les sols bruns entrophes et les vertisols ($K = 0,1$ à $0,2$) et *a fortiori* que les sols ferrugineux tropicaux lessivés ($K = 0,2$ à $0,3$). La variabilité de la sensibilité à l'érosion des sols tropicaux est importante ($K = 0,01$ à $0,3$) mais en général plus faible que celle des sols tempérés ($K = 0,03$ à $0,70$). Contrairement à une opinion bien établie, bien des sols tropicaux sont donc moins sensibles mécaniquement à l'érosion pluviale que des sols bruns lessivés sur loess des régions tempérées. Les phénomènes d'érosion y sont très développés parce que les pluies sont beaucoup plus agressives ou les sols dénudés.

L'indice d'érodibilité est assez variable dans le temps en fonction des saisons mais aussi de l'évolution de matières organiques et des propriétés physiques liées à celles-ci et aux techniques culturales : au lieu d'un seul indice, il faudrait donc envisager des familles d'indices évolutifs.

L'érodibilité des sols mesurée sur parcelles à partir des pertes en terre et de l'agressivité des pluies naturelles est fortement influencée par les taux de cailloux, de limon et de sables très fins ainsi que par les taux des matières organiques de l'horizon superficiel. Dans certains cas il faut en outre tenir compte des observations sur le terrain en particulier de la structure de l'horizon superficiel et de la perméabilité de l'ensemble du profil. Pour dix parcelles sur douze, on observe une concordance raisonnable de ces mesures avec l'indice estimé à partir de taux de cailloux, de limons fins et des matières organiques (abaque de WISCHMEIER *et al.*,

1972). D'autres auteurs ont obtenu de moins bonnes concordances, mais il s'agit de sols très différents (volcaniques) ou ils s'appuyent sur un référentiel incorrect (durée d'expérience trop courte, une ou deux pluies simulées sur le terrain ou au laboratoire) (VANELS-LANDE *et al.*, 1985 ; EL SWAIFY *et al.*, 1982 ; BRYAN, 1981).

L'amélioration de la résistance des sols à l'érosion pluviale est une œuvre difficile car elle est liée à certains caractères peu modifiables. D'autres paramètres ne se modifient que lentement (taux de matières organiques, R_2O_3 , $CaCO_3$ et organisation des horizons profonds) ou au prix d'efforts peu rentables (stabilisants artificiels, jachère, sous-solage). Une voie d'avenir pourrait être l'usage de déchets pétroliers, industriels ou urbains, mais là aussi les coûts de transport sont très élevés en comparaison des productions espérées (PLASSENTIS *et al.*, 1977-78). La meilleure voie dans le

système actuel de production extensif consisterait à défricher progressivement sans perturber le réseau racinaire pour profiter au mieux des matières organiques du sol et de ralentir ainsi la dégradation inexorable des propriétés structurales des sols tropicaux cultivés. Ensuite il faut choisir des techniques culturales gérant au mieux la biomasse disponible (en particulier les résidus de culture), la rugosité du sol et la concentration en surface des éléments les plus résistants à l'agression inévitable des pluies (mottes moyennes, matières organiques et mulch de cailloux ou de résidus de culture). Sauf exceptions, c'est à la surface du sol que se joue la résistance à l'érosion pluviale, c'est donc à la surface du sol qu'il faut concentrer les moyens de lutte.

Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction le 17 octobre 1989.

BIBLIOGRAPHIE

- BAILLY (C.), MALVOS (C.), SARRAILH (J.-M.), ROKOTOMANANA (J.-C.), RAMPANANA (L.), RAMANAHADRAY (F.), 1976. — Etude de la sensibilité des sols de Madagascar à l'érosion. Expérimentation en parcelles élémentaires. *Bois et Forêts des Tropiques*, 169 : 15-27.
- BENNETT (H.-H.), 1926. — Some comparisons of the properties of humid tropical and humid temperate American Soils, with special references to indicated relations between chemical composition and physical properties. *Soil Sc.*, 21 : 349-375.
- BERGSMAN (E.), 1985. — Development of soil erodibility evaluation by simple field tests. *In* : Proc. Soil erosion in European Community : impact of changing agriculture. CHISCI G. and MORGAN, Firenze, Balkema : 213-223.
- BERGSMAN (E.), 1986. — Report of soil erodibility studies in Java, South Sumatra and Thailand. ITC, Wageningen : 18 p.
- BERTRAND (R.), 1967. — Etude de l'érosion hydrique et de la conservation des eaux et du sol en pays Baoulé. Colloque « La fertilité des sols tropicaux » Tananarive 19-25/11/1967. Communication n° 106 : 1 281-1 295.
- BIROT (Y.), GALABERT (J.), CHAPART (J.-P.), 1968. — Troisième campagne d'observation sur la station de mesure de l'érosion d'Allokoto, 1986. CTFT Niger : 23 p.
- BOIFFIN (J.), MONNIER G., 1982. — Etats, propriétés, comportement des sols. Recherche et utilisation de critères de fertilité physique. *Bull. Tech. Inf.* 370-372 : 401-407.
- BOIFFIN (J.), 1984. — La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. Thèse Doc. Ing. INAPG Paris, 320 p.
- BOLLINNE (A.), ROSSEAU (P.), 1978. — Erodibilité des sols de moyenne et haute Belgique. Utilisation d'une méthode de calcul du facteur K de l'équation universelle de perte en terre. *Bull. Soc. Géogr. de Liège*, 14,4 : 127-140.
- BOUDJEMLINE (D.), 1987. — Susceptibilité au ruissellement et aux transports solides de sols de différentes textures. Etude expérimentale au champ sous pluies simulées. Thèse 3^e cycle Univ. Orléans, 264 p.
- BRYAN (R.B.), 1968. — The development, use and efficiency of indices of soil erodibility. *Geoderma*, 2, 1 : 5-26.
- BRYAN (R.-B.), 1974. — A simulated rainfall test for prediction of soil erodibility. *Z. Geomorph NF suppl Bd 21* : 138-150.
- BRYAN (R.-B.), 1981. — Soil erosion under simulated rainfall in the field and laboratory : variability of erosion under controlled conditions. *In* : Proc. Florence Symposium "Erosion and sediment transport measurements", *IAHS, Publ.* n° 135 : 391-403.
- CARREAU (C.), 1969. — Influence des techniques culturales sur le développement du ruissellement et de l'érosion en Casamance. *Agron. Trop.* 24, 9 : 836-842.
- CHRISTOI (R.), 1961. — Résultats obtenus à l'essai érosion de la station de Niangoloko (IRHO) 1956 à 1960. IRHO Haute-Volta : 51 p.

- CHRISTOI (R.), 1986. — Mesure de l'érosion en Haute-Volta. *Oléagineux* 21, 8-9 : 531-534.
- COLLINET (J.), LAFFORGUE (A.), 1979. — Mesures de ruissellement et d'érosion sous pluies simulées pour quelques types de sols de Haute-Volta. ORSTOM Abidjan, 129 p.
- COLLINET (J.), 1988. — Comportements hydrodynamiques et érosifs de sols de l'Afrique de l'Ouest. Evolution des matériaux et des organisations sous simulation de pluies. Thèse pédologie Université Strasbourg : 513 p.
- DELWAULLE (J.-C.), 1973. — Résultats de six années d'observations sur l'érosion au Niger. *Bois et Forêts des Tropiques*, 150 : 15-37.
- DE PLOEY (J.), 1971. — Liquefaction and rainwash erosion. *Zeitschr. Geomorph.* 15 : 491-496.
- DUMAS (J.), 1965. — Relation entre l'érodibilité des sols et leurs caractéristiques analytiques. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 3, 4 : 307-333.
- ELLISON (W.D.), 1944. — Studies of raindrop erosion. *Ag. Eng.* 25 : 131-181.
- ELLISON (W.D.), 1954. — Mechanics of water erosion. Congr. Int. Sc. Sol, Léopoldville, 3 : 381 p.
- EL SWAIFY (S.A.), DANGLER (E.W.), ARMSTRONG (C.L.), 1982. — Soil erosion by water in the tropics. HITAHR, Univ. Hawaï : 173 p.
- ELWELL (H.A.), 1978. — Modelling soil losses in Southern Africa (SLEMSA). *J. Agric. Engineering. Res.* 23 : 117-127.
- GUIZOL (P.) *et coll.*, 1986. — Etude quantitative de l'Erosion hydrique en nappe et propositions d'aménagement en milieu paysan dans le Mumirwa (Burundi). *ISABU, Bujumbura, publication n° 100*, 30 p.
- HENIN (S.), MONNIER (G.), 1956. — Evaluation de la stabilité structurale du sol. AISS, Paris, vol. B : 49-52.
- KALMS (J.-M.), 1975. — Influence des techniques culturales sur l'érosion et le ruissellement en région centre de Côte d'Ivoire. (Colloque sur la conservation et l'aménagement du sol dans les tropiques humides, Ibadan, 30 juin-4 juillet 1975), 9 p.
- LAL (R.), 1981. — Soil erosion problems on alfisols in Western Nigeria : 6. Effects of erosion on experimental plots. *Geoderma*, 25 : 215-230.
- LE BISSONNAIS (Y.), 1988. — Analyse des mécanismes de désagrégation et de la mobilisation des particules de terre sous l'action des pluies. Thèse Orléans/INRA Orléans, 220 p.
- LEPRUN (J.-C.), da SILVEIRA (C.O.), FILHO (R.M.S.), 1986. — Efficacité des pratiques culturales antiérosives testées sous différents climats brésiliens. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 22,2 : 223-234.
- MCCALLA (T.M.), 1944. — Waterdrops method of determining stability of soil structure. *Soil Sc.* 58 : 117-123.
- MIDDLETON (H.E.), 1930. — Properties of soils which influence soil erosion. *USDA, techn. Bull.* 178 : 16 p.
- MIETTON (M.), 1988. — Dynamique de l'interface lithosphère-atmosphère au Burkina Faso : l'érosion en zone de savane. Thèse d'Etat Géographie, Grenoble, 511 p.
- NGO-CHANG-BANG, 1967. — Méthode et appareil pour l'étude dynamique de la structure des sols. *In* : colloque « Fertilité des sols tropicaux », Tananarive tome 1 : 51-68.
- ONSTAD (C.A.), KILEWE (A.M.), ULSAKER (L.G.), 1984. — An approach to testing the USLE factor values in Kenya (KATUMANI). *In* : Proc. Harare Symposium : *IASH* n° 144 : 439-450.
- PIOT (J.), MILLOGO (E.), 1980. — Rapport de synthèse de six années d'étude du ruissellement et de l'érosion à Linoghin (Haute-Volta). CTFT/HV Ouagadougou, 47 p.
- PIOT (M.), MILLOGO (E.), 1980. — Lutte contre l'aridité dans l'Oudalan. L'étude de l'érosion et du ruissellement. Synthèse 1977-78-79 Koel (Mare d'Oursi) Haute-Volta. DGRST/CTFT Ouagadougou, 16 p. + 19 ann.
- PLA (I.), 1978. — Soil-climate interactions limiting rainfed crop production in Venezuela and use of asphalt emulsions to change them. XI Congrès Int. Soc. Soil Sc., Edmonton, June 1978, 12 p., *multigr.*
- PLA SENTIS (I.), 1981. — Soil characteristics and erosion risk assesment of some agricultural soils in Venezuela. ISCO, Maracay : 123-138.
- POESEN (J.), SAVAT (J.), 1981. — Detachment and transportation of loose sediments by raindrop splash II. Detachability and transportability measurements. *Catena* 8 : 19-41.
- PONTANIER (R.), MOUKOURI KUOH (H.), SAYOL (R.), SEINY-BOUKAR (L.), THEBE (B.), 1984. — Comportement hydrique et sensibilité des sols à l'érosion de quelques sols du Nord Cameroun (premiers résultats : 1982-84) ORSTOM-CNS, IRA Yaoundé, 76 p.
- POPENHOE (H.), 1976. — Soil conservation in Central America and Panama. *Revista de Biologica tropical*, 24 : 79-82.
- QUANTIN (P.), COMBEAU (A.), 1962. — Erosion et stabilité structurale du sol. *AIHS* n° 59 : 124-130.
- RAHELIARISOA (M.A.), 1986. — Influence des techniques culturales sur le comportement hydrodynamique et la susceptibilité à l'érosion de sols limoneux et sableux. Expérimentation au champ sous pluies simulées en région centre. Thèse 3^e cycle Univ. Orléans, 300 p.
- ROMKENS (M.), POESEN (J.), WANG (J.), 1988. — Relationship between USLE soil erodibility factor and soil properties. *In* : Proceeding. ISCO, Bangkok : 371-386.
- ROOSE (E.), 1968. — Mesure de l'érodibilité d'un sol (K de WISCHMEIER) sur une parcelle de référence. Protocole standard et discussion. ORSTOM Abidjan, 10 p.
- ROOSE (E.), 1973. — Dix-sept années de mesures expérimentales de l'érosion et du ruissellement sur un sol ferrallitique sableux de basse Côte d'Ivoire. Contribution à l'étude de l'érosion hydrique en milieu intertropical. Thèse Doct. Ing., Fac. Sc. Abidjan, ORSTOM Abidjan, 125 p.
- ROOSE (E.), 1976. — Use of the universal soil loss equation

- to predict erosion in West Africa. In : *SSSA Special publication* n° 21 : 60-74.
- ROOSE (E.), ASSELINE (J.), 1978. — Mesure des phénomènes d'érosion sous pluies simulées aux cases d'érosion d'Adiopodoumé II. Les charges solides et solubles des eaux de ruissellement sur sol nu et diverses cultures d'ananas. *Cah. ORSTOM, Pédol.*, 16,1 : 43-72.
- ROOSE (E.), 1978. — Approach to the definition of rain erosivity and soil erodibility in West Africa. Comm. "Workshop on assesment of Erosion in Europe and USA" ; Ghent, mars 1978 : 153-164, De BOODT and GABRIELS ed., Wiley.
- ROOSE (E.), 1980. — Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique Occidentale. ORSTOM, Paris, *Trav. et Doc.* 130 : 587 p.
- ROOSE (E.), PIOT (J.), 1984. — Runoff, erosion and soil fertility restoration on the Mossi Plateau (Central Upper-Volta). Proc. Harare Symposium, Zimbabwe, *IASH* n° 144 : 485-498.
- ROOSE (E.), CAVALIE (J.), 1988. — New Strategy of water management and soil conservation. Application in developed and developing countries. ISCO 5, Bangkok. Proceedings 913-924. Editor S. Rimwanich.
- ROTH (C.B.), NELSON (D.W.), ROMKENS (J.M.), 1974. — Prediction of subsoil erodibility using chemical, mineralogical and physical parameters. Washington D.C., US Environ. Protection Agency Office of Research and Development.
- SARRAILH (J.-M.), 1987. — Les expérimentations du CTFT sur l'érodibilité des sols sur parcelles de WISCHMEIER. CTFT Kourou, 9 p., *Bull. Réseau Erosion* 7, 27.
- SINGER (M.J.), BLACKARD (J.), GILLOGLEY (E.), ARULANANDAN (K.), 1978. — Engineering and pedological properties of soils as they affect soil erodibility. Techn. Report. n° 166, Davis, Univ. California, 32 p.
- TREVISAN (G.), 1986. — Comportement hydrique et susceptibilité à l'érosion de sols limoneux cultivés (Etude expérimentale au champ sous pluies simulées). Thèse Doct. 3^e cycle Univ. Orléans. Edit. INRA Orléans, 244 p.
- VALENTIN (C.), 1979. — Problèmes méthodologiques liés à la simulation de pluies. Application à l'étude de l'érodibilité des sols. Colloque « Erosion agricole », Strasbourg : 117-122.
- VALENTIN (C.), JANEAU (J.-L.), 1989. — Les risques de dégradation structurale superficielle de la couverture pédologique en savane humide de Côte d'Ivoire. *Cah. ORSTOM sér. Pédol.*, n° 1-2, 1989-90 : 41-52.
- VANELSLANDE (A.), ROUSSEAU (R.), LAL (R.), GABRIEL (D.), GHUMAN (B.), 1984. — Testing the applicability of a soil erodibility nomogram for some tropical soils. Proc. Harare Symposium, *IASH*, 144 : 463-473.
- VANELSLANDE (A.), LAL (R.), GABRIELS (D.), 1985. — Erodibility of some Nigerian soils. Proc. Int. Symp. Erosion, debris flow and disaster prevention, Tsukuba, Japan : 51-56.
- VERNEY (R.), VOLKOFF (B.), WILLAIME (P.), 1967. — Etude de l'érosion sur « Terres de Barre ». Comparaison sol nu-jachère arbusive-année 1965, ORSTOM Cotonou : 14-20.
- WISCHMEIER (W.H.), SMITH (D.D.), 1960. — A universal soil-loss estimating equation to guide conservation farm planning. 7th intern. Congr. Soil Science, Vol. 1 : 418-425.
- WISCHMEIER (W.H.), MANNERING (J.R.), 1969. — Relation of soil properties to its erodibility. Soil Science Society of America, Proceeding, Vol. 33, n° 1 : 131-137.
- WISCHMEIER (W.H.), JOHNSON (C.B.) and CROSS (B.V.), 1971. — A soil erodibility Nomograph for farmland and construction sites ; *J. of Soil and Water Conservation* 26,5 : 189-192.
- WISCHMEIER (W.H.), 1976. — Use and misuse of the universal soil loss equation. *J. Soil and Water Conservation* 31,1 : 5-9.
- WISCHMEIER (W.H.), SMITH (D.D.), 1978. — Predicting rainfall erosion losses. A guide to Conservation planning. USDA, Agriculture Handbook n° 537, 58 p.
- YODER (R.E.), 1936. — A direct method of aggregate analysis of soils, and a study of the physical nature of erosion losses. *J. Am. Soc. Agron.* 28 : 337-351.