

Photo Sarlin.

*Banquettes d'infiltration totale sur gravillons et carapace latéritique, Ouahigouya (Haute-Volta).*

# CONSERVATION DES SOLS EN AFRIQUE ET A MADAGASCAR

1<sup>re</sup> PARTIE

## LES FACTEURS DE L'ÉROSION et L'ÉQUATION UNIVERSELLE DE WISCHMEIER

par P. GOUJON

*Ingénieur en Chef G. R. E. F.*

### SUMMARY

#### SOIL CONSERVATION IN AFRICA AND MADAGASCAR: PART I. — FACTORS OF EROSION AND WISCHMEIER'S EQUATION

« Bois et Forêts des Tropiques » proposes to publish a series of articles on soil conservation in Africa and Madagascar, a subject whose importance was highlighted by the recent Tananarive Colloquium on Tropical Soil Fertility. Technical Tropical Forestry Centres overseas, especially those in Madagascar, Niger and Haute-Volta, have already obtained interesting results following experiments undertaken in the field of combating erosion. The analysis of these results will form the subject of this series of articles.

*In the first part, the author examines factors of erosion : climate, soil, vegetation, method of cultivation, and indicates the influence of these factors on the conservation of tropical soils. He then goes on to describe the method used in the United States for measuring erosion in the light of these various factors, by means of a universal erosion equation known as Wischmeier's equation.*

## RESUMEN

### CONSERVACION DE LOS SUELOS EN AFRICA Y EN MADAGASCAR. PRIMERA PARTE : LOS FACTORES DE LA EROSION Y LA ECUACION UNIVERSAL DE WISCHMEIER

*La revista « Bois et Forêts des Tropiques » tiene el propósito de publicar una serie de artículos acerca de « La Conservación de los Suelos en Africa y en Madagascar », cuya importancia ha podido ser puesta de manifiesto con motivo del reciente coloquio celebrado en Tananarive, en el cual se ha tratado de la Fertilidad de los Suelos Tropicales. Los Centros Técnicos Forestales de Ultramar, y en particular aquellos de Madagascar, Niger y Alto Volta, han obtenido ya resultados interesantes con motivo de las experimentaciones emprendidas en el aspecto de la Lucha contra la Erosión. El objeto perseguido por nuestra publicación consiste en reproducir el análisis de estos resultados.*

*En la primera parte, el autor examina los factores de la erosión, clima, suelo, cobertura vegetal, sistema de cultivo, e indica la influencia ejercida por estos factores sobre la conservación de los suelos tropicales. Ato seguido describe el método utilizado en los Estados Unidos para apreciar la erosión en función de estos distintos factores, por medio de una ecuación universal de erosión, denominada « ecuación de Wischmeier ».*

## I. — LES FACTEURS DE L'ÉROSION

L'érosion qui s'exerce d'une manière souvent spectaculaire sur les sols d'Afrique et de Madagascar est due à l'action de plusieurs facteurs qui sont

d'une part le climat, d'autre part la nature et la pente du sol, la couverture végétale et le mode de culture.

### LE CLIMAT

Parmi ces facteurs, le plus important est le climat. L'érosion a pour cause en effet l'action sur le sol de facteurs climatiques bien définis, comme la pluie et le vent qui, dans certaines régions du globe, prennent un caractère agressif et provoquent, lorsque le sol n'est pas protégé par une végétation suffisamment dense, une dégradation rapide des horizons superficiels.

Cette agressivité du climat se traduit par un ensemble de caractères que l'on retrouve, à quelques variantes près, dans la zone méditerranéenne et dans la zone tropicale sèche et dont les principaux sont :

— l'existence d'une saison sèche marquée, au cours de laquelle la végétation herbacée disparaît complètement et laisse le sol sans protection au début de la saison des pluies ;

— la violence des précipitations qui se font sous forme d'averses orageuses à allure torrentielle, dont l'intensité de pointe peut atteindre plusieurs mm par minute ;

— Le régime des vents qui sont à la fois réguliers (alizés, moussons) et violents (tornades) et dont la vitesse dépasse parfois 150 km/h.

La saison sèche peut être plus ou moins longue, mais elle dure de toute façon plusieurs mois chaque année ; la végétation herbacée se dessèche très rapidement dès la fin des pluies : les plantes annuelles disparaissent, les plantes vivaces ne subsistent que par leur partie souterraine : bulbes ou rhizomes ;

beaucoup d'arbres perdent leurs feuilles (1) et le sol reste absolument sans protection jusqu'aux premières pluies.

Celles-ci sont généralement les plus violentes et, tombant sur un sol nu, elles sont particulièrement dangereuses. Ce n'est pas tant le volume total des précipitations qui importe que l'intensité de ces précipitations et leur répartition au cours de l'année.

Des expérimentations menées au C. T. F. T. Madagascar par la Division de Lutte contre l'Erosion, il ressort que les caractéristiques pluviométriques intéressantes en matière d'érosion sont les suivantes :

1° **Hauteur d'eau** : Pour pouvoir déclencher les phénomènes d'érosion, la hauteur d'eau tombée au sol doit atteindre au moins 20 à 30 mm pour une même averse. Au-dessous de 20 mm, la pluie est absorbée par le sol et n'entraîne aucun ruissellement mesurable, mais au cours d'une même averse, cette capacité d'infiltration du sol décroît rapidement et lorsque la hauteur d'eau dépasse 30 mm, une partie de cette eau ruisselle, entraînant avec elle des éléments solides arrachés au sol en place.

D'une manière générale, le volume d'eau tombée au sol se partage en trois parties : l'une est évaporée immédiatement, l'autre ruisselle à la surface du

(1) Le *Faidherbia albida*, qui fait exception à cette règle, doit pouvoir jouer un rôle important dans la conservation des sols.

sol, la troisième s'infiltré dans les couches profondes. Seule cette eau d'infiltration est utile pour les plantes et, ne pouvant agir pratiquement sur l'évaporation, on cherche à réduire le ruissellement au maximum pour économiser le plus possible l'eau de pluie déjà trop rare.

**2° Intensité :** L'intensité de la pluie, que l'on mesure par la quantité d'eau tombée pendant un intervalle de temps déterminé, constitue le facteur le plus important de l'érosion. Il y a corrélation constante entre l'intensité de la pluie et l'intensité du ruissellement. C'est parce que cette intensité atteint dans la zone tropicale des valeurs très élevées, que cette zone est soumise à une érosion pluviale intense.

En Afrique du Nord, les normes des ouvrages anti-érosifs sont calculées en fonction d'une intensité maximale de 3 mm par minute ; au sud du Sahara, cette intensité peut atteindre 4 à 5 mm par minute, ce qui oblige à augmenter la densité ou le gabarit des ouvrages.

A Madagascar, on mesure généralement l'intensité des averses par le nombre de mm d'eau tombée pendant 15 mn. L'intensité est faible si elle est inférieure à 7 mm en 15 mn, moyenne si elle est

comprise entre 7 et 15 mm, forte si elle est supérieure à 15 mm en 15 mn.

Le maximum de ruissellement est obtenu avec des pluies de forte intensité et les pertes en terre sont toujours le fait de gros orages.

Les observations montrent qu'il existe d'ailleurs relativement peu de pluies érosives et que la quasi-totalité de l'érosion est produite par un nombre très réduit d'averses.

C'est ainsi qu'à Nanisana, près de Tananarive, en cinq ans d'observations, on a obtenu les résultats suivants :

Années	Nombre de pluies érosives	Pourcentage de la pluviométrie annuelle	Pourcentage de l'érosion totale
1959-60	7	21	85
60-61	10	30	80
61-62	7	24	85
62-63	16	45	85
63-64	7	27	80

A Nanokely, dans le massif de l'Ankaratra, en 1963-64, sept pluies ont été érosives, dont cinq en décembre, provoquant 90 % des pertes en terre, pour 22 % de la pluviométrie totale de l'année. Au

*Erosion pluviale (par ruissellement) en bordure de forêt. Ouahigouya (Haute-Volta).*

Photo Sarlin.





Photo Dinard.

*Erosion en lavaka.  
Madagascar (région du lac Alaotra).*

**4° Répartition :** L'expérience montre que, d'une manière très générale, les averses sont plus nombreuses et plus agressives au début de la saison des pluies. A Madagascar, le mois le plus dangereux est le mois de décembre. Si l'on définit l'érosivité d'un mois déterminé par le quotient :

$$\frac{\text{pertes en terre}}{\text{pluviométrie}}$$

l'érosivité du mois de décembre est deux fois et demie supérieure à celle des autres.

A Nanisana, le nombre des pluies érosives se répartit en moyenne de la manière suivante :

Novembre	Décembre	Janvier
9	26	7
	Février	Mars
	1	4

lac Alaotra, sept averses par an sont déterminantes et entraînent 70 à 95 % des pertes en terre. A la Taheza, dans le sud de l'île, 90 % du ruissellement est produit au cours de huit pluies, représentant 63 % du total annuel.

Ces résultats sont suffisamment concordants pour qu'il soit possible de conclure que les pluies érosives sont très peu nombreuses au cours d'une même année : sept à huit averses, soit 20 à 25 % de la hauteur d'eau totale, entraînent en moyenne 80 à 90 % du ruissellement et des pertes en terre.

En résumé, on peut dire que moins de dix averses sont, chaque saison, la cause de la quasi-totalité de l'érosion.

**3° Fréquence :** Une pluie tombant sur un sol sec commence à pénétrer en profondeur et ne provoque pas de ruissellement. Par contre, dès que la terre est saturée d'humidité, ce qui se produit au bout d'un temps variable avec la nature du sol, l'eau ne peut plus s'infiltrer et ruisselle.

Les averses sont donc plus dangereuses quand elles se suivent à intervalles rapprochés ; le sol est saturé par la première pluie, l'eau n'a pas le temps de s'évaporer ou de s'infiltrer et lorsque tombe l'averse suivante, elle ruisselle entièrement et provoque presque toujours une érosion importante.

Les observations faites jusqu'à présent ont permis de mettre en évidence cette influence sur le ruissellement des antécédents pluviométriques : le maximum d'érosion est atteint pour les averses fortes et groupées.

On observe donc une décroissance générale nette des débits solides depuis le début jusqu'à la fin de la saison des pluies.

C'est ainsi qu'à Nanokely, en 1961-62, 100 % des pertes en terre se sont produites avant le 15 janvier.

Pour lutter contre cette agressivité des premières averses, il faudra choisir un assolement tel que les plantes de culture couvrent et protègent le sol dès le début de la saison des pluies.

Quant aux éléments fertilisants, ils sont entraînés également en quantité plus importante au moment des premières pluies, d'où l'intérêt de faire des épandages d'engrais à la fin de la saison humide précédant la mise en culture.

Le ruissellement et les pertes en terre varient aussi beaucoup avec les années.

A Nanisana, en 5 ans le ruissellement a varié de 2,7 mm à 26,5 mm ou de 6,8 % à 61,4 %, soit de 1 à 10. Il y a donc des années plus dangereuses que les autres, comme il y a des mois plus dangereux au cours d'une même année, avec cette différence que les mois dangereux sont toujours les mêmes, tandis que pour les années, il n'a pas été possible de dégager une loi, la pluviométrie étant elle-même très différente d'une année sur l'autre.

Cette variabilité du régime des pluies et, par conséquent du ruissellement, entraîne la nécessité, pour pouvoir obtenir des moyennes valables, d'étendre les observations sur une période de dix ans au minimum.

Photo Letourneux.

Madagascar.

Périmètre de reboisement d'Ivakoana près de Manikara. Province de Fianarantsoa. Aspect général du périmètre avec diverses formes d'érosion : cirques d'érosion, érosion en nappes, griffes d'érosion, etc...

## LE SOL

Les propriétés qui conditionnent la sensibilité d'un sol à l'érosion sont essentiellement :

- la stabilité structurale,
- la perméabilité,
- la vitesse de pédogénèse.

La **stabilité structurale** définit en principe la tenue du sol à l'action des agents atmosphériques. Elle varie avec la proportion d'agrégats et d'éléments fins qui se trouvent dans le sol, l'instabilité étant d'autant plus forte que la quantité d'éléments fins qui se séparent des agrégats est plus forte. Les plus stables sont les sols riches en humus et les rendzines, les plus instables sont les argiles, les marnes et les sols salins.

Mais la stabilité structurale varie aussi pour un même sol avec les saisons, l'amplitude de la variation pouvant atteindre 50 à 60 % de la valeur moyenne. Cette amplitude est d'autant plus grande que le sol est moins stable. Au début de la saison des pluies, on observe une dégradation très nette de la stabilité ; celle-ci est minimum pendant les mois les plus arrosés de la saison pluvieuse, puis survient une amélioration brutale au cours du premier mois de la saison sèche, amélioration qui se poursuit ensuite, mais plus lentement, jusqu'aux premières grandes pluies.

L'instabilité structurale est désignée en France par l'indice  $I_s$  (Hénin) qui varie de 0,1 pour les sols stables, riches en humus, à 100 pour les sols les plus instables (marnes et sols salins). On remplace généralement dans les calculs l'indice  $I_s$  par le terme  $\log 10 I_s$ , qui peut varier alors de 0 à 3.

On peut agir sur la stabilité structurale en incorporant de l'humus au sol, d'où l'intérêt primordial de la fumure dans la lutte contre l'érosion.

La **perméabilité** d'un sol exprime sa capacité d'infiltration pour l'eau ; elle varie avec la viscosité de l'eau, avec l'intensité des précipitations, la porosité du sol et sa teneur en éléments fins. La perméabilité décroît en général avec la profondeur ; enfin, elle varie avec le degré de saturation du sol. La perméabilité de la terre sèche est plus élevée que celle de la terre humide, ce qui explique qu'au cours d'une même averse, l'infiltration diminue et, par conséquent, le coefficient de ruissellement augmente



du début jusqu'à la fin. De même, si deux averses se succèdent à intervalles rapprochés, le ruissellement sera plus fort au cours de la deuxième averse.

La perméabilité se mesure par la vitesse de filtration de l'eau à travers une masse de terre de hauteur donnée. Elle s'exprime en cm par heure et on la désigne par la lettre K, coefficient de perméabilité qui peut varier de 0 à 60 cm/h, depuis les sols hydromorphes déjà saturés, jusqu'aux sols graveleux qui sont particulièrement perméables. On remplace aussi dans les calculs le coefficient K par le terme  $\log 10 K$ .

La détermination de la perméabilité d'un sol est importante en matière de lutte contre l'érosion, parce qu'elle permet de choisir entre deux sortes d'ouvrages : infiltration totale ou diversion. On ne peut utiliser les premiers que pour des sols dont la perméabilité est assez forte : à Ouahigouya (Haute-Volta) on a pris comme critère, pour la construction des ouvrages d'infiltration totale, un coefficient K supérieur à 15 cm/h, ce qui correspond à une perméabilité moyenne mais suffisante.

L'indice d'instabilité structurale et le coefficient de perméabilité sont liés par la formule :

$$3 \log 10 K + 2,5 \log 10 I_s - 7,5 = 0$$

qui permet de constater qu'une mauvaise stabilité structurale peut être compensée, dans certains cas, par une bonne perméabilité. Cette formule se traduit graphiquement par une droite par rapport à laquelle on peut classer les sols et déceler ceux qui sont les plus sensibles à l'érosion. Au Cameroun par

exemple, les sols jeunes sur basalte récent à structure grumeleuse sont les plus stables, viennent ensuite les sols brun à brun-rouge sur basalte plus ancien et, enfin, les sols ferrallitiques typiques qui sont toujours les plus fragiles.

Des travaux récents (1965) effectués au Centre de Pédologie de Tunis ont montré qu'il était en réalité très difficile de trouver une corrélation significative entre la stabilité structurale ( $\log 10 I_s$ ) ou la perméabilité ( $\log 10 K$ ) d'une part et la sensibilité d'un sol à l'érosion d'autre part. Aussi, les pédologues ont-ils été amenés à utiliser d'autres facteurs pour étudier la variabilité de ce caractère. Ils ont montré que la sensibilité d'un sol à l'érosion est liée à plusieurs caractères analytiques dont les principaux sont :

- le pourcentage de cailloux en surface,
- " " " de matière organique,
- " " " d'humidité.

« L'effet cailloux » a une importance primordiale sur la protection d'un sol, importance égale, d'après les calculs statistiques, à la somme des deux autres facteurs : matière organique et humidité. Ceci s'explique d'ailleurs aisément quand on sait que l'entraînement de la terre est dû surtout au choc des gouttes d'eau sur le sol (effet splash) ; lorsque celui-ci est protégé par des graviers, l'érosion est forcément limitée.

Ce pourcentage de cailloux ne présentant que peu de rapports avec la pédogénèse, il en résulte qu'il n'existe pas de relation nette entre la sensibilité des sols à l'érosion et les types pédologiques tels qu'ils sont définis dans la classification française.

D'une manière générale, tous les sols qui présentent un horizon superficiel graveleux sont moins sensibles que les autres à l'érosion.

C'est le cas d'une partie au moins des sols de Boukombé, région située dans le nord-ouest du Dahomey, où des travaux de restauration ont été effectués ces dernières années sur une surface de 10.000 ha. Le sous-sol est constitué par des schistes birrimiens sur lesquels repose un sol du type ferrugineux tropical lessivé avec début de formation de concrétions. La pente moyenne de ces sols est faible (3 à 4 %) et l'érosion apparente est surtout une érosion en nappe qui se traduit par un enrichissement en graviers de l'horizon supérieur par suite de l'entraînement en profondeur de la terre fine. Cette érosion a commencé depuis très longtemps, mais elle reste relativement faible puisqu'elle ne dépasse pas, en moyenne, 1,57 t par ha et par an, ce qui correspond à l'arrachement d'une couche de terre arable de 1 cm d'épaisseur en 30 ans, alors que l'érosion calculée à partir du coefficient climatique de FOURNIER :

$$C = \frac{p^2}{P} \quad \text{où} \quad \begin{array}{l} p = \text{pluviosité en mm du mois le plus pluvieux.} \\ P = \text{pluviosité totale de l'année.} \end{array}$$

donnerait pour cette région d'Afrique une valeur comprise entre 10 et 15 t. Ceci est dû certainement à l'abondance relative des sols graveleux qui sont protégés contre l'érosion par la présence de cailloux en surface.

Pour améliorer les conditions de culture, il est prévu de ramener à la surface les couches inférieures sablo-limoneuses, donc plus riches, mais celles-ci sont beaucoup plus sensibles à l'érosion et il faut prévoir une infrastructure anti-érosive avant d'effectuer des labours profonds. Une transformation des méthodes culturales traditionnelles, qui ne tiendrait pas compte des risques d'érosion, provoquerait des ruissellements qui deviendraient rapidement catastrophiques.

L'érosion n'a pas seulement pour conséquence d'entraîner une certaine quantité de terre, elle exerce aussi une action sélective sur les éléments constitutifs du sol. C'est ce qu'on appelle l'érosion de fertilité qui se traduit par une modification des propriétés physiques et chimiques du sol et qui apparaît quelquefois sous forme d'un changement de coloration de la surface.

On trouve presque toujours dans la terre entraînée 5 à 6 fois plus d'éléments fins (argile et limon) que dans la terre en place. En outre, il y a toujours un entraînement important des bases échangeables et, par conséquent, une diminution du stock de fertilité.

Aux États-Unis (Tennessee Valley) les Américains estiment cette perte à 21,8 kg/ha de CaO et 27,8 kg/ha de K<sub>2</sub>O chaque année.

Pour en revenir à Boukombé (Dahomey), la terre entraînée représente une perte de 6,5 kg de CaO et de 50 kg de matière organique par ha et par an.

A Nanisana (Madagascar), les pertes en éléments fertilisants sont données par le tableau suivant (par ha et pour la campagne 1962-63).

Pertes en éléments fertilisants (kg/ha)  
Nanisana (Madagascar) — 1962-63

	Parcelle n° 3 Arachides	Parcelle n° 4 Maïs
Matière organique ..	14 kg	20 kg
Azote.....	57	173
P <sup>2</sup> O <sup>5</sup> .....	37	48
CaO.....	25	30
K <sup>2</sup> O.....	35	7
MgO.....	1,5	3,5

Ces pertes sont donc loin d'être négligeables et le rendement des récoltes s'en ressent.

Heureusement, dans la plupart des cas, le sol se reconstitue plus ou moins vite, à partir de la roche mère.

Cette vitesse de pédogénèse est intéressante à connaître pour pouvoir définir le seuil d'érosion admissible, au-delà duquel il est nécessaire d'appli-

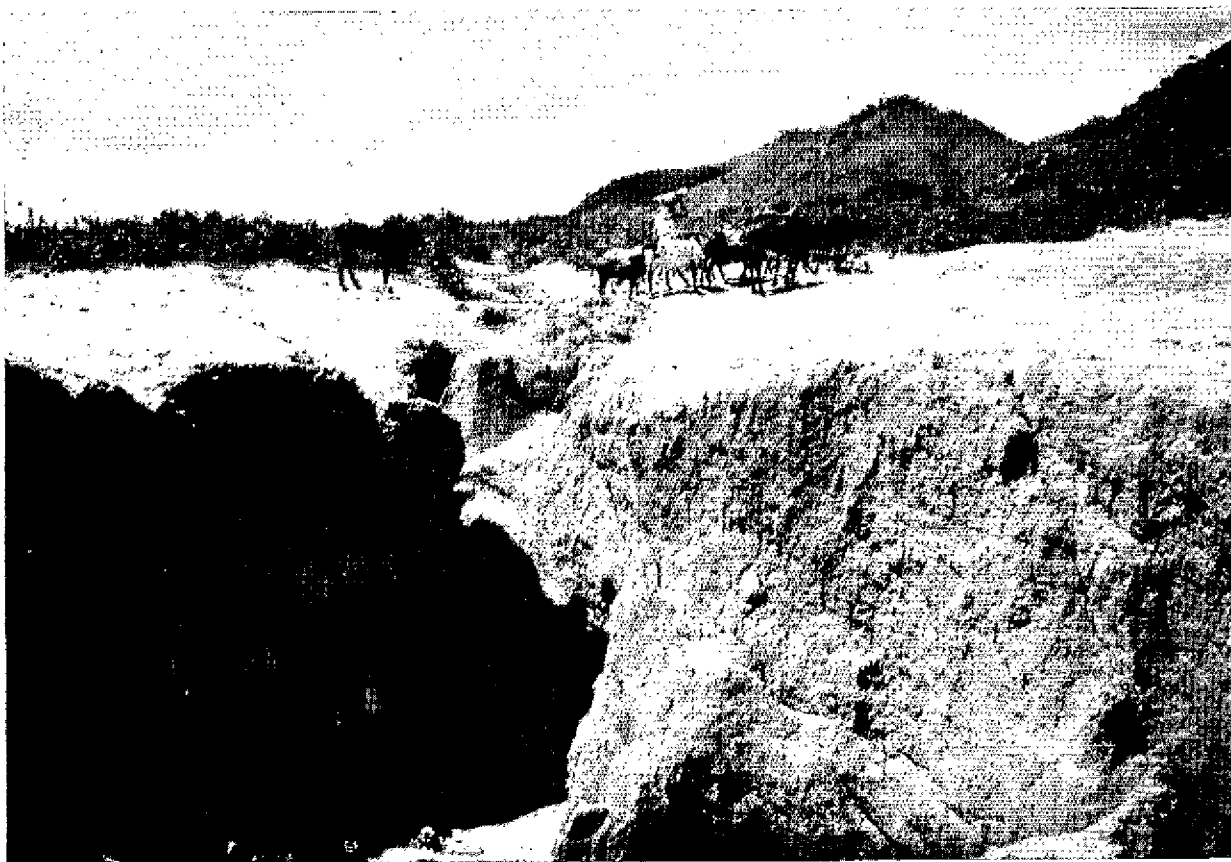


Photo Service Forestier du Cameroun

*Près de Ngaoundéré (Cameroun), ravinement et érosion dus au ruissellement mais ayant pour origine le surpâturage.*

quer des traitements anti-érosifs. La vitesse de reconstitution du sol varie avec le climat et avec la nature de la roche mère ; elle peut atteindre 2,5 à 12,5 t par ha et par an aux Etats-Unis, suivant les régions, mais elle est sans doute beaucoup moins rapide en Afrique où la tolérance d'érosion sera, par conséquent, beaucoup plus faible.

Dans les pays d'agriculture extensive, la meilleure façon de provoquer la pédogénèse c'est de laisser le sol en repos pendant plusieurs années entre chaque période de culture. Cette jachère, au cours de laquelle la terre ne doit pas être cultivée mais qui

peut être une prairie temporaire pâturée avec précaution, permet au sol de retrouver ses propriétés physiques qui ont pu être modifiées par la culture et une partie des éléments fertilisants qui ont été exportés par les récoltes successives ou entraînés par l'érosion.

La vitesse de restauration du sol sous jachère est nettement plus faible que la vitesse de dégradation sous culture, d'où nécessité de maintenir des jachères assez longues. On admet en général qu'une jachère, pour être efficace, doit durer 3 ans au minimum (Madagascar).

## LA PENTE

L'érosion est également en relation avec la pente du sol ; elle commence, en Afrique tropicale tout au moins, pour des pentes très faibles, voisines de l'horizontale. La cause en est certainement le régime des pluies qui sont, dans cette région du monde, particulièrement agressives. Il s'agit alors d'une érosion en nappe qui ne présente pas d'effet spectaculaire sur le terrain, mais qui n'en exerce pas moins une action dangereuse en provoquant le lessivage des horizons superficiels, l'entraînement des élé-

ments solubles en profondeur et l'apparition en surface d'un horizon gravillonnaire.

L'érosion croît rapidement avec la pente du terrain et l'on observe parfois une augmentation considérable des pertes en terre pour un accroissement très faible de la pente. Ce phénomène est illustré par les résultats des expériences faites à la station de Sefa au Sénégal et résumées dans le tableau ci-après.

*Pertes en terre enregistrées à SEFA (Sénégal)  
pour deux inclinaisons de pente (1 et 1,5 %)*

Année	Culture	Pluviométrie mm	Pente 1 %		Pente 1,5 %	
			R %	E (t/ha)	R %	E (t/ha)
1955	Sorgho ..	1.340	11,2	6,98	26,1	14,20
1956	Arachide.	1.148	9,1	3,05	16,8	4,33
1957	Riz .....	1.004	21,5	6,44	20,5	9,54

R = ruissellement annuel en % de la pluviométrie.  
E = érosion en tonnes par hectare.

La longueur de la pente intervient aussi : l'érosion est d'autant plus forte que cette longueur est plus grande, d'où la nécessité de couper la pente d'un versant par des ouvrages qui en réduisent la longueur.

Pour ce qui concerne le ruissellement, le phéno-

mène est plus complexe : sur les pentes fortes et moyennes, c'est-à-dire supérieures à 3 ou 4 %, le coefficient de ruissellement augmente lui aussi avec la longueur de pente, mais pour les pentes faibles, il semble que ce coefficient reste constant ou même diminue quand la longueur de pente augmente. Ceci a été observé en particulier à Boukombé où les résultats des mesures montrent que les taux moyens de ruissellement sont identiques quelles que soient les longueurs de pente. Il peut y avoir, dans ce cas, freinage de l'eau par les graviers de la surface et augmentation de l'infiltration.

Mais, d'une manière générale, la vitesse de l'eau augmente avec la longueur du versant et il convient, en construisant des ouvrages destinés à ralentir le ruissellement, d'éviter que cette vitesse n'atteigne le seuil d'érosion. C'est de là que vient la nécessité de calculer la dénivelée des ouvrages qui définit l'écartement maximum au-delà duquel le ruissellement des eaux sauvages dépasse la vitesse d'érosion.

### LA COUVERTURE VÉGÉTALE

Plus importante encore que la nature du sol ou la pente, la couverture végétale exerce une action déterminante sur la sensibilité d'un sol à l'érosion. Un terrain recouvert d'une végétation permanente, prairie ou forêt, ne présente pratiquement pas trace d'érosion, sous réserve bien entendu que la prairie ne soit pas surpâturée et la forêt surexploitée. Il peut y avoir ruissellement si la pente est forte, mais les pertes en terre sont nulles, d'abord parce que celle-ci est maintenue en place par les racines des plantes, ensuite et surtout parce que l'énergie cinétique des gouttes de pluie est amortie par la végétation. Cette action de la couverture végétale est tellement importante qu'elle peut masquer l'effet de la pente, c'est-à-dire que même sur pente forte (30 à 40 %) l'érosion peut être nulle si le sol est couvert d'une prairie dense ou d'une forêt.

Quelques exemples, empruntés à différentes régions d'Afrique, montrent bien l'influence de la végétation sur la protection du sol.

A Adiopodoumé, en basse Côte d'Ivoire, le coefficient de ruissellement, très faible sous forêt, peut atteindre 15 à 20 % sous culture et 30 % sur sol nu. Les pertes en terre, qui sont de 0,2 t par ha et par an sous forêt, atteignent plusieurs tonnes sous culture et 120 t sur sol nu, soit 600 fois plus que sous forêt.

A Séfa, au Sénégal, on constate que la forêt protège le sol 40 fois mieux que la jachère naturelle. Si la culture couvre bien le sol, l'érosion ne dépasse pas quelques tonnes par ha et par an. Par contre, si les semis sont trop tardifs ou pas assez denses, les pertes en terre atteignent 8 à 15 t par ha et par an, et si les cultures sont décimées par les insectes ou les maladies, l'érosion peut s'élever à 50 t par ha.

A Madagascar, les expériences menées au lac Alaotra et à Périnet ont mis également en évidence

l'influence du couvert végétal sur le ruissellement et les pertes en terre, comme l'indiquent les tableaux ci-dessous. La forêt naturelle ou artificielle constitue, en général, la protection la plus efficace contre l'érosion, mais la prairie peut jouer le même rôle, à condition qu'elle présente un couvert suffisamment dense. Par contre si la prairie est dégradée soit par les feux de brousse, soit par un excès de pâturage, son efficacité est considérablement réduite : la mise en défens périodique des terres en pente s'impose pour permettre la reconstitution du couvert végétal.

#### RUISSALLEMENT ET PERTES EN TERRE

— Périnet — 1963-64.

	Pente %	Ruissellement %	Pertes en terre (t/ha)
Forêt naturelle ..	53	4,5	négligeables
Plantations d'Eucalyptus .....	44	4,2	—
Brousse secondaire .....	36	16,1	—
Culture de riz sec.	42	31,4	6

— Lac Alaotra — 1959-60.

	Pente %	Ruissellement %	Pertes en terre (t/ha)
Prairie dense (couvert 100 %) ...	36	6,9	négligeables
Prairie dégradée (couvert 20 %) .	12	29	12
Culture .....	7	15,4	59



## LA CULTURE

Lorsqu'un sol en pente est défriché et mis en culture, l'érosion s'installe parce que la couverture végétale perd son caractère permanent. Pendant toute une période qui s'étend depuis la récolte jusqu'à 2 ou 3 mois après le semis, le sol n'est plus protégé et il est soumis à une érosion intense : par le vent pendant la saison sèche, par l'eau au début de la saison des pluies.

Pour éviter ce danger, il convient de laisser le sol nu le moins longtemps possible et, dans ce but, il faut apprendre aux paysans africains à respecter les règles suivantes :

- faire des semis précoces et assez denses ;
- apporter une fertilisation suffisante pour assurer un développement normal des cultures ;
- appliquer les traitements phytosanitaires indispensables ;
- modifier, le cas échéant, les rotations traditionnelles en choisissant de préférence des cultures couvrant bien le sol ;
- introduire dans l'assolement des cultures associées, des plantes de couverture ou des engrais verts.

Mais ces moyens dits « biologiques » ne sont pas suffisants en général et il faut les compléter par des moyens « mécaniques » de lutte contre l'érosion, qui

consistent essentiellement en un travail du sol bien conduit.

Le labour suivant les courbes de niveau est une technique simple qui peut être préconisée dans tous les cas. La culture en billons, chaque fois qu'elle est possible, constitue également une technique excellente, puisqu'elle réduit de moitié au moins les risques d'érosion, sous réserve bien entendu que les billons soient tracés suivant les courbes de niveau ou avec une légère pente longitudinale quand le sol est imperméable.

La culture en bandes alternées : labours, prairies, de largeur variable suivant la pente, est encore plus efficace, mais elle nécessite une technique plus évoluée de la part des agriculteurs et elle ne sera pas toujours applicable en Afrique.

Les haies vives, les murettes de pierre, les bourrelets de terre disposés suivant les courbes de niveau, constituent des obstacles au ruissellement, d'une réalisation relativement facile, peu coûteuse et suffisamment efficace en général sur pente faible.

Chaque fois que celle-ci dépasse un certain pourcentage variable avec l'agressivité du climat et la sensibilité du sol, il faut faire des terrassements plus importants : fossés, gradins ou banquettes, mais le

*Piétinement du bétail auprès d'un abreuvoir. Environs de Zinder (Niger).*

Photo Sarlin.



prix de revient élevé de ces ouvrages limite leur utilisation :

— soit aux cas où l'intérêt public l'exige : protection d'une ville, d'une route ou d'une voie ferrée, d'un ouvrage d'art ou d'un périmètre irrigué,

— soit aux régions dans lesquelles ces travaux peuvent être valorisés par l'installation d'une culture riche : arbres fruitiers par exemple.

Dans les régions à pluviométrie insuffisante où la

conservation de l'eau a autant d'importance que celle du sol, on s'efforcera de réaliser des ouvrages d'infiltration totale chaque fois que le régime des pluies et la perméabilité du sol le permettront. Dans les autres cas, on construira des ouvrages de diversion, c'est-à-dire que l'on donnera au fond de la banquette ou du fossé une légère pente longitudinale pour permettre l'évacuation de l'eau en excès vers un exutoire naturel ou artificiel.

## II. — L'ÉQUATION UNIVERSELLE D'ÉROSION

Nous venons d'étudier l'action qualitative exercée par les différents facteurs de l'érosion et d'en déduire les moyens qui permettent de lutter contre elle. Mais il ne suffit pas de connaître la nature des travaux à entreprendre ; il est également nécessaire, pour des raisons à la fois économiques et techniques, de calculer avec précision les dimensions et la densité des ouvrages à réaliser, chaque fois que les

méthodes biologiques de lutte contre l'érosion s'avèrent insuffisantes et qu'il apparaît indispensable d'y adjoindre des moyens mécaniques, en particulier des terrasses ou des banquettes.

La densité des ouvrages est déterminée généralement par l'application de formules qui ont été mises au point, soit aux Etats-Unis, soit en Afrique du Nord, et qui permettent de calculer la dénivelée des ouvrages, c'est-à-dire la distance verticale (H) qui les sépare. Les plus utilisées sont :

— la formule de RAMSER :

$$H = 0,305 \frac{(a + P)}{b} ;$$

où a et b sont des coefficients, P la pente en % ;

— la formule de SACCARDY :

$$\frac{H^3}{P} = 260 \pm 10$$

On peut reprocher à ces formules de ne faire intervenir, comme variable, que la pente du terrain et, par conséquent, de ne s'appliquer qu'à l'intérieur de régions dont les conditions naturelles (climat, sol, végétation) apparaissent suffisamment homogènes.

C'est le cas en particulier de la formule de SACCARDY qui ne s'applique que sous un climat méditerranéen, avec une intensité pluviométrique maximale de 3 mm par mn et, nous dit l'auteur, « dans la majorité des terrains, à l'exception des marnes qui deviennent fluentes en se gorgeant d'eau et des sols très meubles qui tendent à s'ébouler comme les sables ou les arènes ». En outre, cette formule n'est valable en principe que pour des pentes supérieures à 3 %. Ceci en restreint singulièrement la portée et on a dû souvent adopter, pour fixer l'écartement des ouvrages, une règle différente qui tienne compte à la fois de l'agressivité plus forte du climat (l'intensité maximale des pluies peut atteindre, nous l'avons vu, 4 à 5 mm

*En Haute-Volta, construction d'une banquette à l'aide d'un motor grader.*

Photo Sarlin.



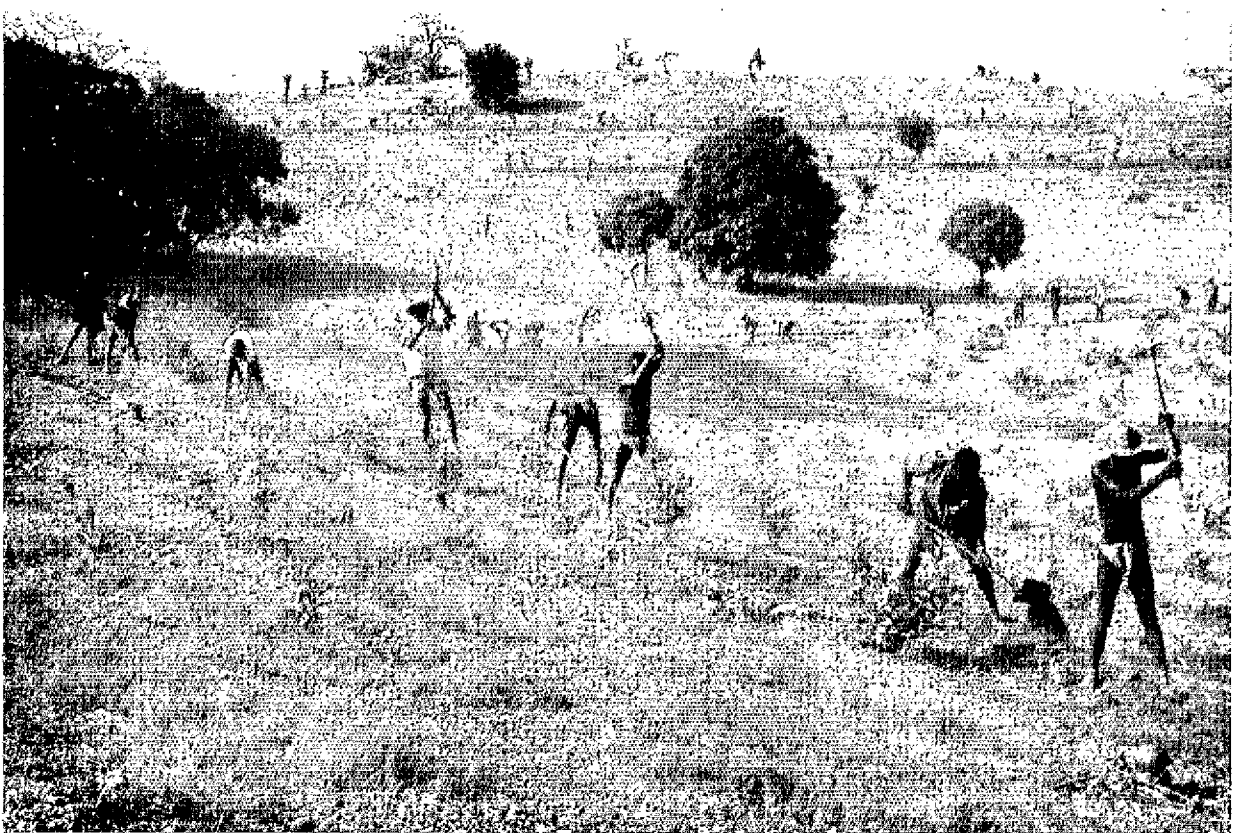


Photo Sarlin.

*Boukombé (Dahomey). Travaux de Défense et restauration des sols.  
Confection d'une banquette à la main par la main-d'œuvre locale.*

par mn) et de la nécessité d'abaisser sensiblement les prix de revient. On aboutit le plus souvent à des règles empiriques qui ont le mérite d'être généralement très simples, mais qui devraient subir dans tous les cas le contrôle d'une expérimentation prolongée. C'est ainsi qu'à Ouahigouya (Haute-Volta), pour une pente moyenne de 2 à 3 %, la dénivelée a été fixée à 35 cm, c'est-à-dire que les banquettes sont nettement plus rapprochées que si l'on avait utilisé les formules précédentes et que, pour faciliter la tâche des exécutants et diminuer le prix de revient, cette dénivelée est uniforme quelle que soit la pente.

Une autre formule, due à HENIN, donne la valeur de l'érosion E en fonction de différents facteurs, les uns favorables, les autres défavorables :

$$E = \frac{I_p \pi S}{K V_e}$$

$I_p$  : intensité des précipitations,  
 $\pi$  : pente du terrain,  
 $S$  : susceptibilité du sol,  
 $K$  : perméabilité,  
 $V_e$  : végétation.

Pour diminuer l'érosion et la ramener à une valeur compatible avec la vitesse de pédogenèse, on peut agir :

1° sur la pente du sol,  $\pi$ , au moyen d'ouvrages anti-érosifs (terrasses, banquettes, fossés, gradins, etc...);

2° sur la nature du sol, S, K, par des moyens biologiques (fumure organique);

3° sur la couverture végétale  $V_e$  (assolement rationnel, gazonnement, boisement).

En Amérique, on utilise maintenant, pour mesurer soit les pertes en terre, soit l'écartement des ouvrages, l'équation universelle d'érosion de WISCHMEIER, dont la portée est beaucoup plus large que celles des formules précédentes puisqu'elle fait intervenir tous les facteurs connus de l'érosion. Cette équation s'écrit en effet :

$$A = RKLSCP$$

A représente la perte en terre (en tonnes américaines par acre) pendant un temps donné;

R est l'indice-pluie qui caractérise l'agressivité de la pluie, soit pour une averse, soit plus généralement au cours d'une période déterminée (moyenne annuelle);

K est l'indice-sol;

LS l'indice de pente (longueur et pourcentage);

C est l'indice de culture, caractérisant la couverture végétale du sol;

P l'indice des traitements utilisés pour lutter contre l'érosion.

Parmi les facteurs d'érosion, seul l'indice-pluie R peut se calculer à partir des données climatiques. Les autres ne sont que des rapports et on les mesure par comparaison avec des éléments standards.

Pour obtenir le résultat en unités du système métrique, il suffit de multiplier A par 2,24 :

A' (en t par ha) = 2,24 A (en t américaines par acre)  
 1 t américaine = 0,907 t métrique,  
 1 acre = 0,404 ha.

**Indice-pluie = Facteur R**

Cet indice est le produit de l'énergie globale (Eg) de la pluie exprimée en pied-t/acre, par l'intensité maximum en 30 mn (Im) exprimée en mm/h, divisée par 1.000.

$$R = \frac{Eg \times Im}{1.000}$$

L'énergie globale (Eg) se calcule à partir de l'énergie unitaire (Eu), c'est-à-dire de l'énergie produite par la chute de 1 mm de pluie, qui est elle-même fonction de l'intensité de la pluie.

Mais cette intensité varie au cours d'une même pluie et, pour calculer l'énergie unitaire, il faut partager la pluie en périodes d'intensité homogène (Ih). La lecture du pluviogramme permet de réaliser facilement cette opération.

WISCHMEIER a montré que l'énergie unitaire Eu était liée à l'intensité homogène Ih par une relation de la forme :

$$Eu = a + b \log Ih$$

(1) Si l'on exprime Eu en pied-tonne/acre par pouce d'eau tombée et Ih en pouce/heure, l'équation s'écrit :  
 Eu = 916 + 331 Log Ih.

où a et b sont des paramètres variables avec les unités choisies (1). Cette relation permet d'établir un abaque donnant les différentes valeurs de Eu en fonction de Ih (tableau 1).

Connaissant, d'après le pluviogramme, la durée des périodes d'intensité homogène et le nombre de mm d'eau tombée pendant chacune de ces périodes, on en déduit facilement l'intensité homogène (en mm/h) pendant une période et on peut lire sur l'abaque la valeur de l'énergie unitaire (en pied-t/acre) correspondant à cette intensité.

L'énergie de la pluie pendant une période donnée d'intensité homogène est égale au produit de l'énergie unitaire par le nombre de mm d'eau tombée pendant cette période.

Enfin, l'énergie globale Eg que nous cherchons est la somme des énergies de chaque période.

Quant à l'intensité maximum en 30 minutes, c'est la hauteur d'eau maximum tombée pendant une période de 30 minutes consécutives. En multipliant cette hauteur par 2, on obtient l'intensité maximum Im de la pluie, exprimée en mm par h.

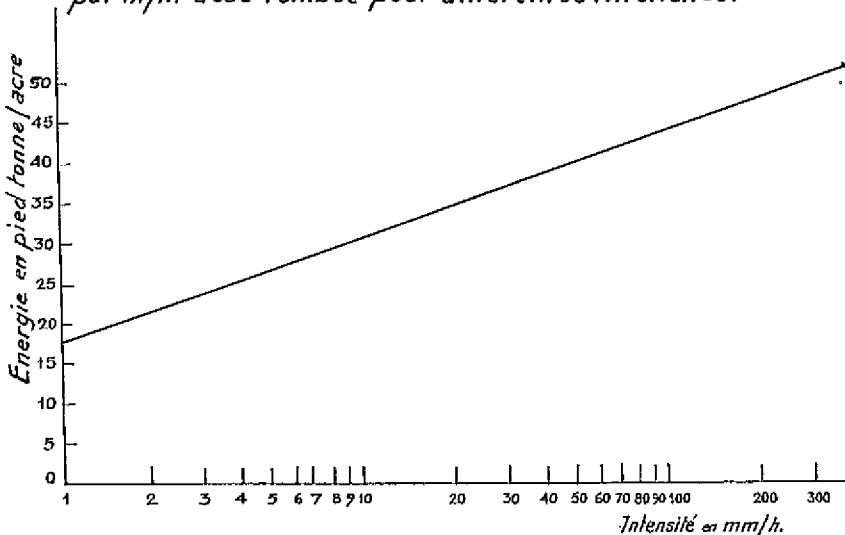
On calcule l'indice pluie moyen annuel, que WISCHMEIER appelle aussi indice d'érosion, en analysant les relevés pluviométriques de toutes les pluies tombées au cours de l'année. Les Américains ne retiennent d'ailleurs que les pluies dont la hauteur est au moins égale à ½ pouce (12,7 mm) et considèrent qu'une période de 6 h au cours de laquelle il est tombé moins de 0,05 pouce (1,27 mm) marque la séparation entre 2 pluies (2).

La moyenne annuelle doit être établie à partir d'observations portant sur 10 ans au minimum. A titre d'exemple, les indices trouvés par les Américains sont les suivants :

— Sud-Est des E. U. . . . .	142 à 779
— Centre-Nord des E. U. . . . .	64 à 261
— Nord-Est des E. U. . . . .	62 à 220.

Tableau 1

*Abaque donnant l'énergie de la pluie (en pied-tonne/acre) par m/m d'eau tombée pour différentes intensités.*



(d'après les « Cahiers de Pédologie » de l'ORSTOM).

Au C. T. F. T. Madagascar, la Division de Lutte contre l'érosion a trouvé les résultats suivants tout à fait comparables aux résultats américains (moyenne sur 4 ans) :

Taheza . . . . .	288
Manankazo (bassin versant) . . .	509
Manankazo (parcelles) . . . . .	473
Ampamaherana . . . . .	353
Nanokely . . . . .	365

En groupant les résultats mensuellement, on peut en déduire les mois les plus dangereux du point de vue de l'érosion et l'on observe, d'une manière très générale, que ce sont toujours les premiers mois de la saison des pluies.

(2) Pour rester dans le système métrique, il faudrait prendre respectivement 10 mm et 1 mm.

### Indice-sol = Facteur K.

Le facteur K, qui caractérise la sensibilité d'un sol à l'érosion, est calculé par l'équation de WISCHMEIER, en donnant à tous les autres facteurs la valeur 1 et en mesurant les pertes en terre par unité de l'indice d'érosion. Les Américains ont obtenu ainsi des valeurs de K qui s'échelonnent de 0,1 pour les sols les plus stables (alluvions, rendzines) à 0,5 pour les plus sensibles (argiles, marnes). L'indice-sol peut varier par conséquent de 1 à 5 tout au moins pour ce qui concerne les études faites dans ce domaine aux Etats-Unis. Il est possible qu'en Afrique on soit amené à étudier des sols plus variés et à prendre une échelle plus étendue pour tenir compte des variations plus larges du facteur K.

En Tunisie, on a adopté l'échelle suivante qui donne au facteur K des valeurs variant de 0,05 à 0,6.

- K ≤ 0,05 : sols très peu érodibles
- 0,05 < K ≤ 0,1 : sols faiblement érodibles
- 0,1 < K ≤ 0,2 : sols moyennement érodibles
- 0,2 < K ≤ 0,4 : sols fortement érodibles
- 0,4 < K ≤ 0,6 : sols très fortement érodibles

### Indices de pente = Facteurs L.S.

Les pertes en terre sont également fonction de la pente ; c'est même ce facteur qui joue, dans les formules de RAMSER et de SACCARDY, le rôle principal.

Dans l'équation de WISCHMEIER, le facteur LS est lié aux paramètres de pente par la formule :

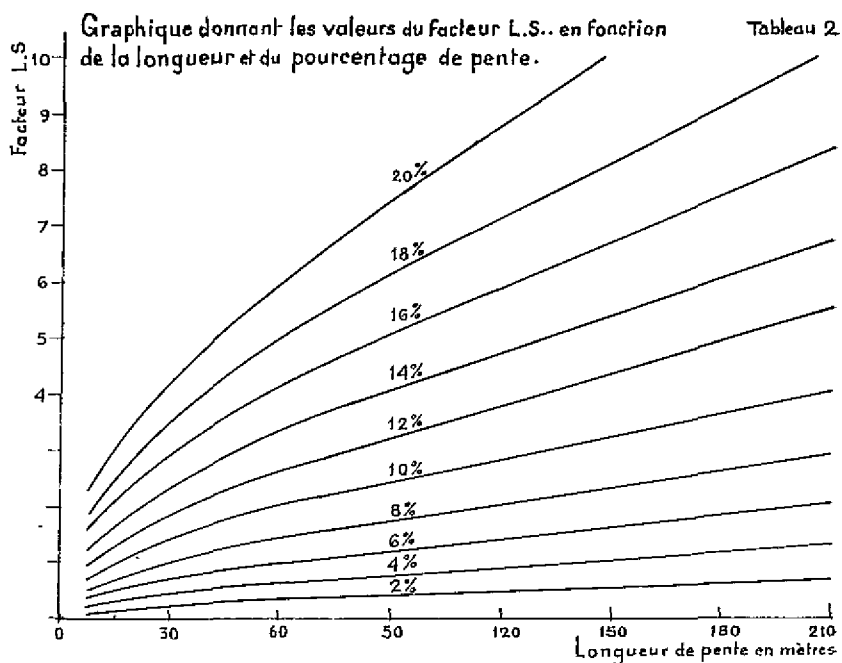
$$LS = \frac{\sqrt{l}}{100} (0,76 + 0,53 s + 0,076 s^2)$$

où :

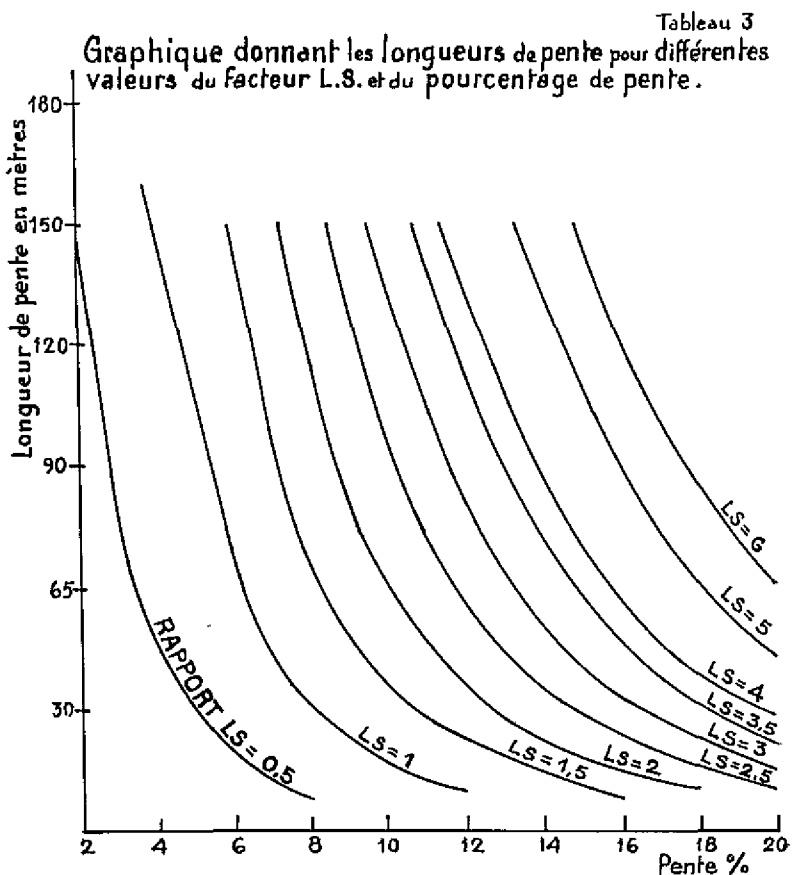
l est la longueur de pente (en pieds),  
s le coefficient de pente (exprimé en pourcentage). LS = 1 pour une pente de 9 % longue de 72,6 pieds (22,12 m). Pour simplifier le calcul, LS est déterminé graphiquement à partir de la pente et de la longueur de pente (voir tableaux 2 et 3).

### Indice de culture = Facteur C.

Les pertes en terre sont liées à la couverture végétale du sol ; elles sont réduites quand le sol est couvert



(d'après les « Cahiers de Pédologie » de l'ORSTOM).



(d'après les « Cahiers de Pédologie » de l'ORSTOM).

d'une végétation permanente (forêt, prairie), elles sont au contraire très fortes quand le sol est nu, surtout s'il a été travaillé par la culture.

C'est pourquoi WISCHMEIER a donné à l'indice de culture la valeur maximale ( $C = 1$ ) dans le cas d'une jachère continuellement travaillée. Mais le calcul du facteur C est en réalité assez complexe : l'érosion varie non seulement avec les cultures mais aussi, pour chaque culture, avec les différentes phases du cycle cultural. En effet, la plante protège plus ou moins bien le sol suivant sa nature mais aussi pour une même plante, suivant sa densité et sa taille. L'effet de couverture ne joue le plus souvent que pendant un temps relativement court coïncidant avec la période de végétation : avant le semis et après la récolte le sol reste nu et, même pendant plusieurs mois après le semis, la plante n'est pas encore assez développée pour pouvoir jouer un rôle de protection suffisamment efficace.

Aussi WISCHMEIER a-t-il partagé le cycle cultural en 5 périodes :

- 1° du labour au semis,
- 2° premier mois après le semis,
- 3° deuxième mois après le semis,
- 4° du deuxième mois après le semis à la récolte,
- 5° de la récolte au labour.

L'expérience montre que les pertes en terre varient beaucoup d'une période à l'autre, ce qui entraîne pour le facteur C des variations importantes. Il est maximum en général pendant les 2 mois qui suivent le semis parce qu'à cette époque, qui coïncide avec le début de la saison des pluies, le sol n'est pas encore protégé par la plante qui n'a pas atteint une taille suffisante.

En ajoutant les 5 valeurs partielles correspondant aux 5 périodes différentes du cycle cultural, on obtient la valeur du facteur C pour un an. On fait en général le calcul pour un assolement qui s'échelonne sur plusieurs années et on en déduit la moyenne annuelle.

On peut ainsi déterminer l'influence d'un assolement sur les pertes en terre, particulièrement au cours des périodes les plus sensibles de l'année. On peut aussi en déduire le danger présenté par tel ou tel assolement pour ce qui concerne l'érosion du sol et conseiller son remplacement par un autre moins dangereux.

A titre d'exemple, nous indiquons ci-dessous les valeurs de C pour différentes cultures ou formations végétales :

— forêt, prairie .....	0,01
— assolements avec fourrage .....	0,2
— assolements céréaliers .....	0,4
— blé (en culture continue) .....	0,7
— arboriculture fruitière .....	0,9
— jachère travaillée .....	1

## CONCLUSION

La formule de WISCHMEIER permet donc dans tous les cas de calculer la densité des ouvrages anti-

## Indice de traitements = Facteur P.

Les traitements anti-érosifs entraînent une réduction plus ou moins forte de l'érosion ; ils sont nécessaires chaque fois que les pertes en terre dépassent un certain seuil, variable avec la nature du sol, et qui est déterminé par les pédologues en fonction de la vitesse de pédogenèse.

WISCHMEIER a donné au facteur P la valeur maximale ( $P = 1$ ) pour une culture faite suivant le sens de la pente. Les différentes valeurs de P, variables également suivant la pente, sont indiquées dans le tableau ci-dessous :

Valeur de P en fonction de la pente

Pente %	Labour en courbes de niveau	Cultures en bandes alternées
1 à 2	0,6	0,3
2 à 7	0,5	0,25
7 à 12	0,6	0,3
12 à 18	0,8	0,4
18 à 24	0,9	0,45

Dans le système de culture en bandes alternées, la largeur à donner aux bandes est fonction de la pente, comme l'indique le tableau ci-dessous :

Pente %	Largeur des bandes (mètres)
2 à 7	30 à 35
7 à 12	25 à 30
12 à 18	20 à 25
18 à 24	15 à 20

Connaissant la tolérance d'érosion T admise par les pédologues pour une parcelle déterminée, nous pouvons calculer, grâce à l'équation de WISCHMEIER, la longueur maximale du champ pour que les pertes en terre ne dépassent pas le seuil fixé.

Le facteur de pente LS est donné par la formule :

$$LS = \frac{2,24 T}{RKCP}$$

R, K et C sont donnés en fonction des conditions climatiques, de la nature du sol et de l'assolement choisi. Nous prendrons pour P la valeur correspondant aux cultures en courbe de niveau, qu'il est toujours facile de réaliser, et nous obtenons pour LS une certaine valeur qui nous permet de calculer L en fonction du pourcentage de pente, au moyen du tableau n° 3. Si L est supérieur à la longueur du champ, il est inutile de faire des ouvrages ; par contre, si L est inférieur à la longueur du champ, il faudra fractionner celle-ci en construisant des ouvrages dont la présence diminuera la longueur de pente : murettes de pierres, levées de terre, fossés ou banquettes.

érosifs en fonction des différents facteurs naturels et culturaux. Mais son application suppose que l'on



Photo Sarfin.

*Boukom bé (Dahomey). Travaux de Défense et restauration des sols. Correction des ravins par des seuils en pierre sèche.*

a déterminé au préalable, pour une région présomée homogène, la valeur des indices pluie et sol, que l'assolement a été fixé et que l'on connaît le facteur C correspondant.

Il faut évidemment plusieurs années d'expérimentation et de mesures pour définir ces facteurs avec une précision suffisante. Les travaux ont été faits aux Etats-Unis, ils sont en cours en Tunisie et à Madagascar.

Mais l'intérêt de cette formule est aussi de mettre en évidence la nécessité d'épuiser toutes les méthodes dites « biologiques » de lutte contre l'érosion, avant de se lancer dans des travaux de terrassement coûteux et souvent délicats.

Le facteur R (indice-pluie) est déterminé par le climat et il n'est pas possible de le modifier.

Pour diminuer A (quantum d'érosion), on peut alors agir sur le facteur K (indice-sol) en améliorant la structure et la perméabilité, ce qui s'obtient généralement par incorporation au sol d'humus sous forme de fumure. On peut aussi agir sur le facteur C, soit en maintenant une couverture végétale permanente (forêt, prairie) chaque fois que l'érosion est particulièrement dangereuse, soit en fixant un assolement tel que le sol reste suffisamment protégé pendant la période critique qui coïncide presque toujours avec le début de la saison des pluies. On

peut enfin agir sur le facteur P en préconisant les cultures en courbes de niveau, ce qui ne nécessite pas de la part des paysans une technique particulièrement évoluée, ou, ce qui est encore préférable, les cultures en bandes alternées chaque fois que l'assolement permet cette pratique et que les cultivateurs sont capables d'en comprendre l'intérêt. C'est seulement quand on aura épuisé ces trois possibilités de lutte et que l'érosion mesurée à l'aval du bassin versant dépassera encore la tolérance fixée par les pédologues, qu'il sera nécessaire d'agir sur les facteurs de pente par des travaux anti-érosifs appropriés.

D'une manière générale, l'érosion est le résultat de l'action sur le sol de certains facteurs du climat. Comme il est pratiquement impossible de modifier les facteurs climatiques, on ne peut agir que sur le sol lui-même, ou sur la végétation qui, nous l'avons vu, constitue dans tous les cas la protection la plus efficace contre l'érosion. Celle-ci résulte d'ailleurs presque toujours d'une destruction par l'homme de la végétation naturelle (forêt ou prairie) et le meilleur remède consiste à reconstituer cette protection, soit en modifiant les assolements, soit, dans les cas les plus graves, en supprimant totalement la culture pour la remplacer par une couverture végétale permanente.

P. GOUJON.