

**TRAVAUX
ET DOCUMENTS
DE L'O.R.S.T.O.M.**

**ÉROSION ET RUISSELLEMENT
EN AFRIQUE DE L'OUEST**
vingt années de mesures
en petites parcelles expérimentales



par
Éric ROOSE

TRAVAUX ET DOCUMENTS DE L'O.R.S.T.O.M.

N° 78

O.R.S.T.O.M.

PARIS

1977

**ÉROSION ET RUISSELLEMENT
EN AFRIQUE DE L'OUEST**

**vingt années de mesures
en petites parcelles expérimentales**

par
Éric ROOSE

« La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41,
« d'une part, que les «copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste
« et non destinées à une utilisation collective» et, d'autre part, que les analyses et les courtes
« citations dans un but d'exemple et d'illustration, «toute représentation ou reproduction
« intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou
« ayants cause, est illicite» (alinéa 1er de l'article 40).

« Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait
« donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code Pénal).

TABLE DES MATIÈRES

Introduction	9
Chapitre 1 – LE MILIEU	11
Chapitre 2 – LE DISPOSITIF ET SA PRÉCISION	17
1. Approche descriptive	17
2. Approche expérimentale	18
Chapitre 3 – LES RÉSULTATS QUANTITATIFS ET LEUR ANALYSE	23
1. La pluie : cause primaire de l'érosion	24
2. L'érodibilité du sol	37
3. La pente	41
4. Le couvert végétal et les techniques culturales	50
5. Quelques techniques antiérosives	67
6. Limites de l'équation de Wischmeier et Smith	77
Chapitre 4 – ESSAI DE BILAN DES PERTES PAR ÉROSION SUPERFICIELLE	81
1. Évolution du sol en place	81
2. Essai de bilan hydrique	90
3. Pertes chimiques et colloïdales imputables aux phénomènes d'érosion superficielle	94
4. Conclusions sur l'évolution du sol soumis à l'érosion	97
Chapitre 5 – CONCLUSIONS GÉNÉRALES	99
Bibliographie	101

RÉSUMÉ

L'auteur présente une synthèse des résultats obtenus depuis une vingtaine d'années en casés d'érosion sur des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux de l'Ouest africain. Il en tire les conséquences sur l'évolution actuelle de ces sols. Après avoir estimé la précision des dispositifs de mesure, il quantifie l'influence des facteurs modifiant l'érosion et le ruissellement dans le cadre général de l'équation de prévision de l'érosion de WISCHMEIER.

Les graves dégâts d'érosion constatés localement en Afrique proviennent avant tout de l'agressivité ($R = 200$ à 2000) des pluies tropicales (dont l'énergie est deux à six fois plus élevée qu'en zone tempérée) plutôt que d'une hypothétique fragilité des sols tropicaux ($K = 0,02$ à $0,18$ pour les sols ferrallitiques et $0,20$ à $0,30$ pour les sols ferrugineux tropicaux). L'action protectrice du couvert végétal domine largement tous les autres facteurs : d'où l'intérêt des méthodes biologiques conservatrices de l'eau et du sol. Lorsque la couverture végétale est insuffisante, interviennent l'inclinaison de la pente (variabilité 1 à 25), l'érodibilité du sol (variabilité 1 à 12), les techniques culturales (variabilité 1 à 10) et les pratiques antiérosives classiques (variabilité 1 à 10).

L'analyse du sol en place, du bilan hydrique et des pertes d'éléments minéraux par érosion montre l'importance de l'aspect qualitatif de l'érosion en nappe sur les sols tropicaux. Plus la pente est faible et le couvert végétal important, plus l'érosion est sélective vis-à-vis des éléments nutritifs et des colloïdes organiques et minéraux.

En conclusion, il semble que sur les vieilles surfaces pénéplanées de l'Afrique de l'Ouest, les techniques de conservation de l'eau et du sol complètent celles qui permettent une exploitation intensive du milieu tout en maintenant son potentiel de fertilité.

SUMMARY

The author presents a synthesis of the data accumulated during 20 years on runoff plots on ferrallitic and ferruginous tropical soils of West Africa. He analyses the device accuracy and the influence of factors modifying the erosion potential within the limits of the WISCHMEIER'S equation.

The serious erosion damages observed locally in Africa come more from the aggressivity of tropical rainfalls (R index = 200 to 2000) than from the legendary tropical soil susceptibility (K = 0,02 to 0,18 for ferrallitic and 0,20 to 0,30 for ferruginous tropical soils). The protection from the vegetative cover (C = 1 to 0,001) is by far the most important factor : therefrom comes the interest of biological methods of soil and water conservation. When the vegetative cover is not sufficient, intervene the slope steepness (SL = 0,1 to 2,5), the soil susceptibility (K = 0,02 to 0,30), the cultural technics (C = 1 to 0,1) and the supplemental antierosive practices (P = 1 to 0,1).

The analyse of soil samples, of water balance and of losses by erosion shows the importance of the qualitative aspects of sheet erosion on tropical soils. The more is the slope steepness gentle and the cover wide, the more is the erosion selective concerning nutrients and organic and mineral colloids.

In conclusion, it seems that on the old hilly surfaces of West Africa, the soil and water conservation technics are very similar to those wich allow an intensive and permanent exploitation of the soil.

INTRODUCTION

L'érosion est un problème vieux comme le monde. Toutes les civilisations y ont été confrontées sur la route du développement et ont tenté d'y remédier avec des succès variables en inventant des techniques antiérosives adaptées aux circonstances écologiques et socio-économiques. Ainsi, là où les terres sont rares et la main d'œuvre abondante, l'homme a édifié patiemment des terrasses en gradins lui permettant d'étendre le domaine agricole jusque dans la montagne. En zone tempérée où s'est développée une agriculture mécanisée, naquirent les techniques de terrassement. Par contre, sous les tropiques humides ou secs, la population très dispersée s'est contentée la plupart du temps de cultures itinérantes comportant une courte période d'exploitation suivie d'une longue jachère.

Or, depuis trente ans dans ces régions tropicales, la population s'est concentrée dans certaines zones sous l'effet conjugué des pressions démographiques, administratives et socio-économiques. Avec la réduction de la durée de la jachère qui s'en est suivie, sont apparus localement des phénomènes d'érosion accélérée. De plus, sous l'effet de la croissance de la demande en matières premières, on a cru bon d'étendre et de radicaliser les défrichements par de puissants moyens mécaniques. Devant les échecs trop souvent constatés, les agronomes accusèrent la fragilité des sols tropicaux et l'agressivité du climat avant même d'adapter les façons culturales et les techniques antiérosives mises au point en régions tempérées.

Pour faire face à ce problème préoccupant, l'ORSTOM et les Instituts Français de Recherches Appliquées, sous l'instigation du professeur FOURNIER, ont mis en place depuis 1954 tout un réseau de petites parcelles d'études expérimentales pour évaluer l'ampleur des dangers d'érosion, ses causes, les facteurs qui en modifient l'expression et les moyens de lutte antiérosive adaptés aux conditions africaines.

A Adiopodoumé, en Côte d'Ivoire, c'est en avril 1956 que furent installées les six premières cases d'érosion par B. DABIN et N. LENEUF (1954). Une septième parcelle fut montée en 1957, deux autres en 1970 et trois autres en 1975 en même temps que l'ensemble du dispositif était adapté à l'utilisation d'un simulateur de

pluie. Les expérimentations furent successivement confiées à A. PERRAUD (1960-63) puis à E. ROOSE (1964-76).

L'objet de ce rapport n'est pas de faire un inventaire exhaustif des connaissances sur les problèmes posés par l'érosion mais de présenter une synthèse des résultats acquis à Adiopodoumé et de les comparer avec ceux des autres stations d'Afrique de l'Ouest dans le cadre de l'équation de prévision de l'érosion proposée par WISCHMEIER et SMITH (1960). Ce rapport résume et complète, avec les données récentes, la thèse de docteur ingénieur présentée par l'auteur à Abidjan en juin 1973 sous la direction de F. LELONG, professeur de géologie à l'Université d'Orléans et de F. FOURNIER, directeur scientifique à l'ORSTOM.

Il ne peut être question d'exposer ici en détail tous les résultats obtenus en cases d'érosion en Afrique de l'Ouest*, mais plutôt d'illustrer par des exemples précis les principales conclusions qui se dégagent des essais et qui peuvent être utiles aux agronomes, pédologues et planificateurs chargés de mettre en valeur ces régions.

Ces résultats s'appliquent tout particulièrement aux sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux (dominance d'argile kaolinitique non gonflante) qui constituent la plus grande part des terres cultivées des vieilles surfaces ondulées du continent africain.

* Il ne nous est pas paru utile de publier l'ensemble du détail des résultats : ceux-ci n'intéressent que quelques rares spécialistes qui peuvent se les procurer dans les documents multigraphiés (rapports annuels, thèse et divers...) disponibles à l'ORSTOM ou dans les différents instituts.

Chapitre 1

LE MILIEU

Les parcelles d'érosion du Centre ORSTOM d'Adiopodoumé, en Côte d'Ivoire, sont situées à 5°20' de latitude Nord, 4°8' longitude Ouest et 30 m d'altitude. Le réseau établi en Afrique de l'Ouest couvre une large gamme de latitudes (5° Nord à Abidjan à 14° Nord à Allokoto) et surtout de longitude (16° Ouest à Séfa à 20° Est à Grimari) : voir la carte de situation (Fig. 1).

La végétation naturelle passe de la forêt dense humide sempervirente en basse Côte d'Ivoire à la savane soudano-guinéenne puis sahélienne en Haute-Volta et au Niger.

A Abidjan, le climat est du type subéquatorial à quatre saisons : il se caractérise par des températures variant peu ($\pm 2^\circ$) autour de la moyenne 26°3 C, une humidité relative proche de 80 %, une évapotranspiration potentielle (ETP Turc) de l'ordre de 1250 mm et des précipitations annuelles moyennes de 2100 mm dont la moitié peut tomber en 6 à 8 semaines (Tableau 1). A mesure qu'on se dirige vers des latitudes plus élevées, les précipitations diminuent et se concentrent en une seule saison (entre Bouaké et Korhogo), tandis que l'insolation, l'ETP et la température maximale augmentent, permettant au sol de se ressuyer rapidement entre les averses.

Cependant, les valeurs moyennes des observations climatiques n'ont qu'une signification limitée puisque les phénomènes d'érosion sont exacerbés lors des averses exceptionnelles. La fréquence de telles averses, calculée par BRUNET-MORET (1963-67) est présentée au Tableau 2. On observe une décroissance parallèle entre la hauteur de l'averse d'une récurrence donnée et celle des précipitations annuelles moyennes. De même, les courbes «intensité x durée», dont quelques valeurs figurent au Tableau 3, se déplacent parallèlement en fonction des précipitations journalières annuelles (loi de Pearson III). Cela signifie en clair que, dans la zone étudiée (2000 à 500 mm de pluie/an), les averses exceptionnelles ont partout la même allure, que leurs intensités varient selon les mêmes lois et qu'on peut donc s'attendre à ce que le climat soit d'autant plus agressif que les précipitations annuelles moyennes sont élevées.

Tableau I
 Quelques informations climatiques sur la région comprise entre Abidjan (Côte d'Ivoire) et Ouagadougou (Haute-Volta)

	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Total ou moyenne
Précipitations (mm)													
Adiopodoumé	30	60	107	143	301	683	275	42	79	178	158	82	2138
Bouaké aéroport	16	53	82	133	138	167	120	98	180	148	36	15	1186
Korhogo	7	15	50	96	124	164	188	319	261	127	42	12	1415
Ouagadougou	0	0	1	19	81	116	191	264	151	37	0	0	860
E T P (mm)													
Adiopodoumé	108	114	130	123	116	79	82	78	82	111	115	107	1245
Bouaké aéroport	122	122	132	123	122	93	82	78	91	111	107	104	1287
Korhogo/Ferkessédougou	163	155	155	143	146	129	116	107	116	141	137	130	1638
Ouagadougou	187	188	216	178	155	136	129	116	126	149	165	160	1905
Insolation (heures)													
Adiopodoumé	164	178	195	184	174	85	91	75	85	158	186	169	1744
Bouaké aéroport	196	195	204	184	187	115	88	73	112	164	168	163	1849
Korhogo/Ferkessédougou	281	246	255	232	254	228	191	152	174	247	260	261	2781
Ouagadougou	281	244	266	230	259	226	210	177	206	269	273	262	2903
Température moyenne (maxi. + mini.)/2													
Adiopodoumé	26,7	27,5	27,7	27,5	27,1	25,6	24,8	24,4	25,0	26,0	26,6	26,3	26,3
Bouaké aéroport	26,8	27,8	27,8	27,4	26,7	25,5	24,4	24,2	24,9	25,5	26,1	26,1	26,3
Korhogo/Ferkessédougou	25,7	28,3	29,7	29,2	28,4	26,8	25,9	25,8	25,9	27,1	27,2	25,5	27,1
Ouagadougou	25,0	27,9	30,8	32,2	30,9	28,3	26,8	26,0	26,6	28,7	28,2	25,7	28,1

Sources

- Adiopodoumé : GOSSE - ELDIN (1974) : Pluie 1948-1973 ; ETP Turc 1956-1974 ; insolation 1956-1973 ; température de 1948-1973.
- Bouaké, ASECNA : ROOSE - BERTRAND (1972) : Pluie 1948-1970 ; ETP Turc 1948-1974 ; insolation 1948-1970 ; température de 1948-1970.
- Korhogo, ASECNA : MOLINIER (1971) : Pluie : ASECNA 1938-1970 ; ETP Turc Ferkessedougou 1953-1974 ; insolation Ferkessedougou 1961-1970 ; température Ferkessedougou 1961-1970.
- Ouagadougou, ASECNA : ROOSE - BIROT (1970).

On voit au Tableau 2 qu'on peut s'attendre à une pluie de plus de 130 mm chaque année et de plus de 200 mm tous les cinq ans à Abidjan ; dans les stations situées plus au nord, il est probable d'observer chaque année une pluie de 60 à 80 mm et plus de 100 mm tous les cinq ans. Quant aux intensités (Tableau 3), elles peuvent dépasser 200 mm/h pendant 5 à 10 mn, 100 mm/h pendant 30 mn et 80 mm/h pendant 1 heure à Abidjan. Plus au nord, elles atteignent rarement 100 mm/h pendant 10 mn, 60 mm/h pendant 30 mn et 50 mm/h pendant 1 heure.

Tableau 2
Hauteur des précipitations journalières exceptionnelles en fonction de la latitude
(BRUNET-MORET, 1963 à 1967)

	Nombre d'années observées	Moyenne annuelle	Probabilité calculée					
			1 an	2 ans	5 ans	10 ans	50 ans	100 ans
Abidjan aéroport	28	2124	135	...	(200)	230	...	(280)
Bouaké	42	1199	71	84	100	113	114	156
Korhogo	23	1404	79	92	110	123	156	169
Ouagadougou	32	868	62	74	92	107	147	166

Tableau 3
Relation «intensité x durée» pour les averses exceptionnelles de récurrence 1 et 10 ans

	Pluie journalière de récurrence donnée	Intensité maximum en					
		5'	10'	30'	60'	180'	
ROOSE (1973)							
Adiopodoumé							
· chaque année	130 à 150	120-150	100-130	75-100	40-60	15-30	
· exceptionnel en 7 ans	210 à 280	240-200	200-150	150-100	120-70	45	
BRUNET-MORET (1963-1967)							
Abidjan	1 an	135	144	126	92	66	30
	10 ans	230	228	204	130	102	42
Bouaké	1 an	72	—	95	60	45	20
Korhogo	1 an	79	—	100	65	49	22
Ouagadougou	1 an	62	—	100	59	40	18

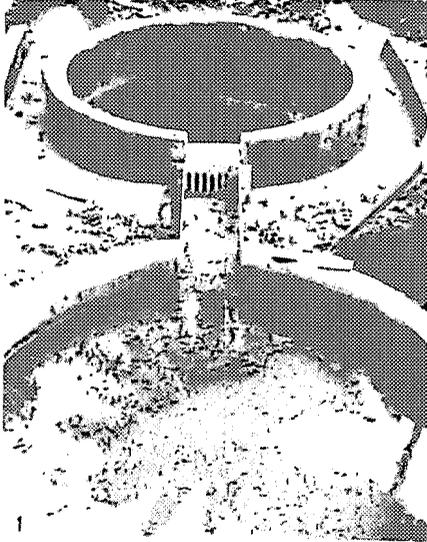
En basse Côte d'Ivoire, les sédiments argilo-sableux du Continental Terminal s'étendent en un mince croissant de 400 km de long et au maximum de 40 km de large entre Sassandra et le Ghana (soit 8 000 km²) : les mêmes dépôts se retrouvent au Togo, au Dahomey et en Nigéria (Terres de barre). Il s'y développe un sol ferrallitique très désaturé appauvri modal (AUBERT, SEGALEN ; 1966), riche en sables grossiers (plus de 50%), à profil homogène et perméable sur une grande profondeur ($K = 10$ à 120 cm/h), acide, à faible capacité d'échange de cations ($CEC = 1$ à 5 mé pour 100 g), de couleur grise en surface ($MO = 1$ à 3%) et brun jaune en profondeur (plus rouge en zone sèche). L'horizon superficiel a des propriétés physiques et chimiques très voisines de celles des sols ferrallitiques sur granite qui couvrent les 2/3 de la Côte d'Ivoire et de très larges étendues dans les pays voisins. Les sols ferrallitiques sur schistes sont souvent plus riches en limons et en sables fins, moins perméables et donc plus sensibles à la battance des pluies, au ruissellement et à l'érosion. Il en va de même pour les sols ferrugineux qui, en outre, sont particulièrement pauvres en matières organiques, mal structurés, très cohérents en saison sèche et pâteux en saison des pluies. Quant aux sols bruns et aux vertisols riches en argiles gonflantes, ils réagissent différemment aux pluies : le ruissellement et l'érosion en ravines y sont très actifs lorsque les fentes de dessiccation sont bouchées.

Tableau 4

Caractéristiques des principales stations d'étude de l'érosion citées dans le texte (voir Fig. 1)

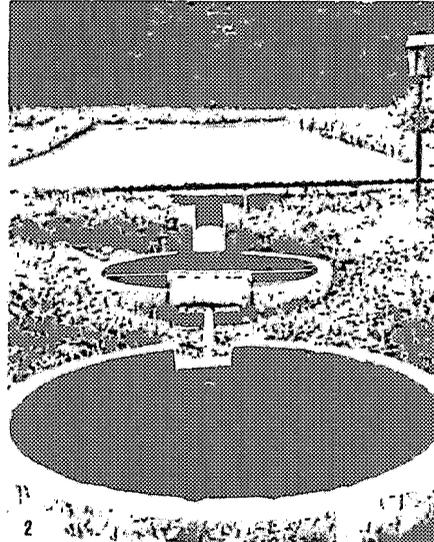
	Nombre parcelles	Pente %	Durée études	Milieu
Côte d'Ivoire				
1. Adiopodoumé (ORSTOM)	+ 9 2	4-7-23 7-65	1956-70 1965-75	Forêt dense humide : Pluie : 2100 mm en 4 saisons SOL FERRALLITIQUE fortement désaturé, appauvri sur sédiments argilo-sableux tertiaires
2. Bouaké (ORSTOM puis IRAT)	+ 5 1	4	1960-74	Savane arbustive guinéenne : Pluie : 1200 mm en 4 saisons SOL FERRALLITIQUE moyennement désaturé, remanié rajeuni sur granite.
3. Korhogo (ORSTOM)	3	3	1967-75	Savane arbustive dégradée : Pluie , 1400 mm en 2 saisons SOL FERRALLITIQUE moyennement désaturé, remanié, appauvri sur granite
Haute-Volta				
4. Gampela (CTFT)	4	0,7	1966-71	Savane arborée cultivée : Pluie : 800 mm en 2 saisons SOL FERRUGINEUX tropical gravillonnaire dès 20 cm sur granite
5. Gonsé (ORSTOM x CTFT)	1	0,5	1968-74	Savane arborée Soudano-sahélienne : Pluie : 800 mm en 2 saisons SOL FERRUGINEUX tropical lessivé à taches et concrétions sur cuirasse à 180 cm, dérivé de granite
6. Saria (ORSTOM x IRAT)	4	0,7	1971-74	Savane arborée cultivée : Pluie : 830 mm en 2 saisons SOL FERRUGINEUX tropical lessivé sur carapace à 10-50 cm de profondeur, sur granite
Dahomey				
7. Agonkamey (ORSTOM)	3	4	1964-70	Fourré dégradé cultivé : Pluie : 1200 mm en 4 saisons SOL FERRALLITIQUE, faiblement désaturé, modal sur sédiments argilo- sableux tertiaires
Sénégal				
8. Séfa (ORSTOM puis IRAT)	10	1 à 2	1954-68	Forêt claire : Pluie : 1400 mm en 2 saisons SOL FERRUGINEUX tropical lessivé à taches et concrétions sur granite
Niger				
9. Allokoto (CTFT)	4	3	1966-71	Savane arbustive sahélienne : Pluie : 500 mm en 2 saisons VERTISOL sur calcaire

A – Détails des cases d'érosion d'Adiopodoumé



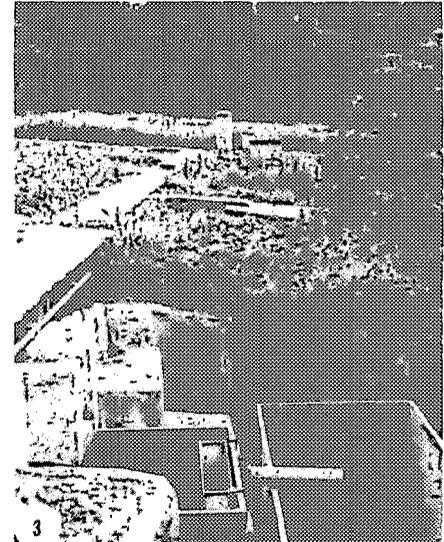
1956

(cf. ORSTOM - Phot. B. DABIN)



1973

(cf. ORSTOM - Phot. G. PETIOT)



1973

(CF. ORSTOM - Phot. G. PETIOT)

Chapitre 2

LE DISPOSITIF ET SA PRÉCISION

1. APPROCHE DESCRIPTIVE

A Adiopodoumé, le dispositif comprend un pluviographe à augets CERF (rotation en 24h) (voir photos), permettant de mesurer la hauteur et l'intensité des pluies en 5 mn, et 6, 7 puis 9 parcelles d'érosion de 90 m² de surface, de pentes égales à 4, 5-7 et 23 %, longues de 15 m et isolées de l'extérieur par des tôles fichées dans le sol. A l'aval, un canal récepteur en béton dirige les eaux et les terres érodées vers un système de stockage composé d'un piège à sédiments et de deux cuves de 1 ou 2 m³ reliées l'une à l'autre par un partiteur à sept tubes. Grâce à ce dispositif, on peut mesurer à la surface du sol les pertes en eau (= ruissellement), en terre fine migrant en suspension sur de grandes distances et en terre grossière rampant sur de courtes distances : l'érosion est par définition la somme des pertes en éléments solides. Pour aborder les problèmes d'érosion chimique, qui recouvre les migrations d'éléments solubles par les eaux de ruissellement et de drainage, il faudrait y adjoindre des lysimètres.

Les dispositifs sont semblables sur toutes les stations, sauf à Gampela et Allokoto où les parcelles atteignent des surfaces de 5 000 m² et sont munies à l'aval d'une cuve (2 x 2 x 1 m) dotée d'un seuil triangulaire et d'un limnigraphe Richard.

Étant données les erreurs provenant essentiellement du partiteur, du prélèvement de la charge solide en suspension dans les eaux et de l'humidité des terres de fond, on ne peut espérer obtenir une précision des résultats à moins de 10 % près.

Les mesures de débits liquides et solides réalisées par les hydrologues et les géographes intègrent non seulement l'érosion en nappe sur les chaînes de sols qui constituent les versants, mais aussi l'érosion linéaire au fond des rivières, les ravissements et les éboulements des berges et des versants, diminuée des sédiments déposés au pied des pentes et dans les plaines. L'isolement du milieu ambiant de parcelles de petites dimensions (100 à 250 m²) bien représentatives d'un sol et d'un

type de pente, permet d'obtenir des comparaisons valables de l'érosion en nappe et en rigole en fonction de différents traitements plutôt que des valeurs absolues. Ces mesures au niveau du champ cultivé intéressent au premier chef les agronomes et les pédologues car elles permettent dans une certaine mesure de quantifier l'influence relative des différents facteurs qui modifient l'expression de l'érosivité du climat. Encore faut-il être sûr que chaque parcelle réagit de la même façon aux pluies avant de comparer l'effet de différents traitements.

2. APPROCHE EXPERIMENTALE

Après dix années d'expérimentations diverses à la station d'Adiopodoumé, il paraissait utile de tester l'homogénéité de réaction des parcelles aux pluies. Ceci a été réalisé de deux façons successives :

- a - en soumettant toutes les parcelles à un même traitement ;
- b - en organisant un plan statistique permettant d'effectuer une analyse de variance.

2.1. Campagne 1966 : un seul traitement sur toutes les parcelles

Après labour à la houe, apport d'une fumure homogène et planage soigné, on a procédé en avril à la plantation de manioc sur buttes à 80 cm en quinconce.

Au Tableau 5, ont été regroupées les mesures d'érosion et de ruissellement de mai à juillet (période la plus significative), le tarage des partiteurs réalisé en 1973, l'évaluation du couvert développé par le manioc, une estimation de l'erreur de surface, la mesure des pentes et une estimation du précédent cultural caractérisé par l'érosion et le ruissellement mesurés sur chaque parcelle les dix années précédentes. On constate de fortes variations de l'érosion (7 à 159 t/ha) et du ruissellement (17 à 32 %) pour un même traitement, ce qui conduit à distinguer trois groupes de parcelles :

- a - **Parcelle 7** : érosion et ruissellement faibles s'expliquent par la faible pente (4,4 %), par le partiteur qui sous-estime le ruissellement (- 30 % pour les fortes pluies) et secondairement par l'histoire peu érosive de la parcelle.
- b - **Parcelle 6** : faible ruissellement mais forte érosion provenant d'une pente très forte (23 %), d'un faible couvert (54 % de la moyenne) et secondairement d'un partiteur qui sous-estime les fortes pluies (- 5 %), d'une erreur géométrique de surface (2,7 %) et ceci malgré une histoire peu érosive de la parcelle.
- c - **Parcelles 1 à 5** : érosion et ruissellement sont peu différents et leurs variations sont directement en relation avec le couvert végétal et le fonctionnement du partiteur.

On peut ranger par ordre décroissant l'influence des sources principales de variations :

1. le couvert végétal assuré par la plante cultivée et par les adventices domine

Tableau 5
Érosion et ruissellement sur les parcelles d'Adiopodoumé de mai à juillet 1966
Hétérogénéité de réaction des parcelles à un même traitement, et autres sources d'hétérogénéité

N° parcelles	Moyenne P1 à P5	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Érosion								
. mai à juillet 1966								
- t/ha	25,42	25,8	30,4	24,6	24,6	21,7	159,2	7,4
- % de la moyenne	100 %	102	<u>120</u>	97	97	<u>85</u>	<u>626</u>	<u>29</u>
Ruissellement								
. mai à juillet 1966								
- % de la pluie	29,2	28,7	32,1	27,6	26,9	30,6	27,0	17,7
- % de la moyenne	100 %	98	<u>110</u>	95	92	105	92	<u>61</u>
Tarage des partiteurs pour un débit de 50 l/min.	50/7 = 7,14 l/min. = 100 %	90 %	<u>115 %</u>	100 %	90 %	<u>85 %</u>	95 %	<u>70 %</u>
Couvert végétal du manioc mesuré le 6-7-1966	référence 24,5 m ² /90 m ²	87 %	<u>88 %</u>	95 %	111 %	<u>119 %</u> mauvaises herbes	<u>54 %</u>	94 % mauvaises herbes
Pente (le 15-3-72)	6,3 %	6,28 %	6,25 %	6,31 %	6,37 %	6,16 %	<u>23,37</u>	<u>4,43</u>

Erreur sur la surface du fait de la pente				0,6 à 0,7 %			2,7 %	0,3 %

Érosion moyenne annuelle depuis 1956	en t/ha/an	34,7	36,7	46,5	22,3	6,7	<u>0,338</u>	<u>1,0</u>
Ruissellement moyen annuel depuis 1956	en %	12 %	10 %	13 %	10 %	10 %	1 %	6 %

tout le reste. Les exemples abondent qui le prouvent mais on peut signaler dès maintenant que l'érosion sous une forêt dense secondaire de 65 % de pente n'est que d'une tonne/ha/an alors qu'elle atteint en moyenne 138 t/ha/an sur une parcelle nue voisine de 7 % de pente.

2. l'inclinaison et la forme de la pente ont un rôle majeur dès que le couvert du sol est incomplet.
3. le dispositif et en particulier le partiteur.
4. l'histoire de la parcelle semble n'avoir joué qu'un rôle secondaire et peu important à Adiopodoumé dans le cadre des sols ferrallitiques perméables, mais très désaturés, dans lesquels les matières organiques dont dépend la fertilité du sol se dégradent très vite (2-3 ans).

2.2. Campagnes 1967 à 69 : Comparaison d'une culture continue et d'une rotation

Après avoir mis en évidence l'hétérogénéité de réaction à la pluie des parcelles expérimentales, il restait à choisir un plan statistique simple permettant de dégager la variance «traitements» de celles du climat annuel et du dispositif. «Parmi les plans expérimentaux..., le carré latin est l'un de ceux qui permettent d'extraire la plus grande quantité d'informations à partir de la moindre quantité de matériel» (LISON, 1968). Pour dissocier l'influence du précédent cultural sous maïs, on a donc placé côte à côte une parcelle sous culture continue et une rotation triennale (maïs - arachide - jachère nue). Cette dernière a été conduite selon un plan d'expérimentation semblable à celui d'un carré latin dans lequel les traitements correspondent aux trois couvertures du sol, les colonnes aux trois parcelles et les lignes à l'agressivité des pluies des trois années consécutives.

On ne reportera ici que les moyennes des traitements, lignes et colonnes (voir Tableau 6).

En ce qui concerne l'érosion, l'influence du traitement (= couvert végétal) semble importante encore que les pertes en terre soient très fortes sous culture car on n'a utilisé aucune technique antiérosive. L'écart entre le maïs en continu et le maïs en rotation (donc le précédent cultural) n'est pas bien grand. Par contre, ici, la réaction individuelle des parcelles (pourtant choisies très voisines) est considérable (1 à 2). Les variations de l'érosion sur sol nu sont plus que proportionnelles à celles de l'agressivité du climat (RUSA voir définition chapitre 3.1.3.).

Le ruissellement varie de façon moins sensible que l'érosion: Il est nettement plus élevé sur sol nu que sous culture, mais du même ordre quel que soit le précédent cultural du maïs. Il ne semble pas strictement lié au transport solide de chaque parcelle ni à l'agressivité des pluies. Mais ces différences observées sur des moyennes ne tiennent pas compte des variations des réponses d'une année à l'autre. L'analyse de la variance de ce carré latin à trois traitements ne donne aucune signification, au niveau de probabilité de 5 %, aux variations de l'érosion

Tableau 6

Moyennes sur trois années des mesures d'érosion et de ruissellement sous une culture continue de maïs et sous une rotation triennale peu fertilisée

	Sol nu	Arachide	Maïs	Maïs/Maïs
Moyennes Traitements				
E (t/ha)	126,1	82,0	95,6	87,7
Ruiss. (mm.)	544	424	482	484
Moyennes (colonnes) Parcelles				
	P ₁	P ₂	P ₄	P ₅
E (t/ha)	64,8	128,5	110,4	87,7
Ruiss. (mm)	510	533	407	484
Moyennes (lignes) Pluie				
	1967	1968	1969	
	h = 1491 mm RUSA = 932	h = 1767 mm RUSA = 701	h = 1638 mm RUSA = 838	
E (t/ha)	126,5	86,1	91,1	
Ruiss. (mm)	380	358	402	

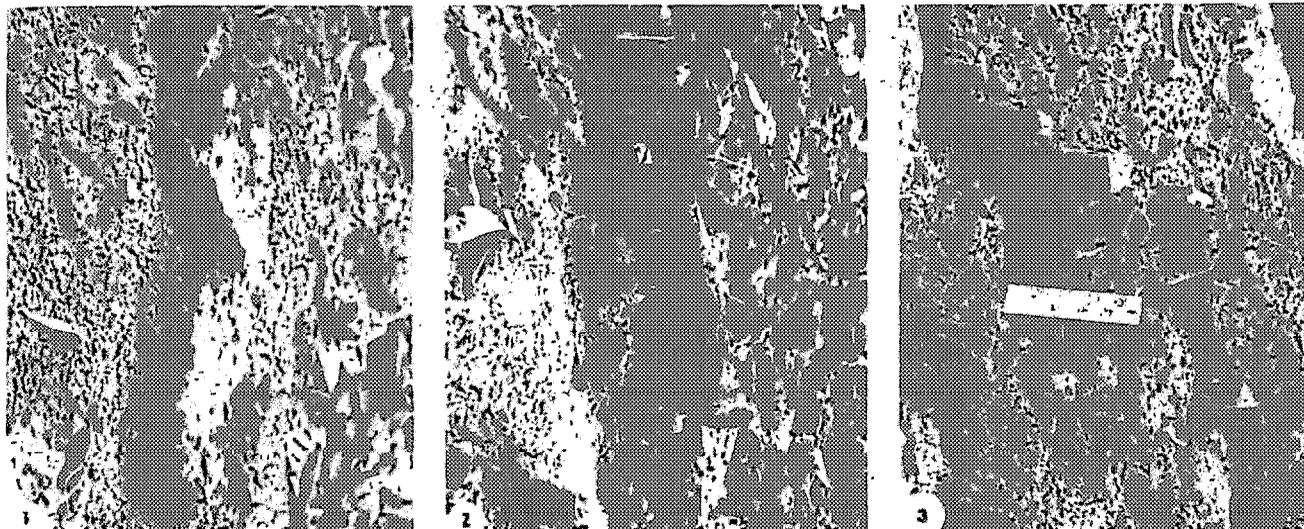
mais bien aux variations du ruissellement (exprimé en millimètres). Parmi les trois sources de variation celle du couvert végétal est la plus forte pour l'érosion tandis que la réaction individuelle de chaque parcelle puis l'érosivité climatique l'emportent pour le ruissellement : ceci souligne bien l'influence des partiteurs.

En conclusion, il ne faut pas tenter d'interpréter à tout prix la moindre différence de réaction aux pluies observées (bien souvent sans répétition) sur les cases d'érosion. La technique des cases d'érosion reste cependant un excellent outil de démonstration et d'analyse des phénomènes complexes d'érosion (= stabilité structurale) et de ruissellement (ou d'infiltration) à condition de l'utiliser correctement (les répétitions dans le temps et dans l'espace finissent par faire apparaître des tendances). Pour ce faire, il semble souhaitable de procéder à des comparaisons d'effets cumulatifs par couples sur des parcelles choisies en raison de leur comportement voisin. Ainsi la comparaison du comportement aux pluies d'une parcelle nue de 7 % de pente (E = 138 t/ha/an ; R = 32 %), d'une parcelle protégée par un mulch de 10 t/ha de paille (E = 0,04 t/ha ; R = 0,5 %) et d'une parcelle voisine sous forêt secondaire (E = 0,2 t/ha/an ; R = 0,6 %) est très significative et parfaitement valable sans qu'il soit nécessaire de faire inter-

venir d'analyse statistique. Il est par ailleurs bien entendu que, lorsque les cases d'érosion sous pluies naturelles (gardées comme repère d'échelle) seront secondées par un simulateur de pluie, l'analyse des facteurs de l'érosion pourra être plus fouillée et plus rapide. Il n'en reste pas moins vrai que dans toute expérimentation en case d'érosion, une attention particulière doit être portée à l'hétérogénéité du comportement des parcelles qui dépend par ordre décroissant d'importance du couvert végétal, des différences même minimes de l'inclinaison et de la forme de la pente, du dispositif lui-même (partiteur) et enfin de la nature du sol.

B – Effets de l'énergie cinétique des gouttes de pluie

encroûtement et microdemoiselles coiffées



(cf. ORSTOM - Photos ROOSE)

1. LA PLUIE : CAUSE PRIMAIRE DE L'ÉROSION

Tout transport de terre nécessite une énergie : ce peut être le vent, le ruissellement ou la pluie. En ce qui concerne l'érosion hydrique, c'est l'énergie des gouttes de pluie qui déclenche les processus de destruction des agrégats du sol sur les versants de pente faible à moyenne tandis que le ruissellement assure le transport des particules détachées (ELLISON : 1944 et 1945). Cependant, lorsque la pente augmente, le ruissellement devient lui-même abrasif et son énergie surpasse celle de la pluie quand la pente atteint 16 % (WOODRUFF, 1948). Sur forte pente, et là où dominent le ravinement, les sapements de berges et la divagation des rivières, l'énergie du ruissellement l'emporte (HEUSCH, 1970). Dans le cas de la Grande Plaine Américaine et des vieilles surfaces du continent africain où les pentes sont relativement faibles, c'est l'énergie des gouttes de pluie qui est l'agent causal principal de l'érosion.

1.1. La hauteur des pluies et l'humidité préalable du sol

On pourrait croire que l'érosion, ou tout au moins le ruissellement, est en relation étroite avec la hauteur des pluies. En réalité, les phénomènes sont plus compliqués. En effet, il n'y a pas d'érosion sans transport, donc sans ruissellement, lequel constitue le refus à l'infiltration. Or, on sait que la vitesse d'infiltration sur un sol primitivement sec diminue au cours du temps avec l'éloignement du front d'humectation et la formation d'une pellicule de battance (GARDNER, 1975). On comprend donc la complexité des liaisons qui existent entre les diverses caractéristiques des pluies (hauteur, durée, intensités maximales) et le ruissellement ou l'érosion mesurés en petites parcelles.

Ainsi, on a rassemblé dans le Tableau 7 des observations concernant l'érosion et le ruissellement observés sur deux parcelles voisines de 7 % de pente, l'une dénudée et l'autre bien couverte par une culture fourragère, durant les pluies de hauteurs voisines (Adiopodoumé, 1972). On constate que les coefficients de ruissellement varient de 9 à 73 % sur sol nu et de 0 à 32 % sur parcelle couverte. De même, les transports solides oscillent de 300 à 6 000 kg/ha sur sol nu et de 0 à 31 kg/ha sous végétation de *Panicum maximum*.

En analysant le Tableau 7 de plus près, on constate que les plus faibles ruissellements et érosions proviennent des pluies tombant après une période sèche (valeur faible de la hauteur de pluie tombée en dix jours consécutifs = h 10 jours) et avec des intensités maximales en 30 minutes ($I_{\max} 30'$) faibles (ex. les 27/3 et 31/7/72). Par contre, les pertes en terre et les ruissellements les plus élevés ont eu lieu entre le 9 juin et le 2 juillet, à une époque où le sol est déjà très humide et soumis à un rythme de précipitations peu ordinaire : 726 mm en 40 jours (plus qu'à Paris en un an !). Inversement, on pourrait comparer les effets érosifs de pluies de hauteurs croissantes sur une parcelle nue et montrer que l'érosion et le ruissellement n'augmentent pas forcément (ROOSE, 1973). On le voit, la hauteur des pluies n'explique pas entièrement les phénomènes d'érosion : l'humidité du sol avant la pluie, et l'intensité maximale durant un certain temps et au-dessus d'un certain seuil, jouent un rôle important.

Tableau 7
 Influence de l'époque, de l'intensité maximum en 30 minutes,
 et des pluies de la décade précédente (h 10 jours = indice d'humidité du sol)
 sur l'érosion et le ruissellement provoqués par des pluies de hauteur voisine
 sur un sol nu et un sol couvert

Dates	Pluie			Ruissellement (%)		Érosion (kg/ha)	
	h (mm)	h 10 jours	Intensité MAX 30'	Sol nu	<i>Panicum</i>	Sol nu	<i>Panicum</i>
13/2/72	28	58 mm	33	47	0	548	0
18/3	33	1	59	52	0,1	1104	0
27/3	32	45	23	26	0	327	0
21/5	34	20	28	26	0	1518	0
9/6	33	131	35	48	32	3833	21
11/6	34	164	26	44	11	2191	26
13/6	38	230	37	63	22	3264	31
2/7	32	212	43	73	0,1	6025	0,2
31/7	30	0	15	9	0	412	0
19/10	31	88	14	39	0,1	1501	0,1
23/11	28	18	43	71	0	1827	0

Il est cependant intéressant d'étudier l'ampleur des phénomènes d'érosion en fonction des classes de hauteur de pluie. On a constaté à Adiopodoumé que durant la campagne 1965 (mais billonné selon la pente) il n'y eut pas de ruissellement pour les pluies de hauteur inférieure à 15 mm, ni d'érosion sérieuse pour moins de 30 mm. Il a fallu au moins 30 mm pour observer un ruissellement à chaque pluie et plus de 90 mm pour constater à coup sûr des transports solides. Chaque parcelle caractérisée par la nature du sol mais aussi par la couverture végétale et les façons culturales ont ainsi des seuils de déclenchement au-dessous desquels ne se manifeste aucun phénomène d'érosion (ROOSE, 1973) : en fait ces seuils de hauteur de pluie recouvrent des seuils d'intensité.

On a rassemblé au Tableau 8 les valeurs correspondant à quelques pluies exceptionnelles durant lesquelles l'érosion et le ruissellement n'ont pas dépassé 25 à 45 % de ceux qu'on a observés sur toute l'année. On constate donc, en accord avec WISCHMEIER et SMITH (1958), que ce n'est pas l'averse exceptionnelle, mais bien la somme des 10 ou 20 plus fortes pluies de l'année, qui détermine le niveau de l'érosion en milieu tropical humide ou sec (ROOSE : 1973 et 75). Ceci

est à mettre en opposition avec ce qui a été observé en zone méditerranéenne (HEUSCH, 1970 ; ROOSE, 1971 et 75) et saharienne où la pluie exceptionnelle décennale ou centennale transforme radicalement le paysage. Ceci pourrait s'expliquer par la probabilité de cette averse exceptionnelle de tomber sur un sol peu couvert (cas de la zone saharienne) et sur des pentes en équilibre peu stable (cas fréquent dans le bassin méditerranéen et dans les paysages de montagnes jeunes).

Tableau 8
Danger des averses exceptionnelles : Adiopodoumé, pente 7%

Date et traitement	Pluie		Ruissellement		Érosion	
	Hauteur mm	R _{USA}	K _R % journalier	% du total annuel	t/ha jour	% total annuel
6-6-65 manioc/buttes	150	—	35	8	0,8	2
9-7-65 " "	195	—	30	9	1,8	5
18-7-65 " "	180	—	62	18	7,8	22
19-7-66 " "	197	220	69	46	11,4	41
10-6-67 arachide/plat	110	147	61	17	50,1	42
14-6-67 nu	122	91	26	8	14,9	8
26-6-67 nu	137	69	28	9	19,8	11
28-5-70 nu	140	388	81	18	47,1	28
21-6-71 nu	122	70	22	5	13,7	10
28-6-71 nu	230	185	32	14	34,4	25
23-7-71 nu	142	94	52	14	19,9	15
26-6-72 nu	134	113	65	14	19,8	17

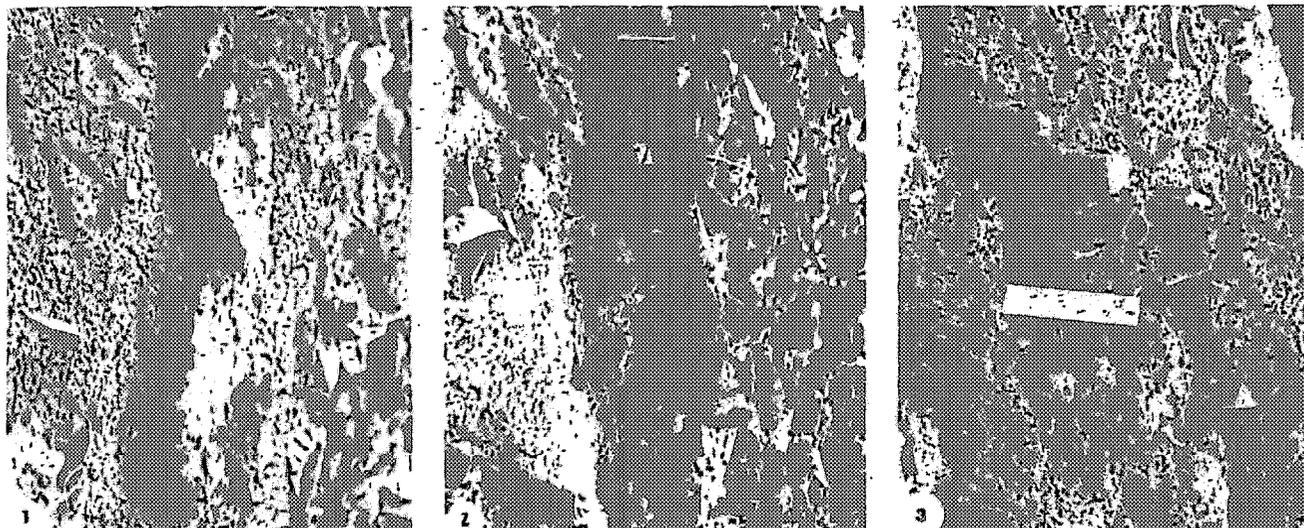
R_{USA} : indice d'agressivité climatique de l'ép. de WISCHMEIER exprimé en unités américaines

K_R : coefficient de ruissellement = Ruiss. x 100/pluie.

Pour tenir compte de l'influence de l'humidité du sol avant la pluie (Tableau 7), on pourrait appliquer l'un des multiples coefficients utilisés par les hydrologues qui prennent en compte le total cumulé des averses antérieures corrigé ou non selon le temps qui s'écoule entre ces averses (indice de Köhler). En fait, il semble qu'au bout d'une dizaine de jours une averse n'a plus d'influence sur les phénomènes d'érosion provoqués par la suivante. Ce facteur « humidité préalable du sol » se confond donc avec celui de la « hauteur des pluies cumulées pendant plusieurs semaines ». C'est ainsi qu'on a montré (ROOSE, 1973) que l'érosion et le ruissellement sur **parcelle nue** sont des fonctions rectilinéaires de la **hauteur mensuelle des pluies** à Adiopodoumé (1972). Sous culture fourragère par contre, on trouve encore une relation rectilinéaire pour le ruissellement, mais pas pour les transports solides. Ceci tend à démontrer

B – Effets de l'énergie cinétique des gouttes de pluie

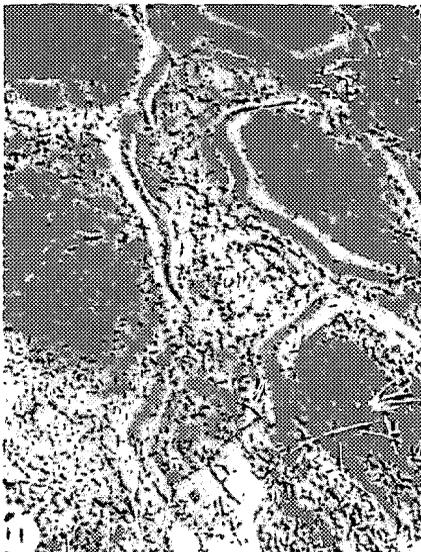
encroûtement et microdemoiselles coiffées



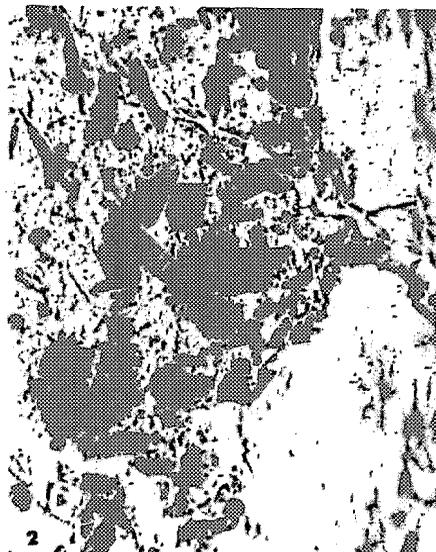
(cf. ORSTOM - Photos ROOSE)

C -- Effets de la battance des pluies sur le sol (Splash.)

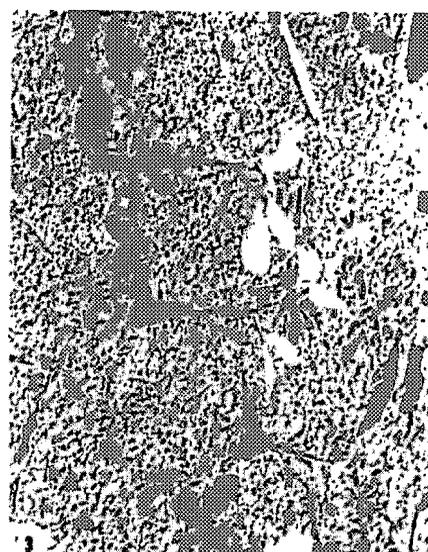
Séparation des particules fines et grossières



Découpage des figures : microdemoiselles coiffées



Rejaillissement



(cf. ORSTOM - Photos ROOSE)

que sous un couvert dense, peut naître un ruissellement consécutif à la saturation de la porosité du sol lors des pluies de forte hauteur mais qu'il ne s'y manifeste pas d'érosion puisque l'énergie des gouttes de pluie est absorbée par le couvert (détachement inhibé), et que celle du ruissellement est encore faible sur cette pente de 7 %.

1.2. Influence de l'intensité des pluies et de leur durée

L'intensité est le paramètre principal qui lie la pluie à l'érosion. Elle intervient à deux niveaux : la saturation momentanée de la porosité du sol, et l'énergie cinétique que la pluie dissipe en détruisant la structure de la surface du sol (battance). En effet, le ruissellement ne peut se manifester que lorsque le débit de la pluie dépasse les possibilités d'absorption par les pores du sol. Mais au cours d'une pluie, l'énergie développée dégrade la surface du sol et le seuil s'abaisse à mesure que la pluie se prolonge.

Par ailleurs, de nombreux auteurs (cités par SMITH et WISCHMEIER, 1962) ont constaté que le diamètre médian des populations de gouttes de pluie, et donc leur masse, leur vitesse et leur énergie cinétique augmentent avec l'intensité des précipitations. Les fortes intensités entraînent donc la conjonction des phénomènes d'engorgement et de battance qui aboutissent à la formation de croûtes (quelques cm) ou de pellicules (quelques mm) très peu perméables. D'où l'importance de l'intensité maximale des pluies sur l'érosion des sols nus ou peu couverts. Sur parcelle couverte, par contre, l'énergie est dissipée avant d'atteindre le sol, mais les fortes intensités peuvent néanmoins provoquer un ruissellement par engorgement temporaire de la porosité du sol. C'est la raison pour laquelle un couvert végétal (vivant ou mort) diminue les pertes en terre dans une plus forte proportion que le ruissellement.

Tant que les pluies de forte intensité durent peu de temps et tombent sur un sol sec, l'érosion et le ruissellement restent faibles : c'est le cas général en Côte d'Ivoire avant que ne s'installe la grande saison des pluies. Mais lorsque se conjugent une fréquence élevée des précipitations, un sol très humide, des pluies importantes (100 à 250 mm/24 h) et de fortes intensités pendant de longues périodes, on observe des phénomènes d'érosion catastrophiques qui peuvent quelquefois dépasser le total des pertes durant le reste de l'année. D'où l'intérêt des courbes intensités x durée pour les averses exceptionnelles déjà signalé au chapitre 1.

En étudiant les régressions liant le ruissellement et l'érosion à l'intensité maximale de 33 pluies (Adiopodoumé 1971 et 1972) observées pendant des temps croissant de 5 à 180 minutes, on constate que le coefficient de corrélation r (exprimant la précision de la liaison entre les deux variables) augmente avec la durée de l'intensité. Les corrélations ne sont hautement significatives (seuil 0,01) que pour des intensités maximales en 20 minutes pour l'érosion, et 10 minutes pour le ruissellement, en petites parcelles de 15 mètres de long. Il semble donc que, sur sol ferrallitique sableux et nu, le ruissellement et surtout l'érosion ne se

déclenchent que lorsqu'un seuil d'intensité pluviale est dépassé pendant une certaine durée. Ceci est conforme aux résultats de WISCHMEIER qui a retenu l'intensité maximum en 30 minutes comme l'une des caractéristiques de la pluie les mieux liées aux phénomènes d'érosion observés dans les parcelles américaines.

On pourrait s'étonner des relations étroites observées entre les phénomènes d'érosion sur des sols nus dans les conditions d'Adiopodoumé et la hauteur mensuelle des pluies, ou encore des intensités maximales en 1 à 3 heures, plutôt qu'avec l'intensité maximale instantanée (ou en 5 minutes). Ce fait d'observation souligne l'importance de l'humidité du sol quand tombe la pluie. En effet, les plus fortes intensités instantanées se produisent au cours d'orages qui éclatent entre les saisons des pluies, tandis que les intensités maximum durant 1 à 3 heures sont les plus élevées au plus fort de la saison humide (juin-juillet), à une époque où les pluies sont longues et où l'humidité du sol est la plus élevée. En réalité, ces variables (hauteur, intensité durant 1 à 3 heures et humidité du sol) ne sont pas indépendantes en zone subéquatoriale comme elles peuvent l'être en zone tropicale sèche, où les pluies sont généralement assez espacées pour que le sol se dessèche avant l'averse suivante.

1.3. L'indice d'agressivité climatique

La première démarche d'un ingénieur appelé à aménager un bassin versant sera d'estimer les dangers d'érosion et donc l'érosivité du climat. Or, on a vu que, sur les pentes moyennes des vieilles surfaces du continent africain, la principale cause de l'érosion est l'énergie cinétique des pluies, laquelle dépend de leur intensité et de leur hauteur.

En comparant les corrélations obtenues entre les pertes en terre sur parcelles expérimentales et divers indices climatiques, WISCHMEIER (1959) a sélectionné un indice d'agressivité climatique (R) défini comme la somme des produits de l'énergie cinétique des pluies unitaires par leur intensité maximale durant 30 minutes (exprimée en mm/heure) :

$$[R = E_c \times I_{30}] \quad (\text{équation 1})$$

Cet indice se calcule pluie par pluie en dépouillant les enregistrements pluviographiques grâce à une régression (WISCHMEIER et SMITH, 1958) existant entre l'intensité instantanée d'une pluie et son énergie cinétique. Cette régression s'exprime par la formule :

$$[E_c = 1214 + 890 \log I] \quad (\text{équation 2})$$

où E_c est l'énergie cinétique exprimée en tonne métrique/km² et par millimètre de pluie tandis que I est l'intensité exprimée en mm/heure. Le dépouillement est long et fastidieux. On découpe l'enregistrement pluviographique en segments d'intensité constante, on lit sur un tableau l'énergie par millimètre de pluie correspondant à chaque intensité, on cumule les produits des énergies de chaque segment par leur hauteur en mm, et on multiplie cette somme par l'intensité maximum en 30 minutes. Un coefficient (1735,6) permet de passer aisément des unités anglo-saxonnes

aux unités décimales. Les résultats montrent qu'il existe de fortes variations de l'indice R pour des pluies de même hauteur et que les variations augmentent rapidement avec la hauteur de pluie (voir Tableau 9).

Par contre, les moyennes des classes de hauteur pour de nombreuses pluies (plus de 30) varient peu d'une station à l'autre depuis la basse Côte d'Ivoire jusqu'au Niger.

Tableau 9

Variabilité de l'indice R en fonction de la hauteur de la pluie en Afrique de l'Ouest

	Abidjan		Divo		Bouaké		Korhogo		Saria/Gonsé		Allokoto	
	Var.	Moy.	Var.	Moy.	Var.	Moy.	Var.	Moy.	Var.	Moy.	Var.	Moy.
h = 15	0,5 à 8	5	1 à 7	4,5	0,5 à 7	3,7	1,5 à 7	5	2,3 à 6,5	4,7	1,5 à 8	5
h = 30	6 à 24	18	7 à 30	17,6	4 à 22	16	4 à 26	17	16 à 31	18	6 à 20	18
h = 50	12 à 66	44	20 à 90	48	15 à 80	40	19 à 80	50	30 à 65	48	30 à 65	50
h = 70	32 à 90	78	49 à 108	84	25 à 100	73	31 à 120	83	84 à 104	86	—	—

Var. : domaine de variation des valeurs de R.

Moy. : moyenne des valeurs de R pour la hauteur de pluie considérée.

Plusieurs auteurs (CHARREAU, 1969 ; GALABERT, MILLOGO, 1972 ; CTFT, 1974) ont établi d'excellentes régressions linéaires entre l'énergie cinétique des pluies et leur hauteur. Par contre, s'il existe une régression entre l'intensité maximale en 30 minutes et la hauteur des précipitations (CHARREAU, 1969), celle-ci est curvilinéaire et beaucoup plus lâche. Il est donc normal de constater (ROOSE, BERTRAND, 1972) que cette dernière relation se traduit par une gerbe curvilinéaire de points qui va en s'évasant à mesure que la hauteur de pluie augmente. En effet, l'indice R est une fonction de l'énergie cinétique ($E_c = f(h)$) et de I_{30} max. (I_{30} max. = $f(h)$) ; par conséquent, les erreurs éventuelles se multiplient.

En cherchant à simplifier le dépouillement, GALLABERT, MILLOGO (1972), PIOT (CTFT, 1974) et DELWAULLE (1973) ont trouvé une régression (3) permettant d'estimer R en fonction de la hauteur de pluie (H) et de son intensité maximum en 30 minutes (I_{30}). Elle s'applique aussi bien en Haute-Volta qu'au Niger (et probablement à toute l'Afrique de l'Ouest) :

$$[R = 0,01572 H \times I_{30} - 1,179] \quad (\text{équation 3})$$

Mais si on étudie la répartition spatiale de cet indice R en Afrique, une difficulté surgit qui tient au petit nombre de postes météorologiques équipés d'un pluviographe à mouvement journalier, et à la courte période durant laquelle ces postes ont fonctionné. Par contre, on dispose en Afrique de l'Ouest d'un réseau relativement serré de postes d'observations de la hauteur des pluies journalières depuis 20 à 50 ans, ce qui permet de calculer des moyennes représentatives.

On a donc été amené à étudier en détail les liaisons existant entre la hauteur de pluie journalière (mesurée à 8 h du matin) et l'indice d'agressivité climatique, et on a constaté que :

1. Dans la zone côtière de la basse Côte d'Ivoire, il existe une régression rectilinéaire ($R = 0,577 h - 5,766$) entre cet indice (R) et la hauteur de pluie (h) pour les averses du type «mousson» des mois de juin à septembre, et une régression curvilinéaire pour les pluies orageuses du reste de l'année.

2. Cette régression curvilinéaire $\log R = f(\log h)$ est extrêmement voisine pour tous les postes étudiés bien qu'ils soient très éloignés (Abidjan, Azaguié, Divo, Bouaké, Korhogo en Côte d'Ivoire, Niangoloko, Koudougou et Ouagadougou en Haute-Volta).

3. En transformant jour par jour les hauteurs des précipitations journalières des postes étudiés selon cette régression, on a constaté que l'écart moyen sur cinq ans par rapport à l'indice moyen annuel mesuré ne dépassait pas 5 %. On peut donc transformer les longues séries d'observations de pluies journalières (20 à 50 ans) pour trouver des moyennes mensuelles et annuelles satisfaisantes des indices d'agressivité climatique et tenter ainsi de cartographier leur répartition (ROOSE, 1973 ; ROOSE, ARRIVETS, POULAIN, 1974).

4. Ce faisant, on a constaté qu'il existait une relation simple entre l'indice annuel moyen (R_{am}) sur une période suffisamment longue (5 à 10 ans) et la hauteur de pluie annuelle moyenne (H_{am}) durant la même période (voir Tableau 10).

$$[R_{am}/H_{am} = 0,50 \pm 0,05] \quad (\text{équation 4})$$

Ce rapport s'est avéré particulièrement constant en une vingtaine de points situés en Côte d'Ivoire, Haute-Volta, Sénégal, Niger, Tchad, Cameroun et Madagascar à l'exception des postes météorologiques situés sur ou alentour des montagnes (Dschang et Befandriana), à Bouaké (climat tropical de transition entre 1 et 2 saisons des pluies) ainsi qu'en bordure immédiate de la mer.

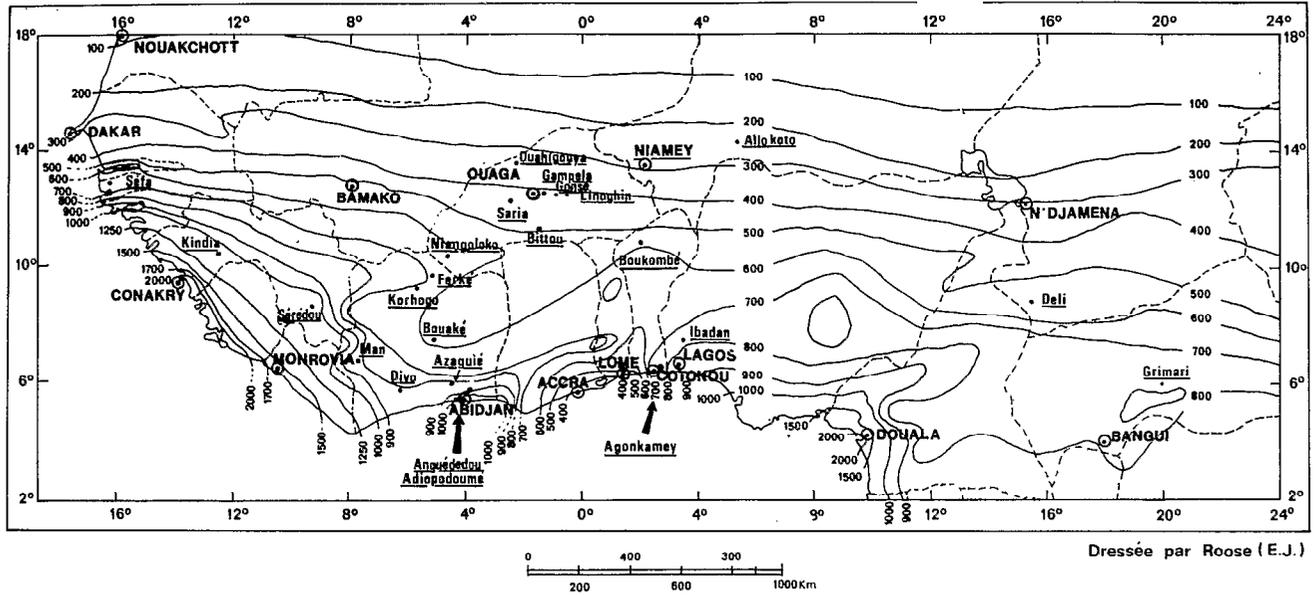
Mises à part ces exceptions, le rapport R_{am}/H_{am} varie autour 0,5 d'une façon qui paraît aléatoire d'une année à l'autre et d'un poste à l'autre ; si bien qu'en l'absence de données nouvelles sur des séries suffisamment longues d'observation (plus de 22 ans d'après WISCHMEIER pour la Plaine américaine), il semble raisonnable de préférer le rapport théorique ($R_{am}/H_{am} = 0,50$) au rapport mesuré sur 4 à 10 ans.

Cette relation a permis de dresser une première esquisse de la répartition de cet indice en Côte d'Ivoire (ROOSE, 1973) et en Haute-Volta (ROOSE, ARRIVETS, POULAIN, 1974).

L'esquisse (ROOSE, 1975) présentée ici (Fig. 1) sur l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest doit être considérée comme un document de travail en attendant l'accumulation et le dépouillement de longues séries annuelles de pluies en un nombre suffisant de postes. En dehors des zones côtières et des zones montagneuses, la précision

Fig. 1 – Esquisse de la répartition de l'indice d'agressivité climatique annuel moyen (R_{USA} de Wischmeier) en Afrique de l'Ouest et du Centre

Situation des parcelles d'érosion (lieux soulignés)



D'après les données pluviométriques rassemblées par le Service Hydrologique de l'ORSTOM et arrêtées en 1975

Tableau 10

Indices d'agressivité climatique de WISCHMEIER et de FOURNIER dans quelques stations d'Afrique

	Dépouillement sur courtes périodes			
	Période	Pluie Ha (mm)	Index Ra	Ra/Ha
Côte d'Ivoire				
. Abidjan (ORSTOM)	1966-73	1722	910	0,53
. Azaguié (IFAC-ORSTOM)	1968-73	1640	800	0,49
. Divo (IFCC-ORSTOM)	1968-74	1400	741	0,53
. Bouaké (IRAT-ORSTOM)	1960-71	1232	512	0,42
. Korhogo (ORSTOM)	1967-74	1296	673	0,52
Haute-Volta				
. Niangoloko (IRHO)	1968-72	1265	656	0,52
. Gaoua (ASECNA)	1966-72	1124	538	0,48
. Bobo-Dioulasso (ASECNA)	1966-72	1142	554	0,48
. Farako-Ba (IRAT)	1967-72	1083	485	0,45
. Ouagadougou (ASECNA)	1967-72	861	466	0,54
. Gonsé (CTFT-ORSTOM)	1968-73	709	345	0,49
. Saria (IRAT-ORSTOM)	1971-74	694	392	0,56
. Saria (IRAT METEO)	1968-72	826	357	0,45
. Mogtedo (IRAT)	1968-72	754	378	0,50
. Fada N'Gourma (ASECNA)	1966-72	857	428	0,50
. Ouahigouya (ASECNA)	1967-72	600	301	0,50
. Dori (ASECNA)	1966-72	511	261	0,51
Sénégal				
. Séfa (IRAT)	1964-68	1234	681	0,55
. Bambey (IRAT)	1960-68	590	295	0,50
Niger				
. Allokoto (CTFT)	1966-71	437	199	0,46
Tchad				
. Deli (ORSTOM)	1965-72	976	514	0,53
Cameroun				
. Dschang (IRAT)	1968-71	1970	625	0,32
Madagascar				
. Béfandriana (CTFT)	1969-70	2030	1375	0,68

SOURCES	Moyennes sur longues périodes				Indice FOURNIER P2/P
	Nombre années	Hauteur pluie annuelle	Ra/Ha retenu	Rusa annuel moyen	
ROOSE, inédit, 1975	27	2100	0,60	1260	233
ROOSE, inédit, 1975	41	1770	0,50	885	81
ROOSE, JADIN, 1968, 1975	29	1680	0,50	840	50
ROOSE, BERTRAND, 1972	60	1160	0,45	520	38
ROOSE, inédit, 1975	47	1440	0,50	720	68
GALABERT, MILLOGO, 1973	23	1340	0,50	670	86
GALABERT, MILLOGO, 1973	53	1240	0,50	620	63
GALABERT, MILLOGO, 1973	58	1150	0,50	575	84
GALABERT, MILLOGO, 1973	-	-	-	-	-
GALABERT, MILLOGO, 1973	21	880	0,50	440	68
ROOSE, inédit, 1975	-	-	-	-	-
ROOSE, inédit, 1975	30	840	0,50	420	75
GALABERT, MILLOGO, 1973	30	840	0,50	420	75
GALABERT, MILLOGO, 1973	-	-	-	-	-
GALABERT, MILLOGO, 1973	48	890	0,50	445	75
GALABERT, MILLOGO, 1973	49	700	0,50	350	76
GALABERT, MILLOGO, 1973	47	540	0,50	270	62
CHARREAU, NICOU, 1971	54	1310	0,50	655	148
CHARREAU, NICOU, 1971	47	650	0,50	325	92
DELWAULLE, 1973	25	500	0,50	250	78
AUDRY, inédit, 1974	22	1100	0,50	550	82
SEGUY, 1971	-	-	-	-	-
CTFT, 1971	-	-	-	-	-

de cet indice climatique estimé est de $\pm 5\%$, ce qui est largement suffisant pour l'utilisation de l'équation de prévision de l'érosion de WISCHMEIER et SMITH.

Il en découle que l'agressivité climatique est très élevée en région tropicale humide et décroît presque parallèlement aux isohyètes entre Abidjan ($H_{am} = 2100 \text{ mm}$; $R_{am} = 1260$) et Ouagadougou ($H_{am} = 830 \text{ mm}$; $R_{am} = 430$). Ceci s'explique par le parallélisme existant entre les courbes «intensité x durée», la hauteur des pluies décennales et les précipitations annuelles moyennes dans cette région (BRUNET-MORET, 1963 et 1967) : en d'autres termes, les pluies sont de même type dans toute cette zone, à l'exception des régions oâtières et montagneuses. Il n'est donc plus indispensable de faire intervenir un indice tenant compte de l'intensité des pluies en plus de leur hauteur comme cela avait été proposé par WISCHMEIER aux U.S.A., MASSON en Tunisie (1971) et KALMAN au Maroc (1967).

A titre de comparaison, on peut signaler que l'indice d'agressivité climatique annuel moyen (R_{USA}) varie de :

- 50 à 650 aux U.S.A. (WISCHMEIER, 1962),
- 60 à 300 en Tunisie (MASSON, 1971),
- 50 à 300 au Maroc (KALMAN, 1967),
- 60 à 340 dans le midi de la France (MASSON, KALMS, 1971),
- 500 à 1400 en Côte d'Ivoire (ROOSE, 1973),
- 200 à 650 en Haute-Volta (ROOSE, ARRIVETS, POULAIN, 1974).

Il existe d'autres indices d'érosivité du climat :

FOURNIER (1960-1962) a montré que sur de grands bassins versants, on observe une bonne corrélation entre les transports solides et un indice $\frac{p^2}{P}$ où p est la précipitation moyenne du mois le plus humide et P la pluie annuelle moyenne. Cet indice ne s'applique guère à l'échelle du champ (voir Tableau 10).

HUDSON (1961-1963-1973) a trouvé en Rhodésie du sud d'excellentes corrélations entre l'érosion par splash et l'énergie cinétique des fractions de pluie dont l'intensité dépasse 25 mm/heure ($KE > 25 \text{ mm}$) ; cet auteur considère en effet qu'en dessous de ce seuil il n'y a pas d'érosion et néglige un peu de la sorte l'influence de l'humidité préalable du sol. Cet indice n'a encore donné lieu à aucune étude de répartition géographique.

On peut remarquer au passage qu'aucun de ces indices d'érosivité climatique ne convient vraiment dans le cas des sols gonflants, des fortes pentes, de l'érosion en ravine, ni pour l'étude du ruissellement.

Enfin, on peut se poser la question de savoir s'il convient de s'attarder sur la répartition dans le temps et dans l'espace d'indices moyens ou, au contraire, sur la probabilité d'indices exceptionnels de récurrence de l'ordre de 10 ou 100 ans. En effet, c'est bien sur les événements exceptionnels que sont basés les calculs des ouvrages hydrauliques et ce sont ces événements qui devraient guider le conservateur des eaux et des sols dans sa tâche d'aménagement du territoire. Malheureusement on ne dispose pas encore de telles prévisions.

En conclusion, l'énergie cinétique et l'intensité maximale en 30 minutes sont les paramètres climatiques qui permettent d'interpréter au mieux l'érosion en nappe. Or, en Afrique de l'Ouest, plusieurs chercheurs ont montré qu'il existe une très bonne corrélation entre la hauteur de pluie et l'énergie cinétique et, par ailleurs, une étroite dépendance entre la hauteur annuelle moyenne des précipitations et, d'une part, l'averse exceptionnelle et, d'autre part, leurs courbes intensité x durée. D'où la première esquisse de répartition de l'indice d'agressivité climatique (RUSA), voisine de celle des isohyètes à un coefficient près ($R_{am}/H_{am} = 0,5 \pm 0,05$), et valable à 5 % près sauf en zone montagneuse et littorale. Cette esquisse montre que l'indice croît de 100 en zone sahélienne à plus de 2000 en zone forestière subéquatoriale : les climats tropicaux humides sont donc extrêmement agressifs. Pour le développement régional cette esquisse suffit largement mais pour des études fines de l'érosion en station, il est nécessaire de mesurer la hauteur de chaque pluie, son intensité, l'énergie cinétique, et si possible l'action du vent sur cette énergie.

2. L'ÉRODIBILITÉ DU SOL

L'érosion est fonction de l'agressivité climatique et de la résistance du milieu. Celle-ci dépend du sol, de la pente, du couvert végétal, des pratiques culturales et antiérosives. Bien qu'en réalité ces variables ne soient pas indépendantes, il est nécessaire pour la commodité de l'analyse de les traiter séparément. C'est pourquoi l'érodibilité est considérée ici comme une caractéristique intrinsèque du sol liée à ses propriétés chimiques et physiques.

Il est bien connu que certains types de sols sont plus sensibles que d'autres à l'érosion et que cette sensibilité peut évoluer au cours du temps en fonction des traitements qu'on leur fait subir. FOURNIER (1967) rapporte que, sur les sols ferrugineux tropicaux de la station de Séfa au Sénégal, l'indice de stabilité structurale de HÉNIN est correct sous forêt naturelle ($I_s \approx 0,4$ à $0,5$) mais augmente rapidement sous culture d'arachide ($I_s = 0,8$ la 1^{ère} année, $1,2$ la seconde et $1,4$ à $1,8$ après six années de culture). Parallèlement l'indice de perméabilité de HÉNIN passe de $K = 3$ à 5 cm/heure sous forêt, à $2,5$ après deux ans et à $1,8$ à $2,6$ après six années de culture. A titre de comparaison, ce même indice de perméabilité est de l'ordre de 50 cm/heure sous forêt dense sur le sol ferrallitique sableux d'Adiopodoumé et passe à 10 ou 5 cm/heure sous culture.

D'autres auteurs ont étudié la résistance au splash de différents sols sur échantillons remaniés (ELLISON, 1944 ; FREE, 1952 ; HUDSON, 1961 ; NGO CHANG BANG, 1967 ; LAL, 1975). Mais aucun test de laboratoire n'est capable de donner une bonne estimation de l'érodibilité des sols, laquelle dépend non seulement de la résistance au splash (cohésion), mais aussi de la résistance au cisaillement par l'érosion en rigole, laquelle nécessite une certaine longueur de parcelle pour se révéler (communications personnelles de HUDSON et MOLDENHAUER : Ibadan, juillet 1975).

WISCHMEIER a donc proposé d'étudier l'érodibilité du sol au champ dans des conditions standard qui servent de référence en tous points du globe. Il s'agit d'une parcelle de 22,1 m de long, 9 % de pente, traitée comme une jachère nue, sans apport de matières organiques depuis trois ans, et travaillée superficiellement pour éviter la formation d'une pellicule de battance qui limiterait la détachabilité. Ce protocole a dû être adapté (ROOSE, 1968) aux conditions africaines en choisissant des pentes caractéristiques des types de sols et du paysage, et en corrigeant les résultats à l'aide du facteur topographique (voir plus loin : SL) (non indépendance sol-pente). L'indice d'érodibilité du sol (K) est donc l'érosion mesurée au bas d'une parcelle nue de référence par unité d'indice climatique : il se calcule à partir de la formule :

$$K = \frac{E}{R \times SL \times 2,24} \quad (\text{équation 5})$$

où E est l'érosion en tonne/ha/an, R est l'indice d'agressivité climatique, SL le facteur topographique et 2,24 un coefficient nécessaire pour passer des unités décimales (T/ha) aux unités anglo-saxonnes (t/acre).

Aux USA, l'indice d'érodibilité K augmente de 0,03 à 0,60 pour des sols de plus en plus sensibles (WISCHMEIER, JOHNSON et CROSS ; 1971). En Afrique de l'Ouest, les rares résultats expérimentaux existants sont résumés au Tableau 11.

Tableau 11

Type de sols	K mesuré			Nombre de mesures	Source	
	Max.	Min.	Retenu			
Adiopodoumé	Ferrallitique très désaturé sur sables tertiaires	0,17	0,05	0,10	24	ROOSE, 1973
Agonkamey	Ferrallitique très désaturé sur sables tertiaires	0,11	0,03	0,10	4	VERNEY et coll., ROOSE, 1973
Bouaké	Ferrallitique remanié rajeuni sur granite	0,16	0,02	0,12	4	BERTRAND, 1967 KALMS, 1975
Korhogo	Ferrallitique remanié appauvri sur granite	0,02	0,01	0,02	6	ROOSE, 1975
Gampela	Ferrugineux tropical sur carapace à 20 cm	0,32	0,05	0,25	5	CTFT, 1973
Saria	Ferrugineux tropical sur carapace à 50 cm	0,20	0,06	0,20	3	ROOSE et coll., 1974
Sefa	Ferrugineux tropical lessivé à taches	0,17	0,05	0,25	2	CHARREAU, 1969

Le nomographe de WISCHMEIER, HOHNSON et CROSS (1971) (voir Fig. 2) a permis d'évaluer la susceptibilité des sols américains à l'érosion (K) à $\pm 0,02$ près,

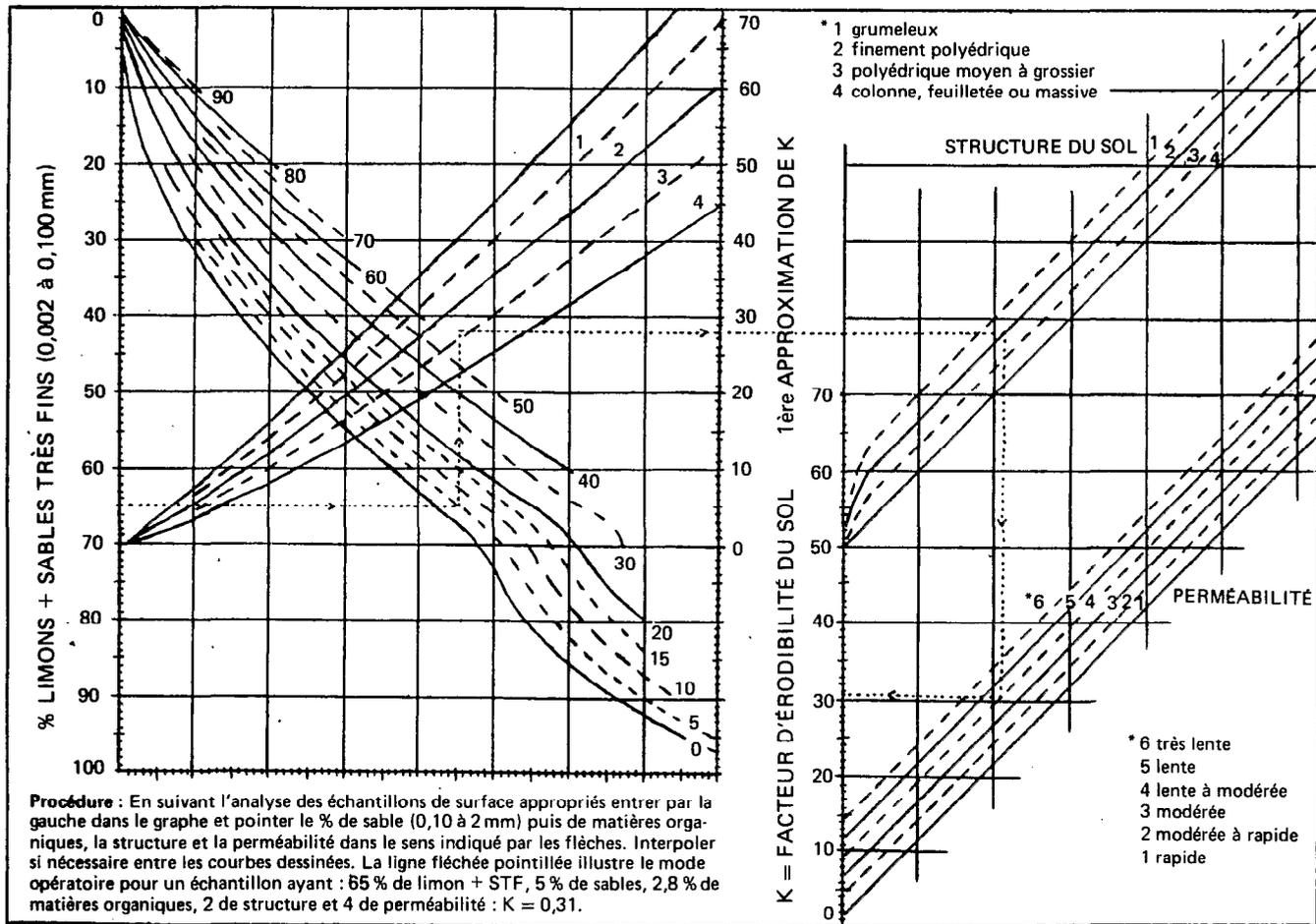


Fig. 2 – Normographe permettant une évaluation rapide du Facteur K d'érodibilité des sols

D'après WISCHMEIER, JOHNSON et CROSS (1971)

à partir des teneurs en limons et sables très fins (2 à 100 microns), en sables (100 à 2 000 microns) et en matières organiques, de la structure et de la perméabilité. Son application en Afrique de l'Ouest conduit aux résultats suivants (ROOSE, 1972), suite à l'analyse de l'horizon labouré :

	. issus de sables tertiaires	0,05 – 0,10
– sols ferrallitiques divers issus de granites	0,10 – 0,15
	. issus de schistes	0,15 – 0,18
– sols ferrugineux tropicaux divers	. issus de granites	0,20 – 0,30

De ces résultats, on peut tirer plusieurs conclusions :

1. La variabilité des valeurs obtenues au cours des mois et des années entraîne la nécessité de procéder à des répétitions dans l'espace et surtout dans le temps à cause de l'effet résiduel des matières organiques et de l'organisation des séquences pluvieuses en fonction du travail du sol. On a constaté à Agonkamey et Adiopodoumé qu'il fallait deux à cinq ans après défrichement pour que le coefficient d'érodibilité se stabilise (ROOSE, 1973). En pratique, la mesure de K devrait se faire sur des champs cultivés depuis au moins trois ou quatre ans, les résidus de culture ayant été exportés : le travail du sol est réduit au labour et à deux ou trois interventions superficielles par an pour briser la pellicule de glaçage. Un désherbage chimique s'impose pour maintenir propre le sol sans le tasser ni le travailler.
2. Les sols ferrallitiques sont très résistants à l'érosion, et les sols ferrugineux tropicaux le sont nettement moins après deux ou trois années de culture ; ceci peut s'expliquer par la faible perméabilité de ces derniers, leur tendance à la battance, leur teneur relativement forte en limons et sables très fins, et leur teneur faible en matières organiques. Il faut remarquer que les sols ferrallitiques et ferrugineux sont plus résistants que bon nombre de sols lessivés tempérés et l'hypothèse de la singulière fragilité des sols tropicaux ne résiste pas à l'expérimentation. EL SWAIFI (1975) travaillant à Hawaï à l'aide d'un simulateur de pluie sur aridisols, inceptisols, oxisols, ultisols et vertisols a montré que l'érodibilité des sols tropicaux est au moins aussi variable que celle des sols des zones tempérées. Mais en Afrique, ce sont les pluies particulièrement agressives qui expliquent les phénomènes catastrophiques d'érosion et non la prétendue fragilité des sols.
3. Les valeurs d'érodibilité estimées à l'aide de nomographe, ou mesurées, sont voisines pour l'ensemble des sols étudiés, sauf pour les sols gravillonnaires ; le monographe, en effet, ne tient pas compte du pourcentage de la surface du sol couverte par les graviers, gravillons et débris de roche qui jouent un rôle de mulch protecteur très important en région tropicale (DUMAS, 1965 ; SEGNER, MORIN, SHAKORI, s.d.) et méditerranéenne. A Korhogo, par exemple, non seulement le facteur K est très faible (0,02), mais il diminue à mesure que les gravillons se concentrent dans l'horizon superficiel.

Si l'équation de prévision de l'érosion semble s'appliquer correctement à ces sols à argile dominante kaolinique, les plus répandus et les plus cultivés en Afrique de l'Ouest, il faut être très prudent en ce qui concerne les sols à argiles gonflantes (sols bruns, vertisols, etc.). Les travaux de l'équipe de HEUSCH (1971) au Maroc montrent que les vertisols sur les marnes du Rif réagissent très différemment.

Il reste cependant un certain nombre de problèmes concernant la détermination de l'indice K d'érodibilité du sol du fait qu'il évolue au cours du temps à l'échelle saisonnière et interannuelle et qu'il doit refléter à la fois la résistance à l'érosion en splash et en rigole.

Or, les mesures en parcelles d'érosion sous pluies naturelles sont longues et coûteuses, d'autant plus qu'elles sont biaisées du fait que les types de sols en Afrique de l'Ouest sont généralement liés à un type de pente.

Quant à l'usage du simulateur de pluie qui tend à se généraliser pour cette détermination, personne ne sait encore si des mesures effectuées sous des séquences d'averses décennales ou centennales sont représentatives quelle que soit l'époque de l'année (le plus souvent en saison sèche) où elles ont lieu, ni à partir de quelle longueur de pente elles reflètent suffisamment l'effet de cisaillement de l'érosion, en rigole.

Une fois obtenues un certain nombre de valeurs de K, le choix de l'indice d'érodibilité représentatif d'un sol dépend du niveau de sécurité que l'on veut se donner pour les aménagements antiérosifs. On le voit, il reste encore beaucoup à faire dans ce domaine d'autant plus qu'il ne semble pas y avoir de lien entre l'érodibilité des sols et les principaux systèmes de classification morphogénétiques des sols tout au moins aux niveaux supérieurs (ARNOLDUS, 1975).

3. LA PENTE

«La pente doit conditionner puissamment l'importance de l'érosion en Afrique tropicale. L'existence d'érosion intense sur des pentes minimales (1 à 2% en Casamance) indique par contre qu'il n'est point besoin de son intervention pour déclencher le phénomène : l'action pluviale y suffit» (FOURNIER, 1967).

L'influence de la pente sur l'évolution des versants est bien connue des géomorphologues, au point que certains d'entre eux caractérisent l'âge du paysage par l'inclinaison des pentes. De fortes pentes et des vallées encaissées se rencontrent dans un relief jeune comme celui des Alpes, tandis que, dans un relief adulte ou sénile comme on en trouve sur le vieux continent africain, ce sont des plateaux, des collines à pentes plus ou moins douces et de vastes pénéplaines qui s'offrent au regard.

La pente intervient dans les phénomènes d'érosion du fait de son inclinaison, de sa longueur et de sa forme.

3.1. L'inclinaison de la pente

Tous les auteurs s'accordent pour reconnaître le rôle important de l'inclinaison de la pente sur les phénomènes d'érosion. DULEY et HAYS (1933), NEAL (1938), ZINGG (1940), BORST et WOODBURN (1949) ont montré que les pertes en terre croissent de façon exponentielle avec l'inclinaison de la pente (exposant voisin de 1,4).

$$[E = k.P^{1,4}] \quad (\text{équation 6})$$

HUDSON et JACKSON (1959) soulignent le fait qu'en Afrique centrale, à cause de l'agressivité climatique, l'effet pente est exagéré par rapport à celui qu'on mesure en Amérique : ils obtiennent des exposants de l'ordre en 1,63 de moyenne sur des rotations complètes (y compris prairie et jachère) et jusqu'à 2,02 sur sol argileux et 2,17 sur sol sableux cultivés en maïs de façon extensive. Un exposant voisin de 2 semblerait plus adapté aux conditions africaines (HUDSON, 1973).

A Séfa (ROOSE, 1967), on observe, en effet, que l'érosion et le ruissellement croissent de façon très rapide pour de faibles variations de pente (0,5 %) (Tableau 12).

Tableau 12

Séfa (Sénégal)		
Cultures sarclées de 1955 à 1962		
Sol ferrugineux tropical lessivé à taches et concrétions		
Pente	Erosion moyenne (t/ha/an)	Ruissellement moyen annuel
1,25 %	5	16 %
1,50 %	8,6	22 %
2 %	12	30 %

Par contre, LAL (1975) trouve au Nigéria que l'érosion croît avec la pente selon une courbe exponentielle d'exposant 1,2 sur un sol ferrallitique remanié riche en graviers (alfisol) lorsque le sol est nu mais que les pertes en terre sont indépendantes de la pente (1 à 15 %) si on laisse les résidus de culture en surface. Le ruissellement quant à lui dépendrait plus des propriétés hydrodynamiques du sol que de la pente elle-même.

SMITH et WISCHMEIER (1957) ont trouvé que sur parcelles soumises aux pluies naturelles durant 17 ans et de pentes de 3 à 18 %, une équation du second degré s'ajuste mieux que les fonctions logarithmiques en réalité très voisines proposées par les chercheurs américains. Elle est de la forme :

$$E = \frac{1}{100} (0,76 + 0,53 S + 0,076 S^2) \text{ où } E \text{ s'exprime en tonne/ha et } S \text{ en } \%$$

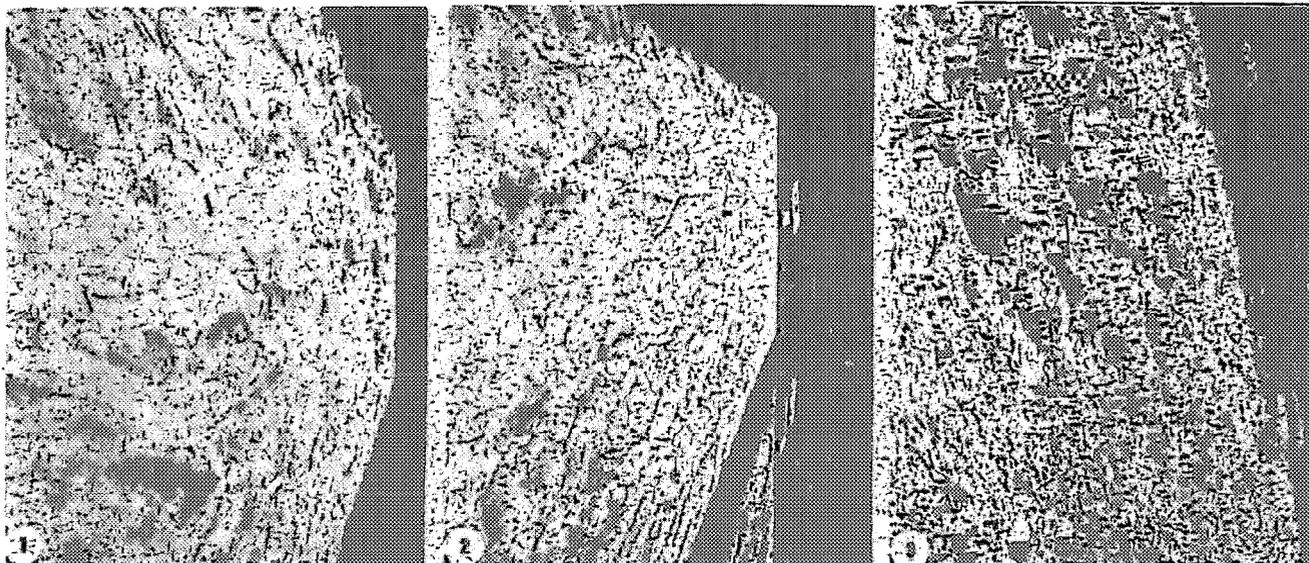
En ce qui concerne le ruissellement, WISCHMEIER (1966) montre qu'en général il augmente avec la pente sur petites parcelles mais de façon variable en fonction de la rugosité de la surface du sol, de sa capacité à retenir l'eau (= pouvoir éponge), du type de culture et du niveau de saturation du sol avant la pluie.

D – Effets de la pente sur les formes d'érosion

4,5 %
coulées sableuses

7 %
début des rigoles

23 %
rigoles et figures diverses
falaises et demoiselles coiffées



(cf. ORSTOM - Photos ROOSE)

En Côte d'Ivoire et en Haute-Volta, on a remarqué que la végétation naturelle, épargnée par les feux, protège remarquablement le relief (ROOSE, 1971 ; AVENARD, ROOSE, 1972). C'est ainsi qu'on peut observer en basse Côte d'Ivoire des pentes de plus de 65 % sur un matériel sablo-argileux protégé par la forêt dense secondaire. Si on défriche manuellement la forêt sans détruire le réseau racinaire qui donne une cohésion à l'horizon humifère, le sol peut résister un à deux ans à l'agressivité des pluies mais lorsqu'on défriche mécaniquement la forêt ou la savane en décapant l'horizon humifère et fertile de surface, l'érosion et le ruissellement prennent des proportions catastrophiques, d'autant plus que la pente est forte.

A Adiopodoumé, on dispose de trois parcelles sous forêt dense secondaire et de trois parcelles cultivées en 1966-67 et maintenues en jachère nue labourée et planée chaque année avant la saison des pluies de 1968 à 1972 : les pentes varient de 4,5 à 65 %. On a réuni au Tableau 13 les moyennes des pertes en terre (t/ha/an) et du ruissellement (en % des pluies annuelles) observées durant la période de 1956 à 1972 (ROOSE, 1973).

Tableau 13

	Pente %	Érosion t/ha/an			Ruissellement K_R %		
		forêt	sol nu	culture	forêt	sol nu	culture
Adiopodoumé 1956-1972	4,5	—	60	19	—	35	16
Sol ferrallitique sur matériaux argilo-sableux tertiaires	7	0,03	138	75	0,14	33	24
Pluie moyenne : 2100 mm	23	0,1	570	295	0,6	24	24
	65	1,0	—	—	0,7	—	—

• On constate que l'érosion augmente plus vite que la pente et que sa croissance est plus rapide sous culture que sur parcelle nue. Sous culture (manioc puis arachide), en effet, si on prend pour base l'érosion moyenne sur 4,5 % de pente ($E = 18,8$ t/ha/an), on voit que les pertes en terre quadruplent lorsque la pente passe à 7 % (soit 1,55 fois plus forte) et quadruplent encore lorsqu'elle s'élève à 23 % (pente 5,1 fois plus forte que la référence). Sur parcelle nue la croissance de l'érosion est moins rapide mais elle débute plus haut ($E = 60$ t/ha/an). En effet, il semble bien que sur forte pente il y ait interaction entre les effets de la pente et la diminution du couvert végétal due aux carences hydriques et minérales dont souffrent les plantes du fait de l'érosion elle-même.

A côté de cet aspect quantitatif, il faut noter que les formes d'érosion changent avec la pente et le profil du sol. Sur faible pente, l'énergie des gouttes de pluie disloque les agrégats et libère les particules fines : les suspensions stables de colloïdes peuvent migrer sur de grandes distances à travers le réseau hydrographique. Les sables, par contre, s'accumulent à la surface du sol, à laquelle ils donnent une allure tigrée du fait de l'alternance de plages sombres de sol à nu en relief et de traînées de sable jaune. La surface du sol est presque plane.

Dès qu'on atteint 7 % de pente, ces zones basses s'approfondissent en rigoles évasées et les transports de sables s'organisent : il apparaît des «microfalaises» et des «micro-demoiselles coiffées» de faible hauteur (2-4 cm) qui montrent bien l'ampleur du décapage du sol par l'érosion en nappe. Enfin, sur les pentes de plus de 20 %, le réseau d'évacuation du ruissellement et des particules de toute taille (jusqu'à 5-10 mm de diamètre) se creuse et se hiérarchise, si bien que la surface du sol devient extrêmement accidentée, du fait de rigoles profondes (5 à 20 cm) et des multiples figures burinées par la pluie et le ruissellement, et protégées par des objets divers tels que graines, racines, feuilles, brindilles, poteries ou même le sol durci et encroûté.

● **Le ruissellement**, quant à lui, ne se comporte pas du tout de la même façon que l'érosion vis-à-vis de la pente à Adiopodoumé. **Sous culture**, le coefficient de ruissellement atteint 16 % sur une pente de 4,5 %, et se stabilise autour de 24 % sur les parcelles de 7 et 23 %. **Sur jachère nue**, il diminue franchement (35-33-24 %) lorsque la pente augmente, et ce phénomène inattendu se confirme et s'accroît depuis la 3^{ème} année d'expérimentation. Cette diminution du ruissellement, lorsque la pente augmente, se constate non seulement pour les coefficients de ruissellement moyens, mais aussi sur les coefficients maxima, donc lorsque le sol est saturé ($K_R \text{ max.} = 98-95-76 \%$).

Ces phénomènes avaient déjà été signalés par HUDSON (1957) en Rhodésie, où on constate que l'érosion croît de façon exponentielle avec la pente mais que le ruissellement augmente d'abord rapidement (jusque vers 2 % de pente), puis se stabilise.

LAL (1975) observe aussi au Nigéria que le ruissellement se stabilise au-delà d'une certaine pente et dépend du type d'utilisation des résidus de la culture et du type de sol.

La diminution du coefficient de ruissellement sur sol nu pourrait s'expliquer au moins partiellement par les faits suivants :

- lorsque la pente augmente, la surface inclinée offerte à la pluie est d'autant plus grande que la pente est forte. En d'autres termes, si on a mesuré la surface de la parcelle sur le terrain, sans tenir compte de sa projection verticale, il s'ensuit une erreur qui atteint :
 - . 0,3 % pour une pente de 4,5 %
 - . 0,7 % pour une pente de 7 %
 - . 2,0 % pour une pente de 20 %
 - . 2,7 % pour une pente de 23,3 %
- lorsque la pente augmente, la forme de l'érosion change : elle burine dans le sol de multiples figures et augmente de ce fait sa surface, et donc le nombre de pores capables d'absorber l'eau au moins dans la phase initiale de la pluie.
- lorsque la pente est faible, l'énergie du ruissellement n'est pas suffisante pour transporter au loin les particules relativement grossières. Lors d'une pluie,

celles-ci vont être libérées par l'effet splash puis traînées lentement vers les parties basses. Au passage, elles sont souvent happées par les pores dont elles colmatent l'orifice. De plus, elles s'organisent horizontalement en microstrates ; c'est le phénomène de glaçage bien connu des agronomes.

Sur forte pente, au contraire, toutes les particules arrachées par l'énergie des pluies sont exportées de la parcelle et on peut penser que les pores restent ouverts en plus grand nombre ; en tous cas, on constate que les phénomènes d'encroûtement sont beaucoup plus lents et les effets d'un sarclo-binage beaucoup plus durables que sur pente faible.

— enfin, la pente hydraulique augmente avec la pente topographique.

Si l'érosion croît de façon exponentielle avec la pente et ceci malgré une diminution du ruissellement, c'est que la charge solide totale (suspension + terre de fond) augmente substantiellement avec la pente.

WOODRUFF avait déjà démontré en 1948 que si la contribution de l'énergie cinétique des gouttes de pluie est capitale à faible pente, elle devient secondaire par rapport à l'énergie du ruissellement au-delà de 16 % de pente. C'est bien ce qui peut être observé sur le terrain, à savoir :

- une très forte croissance de l'érosion avec la pente (or, l'énergie des gouttes est peu influencée par la pente) ;
- des traînées sableuses sur des surfaces planes et colmatées à faibles pentes ;
- et, par ailleurs, des rigoles de plus en plus profondes et le transport de toutes les particules détachées, phénomènes qui traduisent l'augmentation de l'activité érosive propre au ruissellement, à mesure que la pente augmente.

HEUSCH (69, 70, 71) quant à lui a montré, sur les marnes du Pré Rif au Maroc, que l'érosion et le ruissellement augmentent là où diminue la pente. Ceci serait dû à des phénomènes de drainage oblique très intenses dans ces sols fissurés (vertisols) jusqu'au niveau d'altération de la roche marneuse peu perméable. Sur les fortes pentes qui coïncident avec les sommets des collines (pentes concaves), les pluies s'infiltrent jusqu'au niveau imperméable, drainent rapidement jusqu'en bas de pente (faible pente) où elles ressurgissent (ROOSE, 1971), et c'est là que démarrent les ravines. Il faut bien admettre aussi avec HEUSCH (1971) que plus la pente topographique est forte et plus la pente hydraulique sera forte, ce qui signifie que l'eau circule rapidement à l'intérieur du sol, ce qui doit lui permettre d'absorber à nouveau une certaine quantité d'eau avant la saturation de la porosité. Ces sols sur forte pente étant plus vite asséchés vont donc laisser ruisseler moins d'eau en surface. Dans ces paysages marneux à forte pente, l'érosion se manifeste principalement par des sapements de berge, par la divagation des oueds, par des ravinements et des glissements de terrain (HEUSCH, 1971).

A Adiopodoumé, on a également observé des glissements de terrain lorsqu'on a défriché les bords de lagune dont la pente peut dépasser 70 %. Cependant, ces pentes sont exceptionnelles dans le paysage et non utilisées par l'agriculture comme c'est le cas au Maroc.

Il faut signaler enfin que, sur des bassins versants de moins de 200 km², RODIER et AUVRAY (1965) observent une augmentation du coefficient de ruissellement en fonction des classes de pente et d'imperméabilité du substrat. Alors que les essais relatés plus haut se sont déroulés sur un seul type de sol et sous jachère nue, ces auteurs ont classé leurs bassins versants représentatifs (donc composés de plusieurs types de sols) en fonction de trois zones écologiques (sahélienne, tropicale et subéquatoriale forestière) correspondant à des types définis de précipitations, de sols, de paysages et de modes de recouvrement du sol par la végétation. Ce faisant, ils obtiennent une augmentation des coefficients de ruissellement lorsque les pentes augmentent et lorsque les classes de perméabilité des bassins versants (conditionnées à la fois par le sol et la végétation) et leur surface diminuent.

Cependant, si on observe en détail les points reportés sur les graphiques présentés par ces auteurs, on constate de nombreuses exceptions. Par ailleurs, plus on se rapproche de la zone forestière (où ont eu lieu nos essais), et plus on tient compte d'une perméabilité globale des bassins versants recouvrant à la fois la perméabilité du sol et l'interception des pluies par le couvert végétal. De plus, ces auteurs ne disposent que de onze bassins versants sur lesquels ils admettent que l'on confond le ruissellement superficiel et hypodermique (voir le temps de réponse des crues qui croît de façon significative). Il convient aussi de souligner les différences de type d'expérimentation et d'échelle. En effet, les bassins versants comportent différents types de sols en proportions variables : des sols de plateau, des sols de versant et des sols de bas-fond, ces derniers pouvant être absorbants vis-à-vis du ruissellement provenant des versants ou, au contraire, très vite saturés et provoquant alors de forts ruissellements. Lorsqu'on dit que la pente d'un bassin versant est élevée, cela peut signifier que la proportion des sols de bas-fond est faible, donc qu'il y a moins d'absorption des eaux au niveau des sols colluvionnaires. Enfin, nos essais sur parcelles eurent lieu sur un sol nu, tandis que les bassins versants sont toujours plus ou moins couverts de végétation. Or, celle-ci a une grande influence sur l'absorption de l'énergie cinétique des pluies qui peut transformer radicalement la perméabilité d'un sol nu en fonction de sa pente (voir Tableau 13).

3.2. La longueur de la pente

En principe, plus la pente est longue, plus le ruissellement s'accumule, prend de la vitesse et de l'énergie, ce qui se traduit par une érosion plus massive (en rigole). Ainsi, ZINGG (1940) trouve que l'érosion croît de façon exponentielle (exposant 0,6) avec la longueur de la pente. HUDSON (1957, 1973) estime «qu'en région tropicale une plus haute valeur de l'exposant est plus appropriée». WISCHMEIER *et al.* (1958) après avoir examiné 532 résultats annuels sur les parcelles d'érosion en conclut que les relations entre l'érosion et la longueur de pente varient plus d'une année à l'autre que d'un site à un autre : l'importance de l'exposant (0,1 à 0,9) est fortement influencée par l'évolution du sol, la couverture végétale, l'utilisation des résidus de culture, etc. Finalement, en 1956 un

groupe de travail de l'Université de Purdue a décidé d'adopter pour l'usage courant sur le terrain l'exposant 0,5 pour exprimer l'influence de la longueur de la pente sur les pertes en terre. L'influence de la longueur de pente sur le ruissellement est en fait encore moins nette : elle est tantôt positive, tantôt négative ou nulle.

A Adiopodoumé, aucun essai n'a été tenté pour chiffrer l'influence de la longueur de la pente. Celle-ci n'y est probablement pas nulle car on peut observer que les rigoles ne se dessinent que 4 à 5 m en-dessous de la bordure amont des parcelles et s'approfondissent à mesure qu'on s'en éloigne (ROOSE, 1973).

A Séfa (ROOSE, 1967) furent comparées trois parcelles de 1,25 % de pente dont l'une, de longueur double des deux autres, portait en alternance les cultures des deux autres (= strip cropping marqué par la longueur de pente). En général, le ruissellement observé est plus faible sous cette parcelle longue ($K_R = 19,1\%$ par rapport à 21,8 %), tandis que l'érosion est supérieure ($E = 6,08$ par rapport à 5,55 t/ha/an) à celle observée sur les deux parcelles courtes.

A Agonkamey (WILLAIME, 1965 ; VERNEY *et al.*, 1967), les conclusions sur deux parcelles voisines ($p = 4,5$) ne confirment pas nettement non plus l'augmentation des phénomènes d'érosion avec la longueur de la pente. Sous fourré naturel, en effet, érosion et ruissellement sont plus faibles sur la pente longue (60 m). Mais l'année suivante, sur sol défriché et dessouché, les ruissellements sont voisins tandis que l'érosion sur la parcelle courte (30 m) est nettement plus forte que sur la parcelle longue ($E = 27,5$ contre 17 t/ha/an).

A Boukombé (WILLAIME, 1962), les observations effectuées sur trois parcelles cultivées en fonio de 3,7 % de pente et de 21-31 et 41 m de longueur montrent qu'il n'y a guère de différence de ruissellement ($K_R = 4\%$), ni d'érosion (0,8-1 et 0,7 t/ha). L'influence de la longueur de pente n'est donc ni très prononcée, ni même constante (ROOSE, 1975).

3.3. La forme de la pente

Il est très délicat d'estimer l'influence de la forme concave, convexe, homogène ou gauchie d'une pente. Le facteur est trop souvent négligé, ce qui explique pour une large part la divergence des résultats trouvés par divers auteurs. En effet, à mesure que les parcelles d'érosion vieillissent et sont soumises à une forte érosion, elles deviennent de plus en plus concaves puisque la base de la parcelle reste fixe (= canal de ruissellement) et que le centre s'érode plus vite que le haut. D'où la nécessité de réajuster chaque année la pente des parcelles pour ne pas fausser les résultats par défaut.

D'après WISCHMEIER (1974), à pente moyenne égale, une pente gauchie ou concave diminue les transports solides (sédimentation localisée) tandis qu'une pente convexe l'augmente en fonction de l'inclinaison du segment le plus pentu.

3.4. Le facteur topographique : SL.

En vue de l'utilisation pratique à grande échelle, WISCHMEIER et SMITH (1960) ont proposé une abaque unique qui traduit à la fois les influences de la longueur et de l'inclinaison de la pente selon la formule :

$$SL = \frac{\sqrt{L}}{100} \times (0,76 + 0,53S + 0,076 S^2) \quad (\text{équation 7})$$

dans laquelle L est la longueur de la pente exprimée en pieds (1 pied = 0,3048 m) et S est la pente en %. Si on choisit une parcelle de 9 % de pente et 72,6 pieds de long, le facteur topographique se réduit à 1 : c'est, par définition, le cas des parcelles de référence. Cependant, certains types de sols intéressants ne se présentent jamais sous de telles conditions de pente. Il vaut mieux dès lors choisir une pente typique pour chaque type de sols mais garder une longueur uniforme de 22,12 m pour éviter les incertitudes concernant l'influence de la longueur de la pente sur l'érosion.

A Adiopodoumé, sur sol nu et en moyenne sur cinq ans, on a trouvé des résultats voisins de ceux de la courbe théorique de WISCHMEIER et SMITH (1960), mais très variables d'une année à l'autre (ROOSE, 1973). Or, il semble que de très faibles variations de pente (0,5 %) suffisent à entraîner des variations notables d'érosion et quelquefois de ruissellement (Tableau 12).

Du point de vue scientifique, ce facteur topographique est sûrement le point faible de l'équation empirique de prévision de l'érosion, car il est évident que l'érosion (et le ruissellement) évoluent de façons très différentes sur sols sableux ou argileux, en fonction des discontinuités du profil, de la couverture végétale, des techniques culturales et peut-être du type de climat. Ce problème ne pourra être abordé, sol par sol, qu'à l'aide du simulateur de pluie. En attendant d'avoir suffisamment de données, on peut s'appuyer sur cette équation ou sur une équation du type exponentiel ($SL = S^{1,5} \times L^{0,5}$: HUDSON, 1973) qui donne satisfaction dans bon nombre de cas pratiques sur les sols à argile dominante kaolinitique.

Diagramme facteur topographique (Fig. 3), page 50.

3.5. Conclusions

Il semble qu'en moyenne l'érosion croît de façon exponentielle avec l'inclinaison de la pente et peut-être aussi avec sa longueur, mais que l'exposant varie considérablement selon les circonstances. L'évolution du ruissellement en fonction de la pente est encore plus variable d'un essai à l'autre. Il reste donc tout un domaine d'investigations sous pluies naturelles ou simulées pour fixer avec précision l'influence de la pente (inclinaison, mais surtout longueur et forme) sur les phénomènes d'érosion en fonction du type de sol, du couvert végétal et des techniques culturales (travail du sol et disposition des résidus de culture). En fait, il n'y a pas indépendance d'influence entre le type de sol, la pente et les techniques culturales.

Il convient de souligner ici que l'incertitude concernant l'influence de la longueur de la pente sur l'érosion remet en question l'efficacité des techniques antiérosives du type des terrasses, banquettes et fossés de diversion (ROOSE, 1974) qui sont appliquées sans discernement sous des climats et des sols très variés.

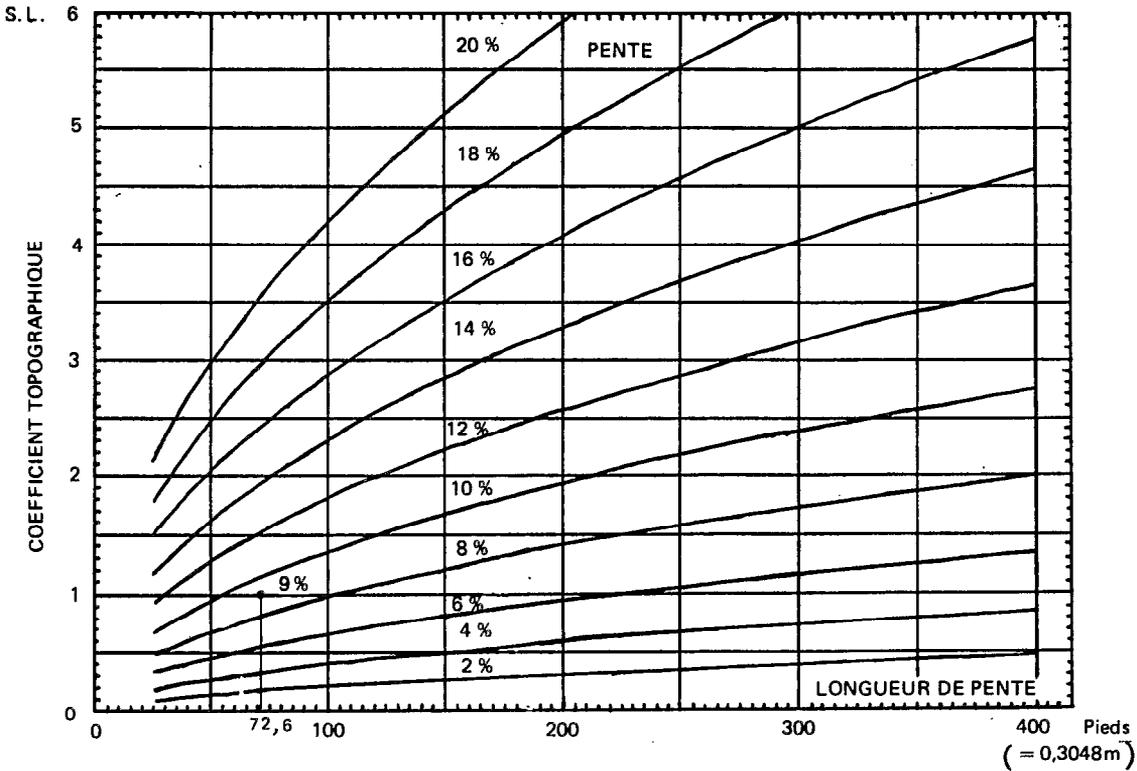


Fig. 3 – Coefficient topographique

D'après WISCHMEIER et SMITH (1958)

4. LE COUVERT VÉGÉTAL ET LES TECHNIQUES CULTURALES

Un couvert végétal est d'autant plus efficace qu'il absorbe l'énergie cinétique des gouttes de pluie, qu'il recouvre une forte proportion du sol durant les périodes les plus agressives de l'année, qu'il ralentit l'écoulement du ruissellement et qu'il maintient une bonne porosité. Cependant, il est difficile d'évoquer l'action protectrice d'un couvert végétal sans préciser les techniques culturales (au sens le plus large) utilisées pour l'obtenir. C'est pourquoi on a regroupé dans ce paragraphe tous les résultats expérimentaux d'Adiopodoumé de 1956 à 1975 en vue de fixer les ordres de grandeur des phénomènes d'érosion en fonction des principaux types de végétaux testés et des techniques culturales associées (Tableau 14).

Tableau 14
Érosion et ruissellement à Adiopodoumé en fonction du couvert végétal,
des techniques culturales et de la pente
- 1956 à 1972 -

Couvert végétal et façons culturales	Érosion annuelle t/ha		Ruissellement annuel moyen %	Ruissellement maximum %	
	Extrêmes	Moyenne			
Forêt secondaire (pente 23,3%)	0,01 à 0,2	0,1	0,7	6* (12)**	
Sol nu* pente {	4,5	34 à 74	60	37	71 (98)
	7	69 à 150	138	33	66 (87)
	20-23,3	266 à 622	570	25	65 (73)
Plante de couverture ou fourragère (p = 7%)					
. 1ère année					
- plantation hâtive, fort développement dès la 1ère année	0,1 à 1,9	0,5	4	25 (29)	
<i>Pennisetum purpureum, Guatemala grass,</i> <i>Panicum maximum, Cynodon dactylon,</i> <i>Setaria</i>					
- plantation tardive, faible densité, faible développement 1ère année	23 à 89	40	20	62 (87)	
<i>Crotalaria, Flemingia congesta, Mimosa</i> <i>invisa, Panicum maximum, Digitaria</i> <i>umfolozi, Centrosema, Titoria diversifolia</i> <i>Stylosanthes</i>					
. 2ème année					
- toutes les plantes de couverture - 2 ^d an.	0,05 à 0,7	0,3	1	8 (12)	
Jachère naturelle (pente 4,5%)	-	0,6	8	64	
Caféier, palmier à huile ou cacaoyer (p = 7%)					
- avec une bonne plante de couverture	0,01 à 0,5	0,3	2	8 (16)	
- avec une plante de couverture peu développée	5 à 143	-	30	60 (87)	
Bananier avec paillis (p = 7%)	0,04 à 0,05	0,04	0,5	4	
Ananas					
1ère année {	8 à 20	12	14	51	
à plat 7%	-	1,5	9	5	
butté 4,5%					
2e année	0,1 à 0,3	0,2	3	12	
Manioc et igname (p = 7%) {	22 à 93	32	22	53 (82)	
butté 1 ^{ère} année	-	2	7	24	
butté 2 ^e année					
Maïs 20 x 100 cm (p = 7%) billonné dans le sens de la pente	(35) à 131	92	30	75 (86)	
Arachide 20 x 40 cm à plat (p = 7%)	59 à 120	82	27	73 (87)	

* Le premier chiffre est le maximum probable chaque année par pluie unitaire.

** Le deuxième chiffre correspond à un événement exceptionnel de récurrence décennale.

4.1. Le couvert végétal

Le Tableau 14 met en évidence l'existence de trois groupes de couverts végétaux :

1. **Les couverts complets toute l'année** : forêt, jachère naturelle, prairie de plus d'un an, culture arbustive avec plantes de couverture ou paillage. L'érosion est toujours négligeable sous ces couverts denses (0,01 à 1,5 t/ha/an) et le ruissellement très faible ($R\% = 0,5$ à 5% en moyenne, 10 à 25% au maximum pour les averses exceptionnelles).
2. **Les sols nus, ou pratiquement nus** durant les mois les plus agressifs (mai à juillet). L'érosion est alors d'autant plus considérable que la pente est forte ($60-138-570$ t/ha/an si la pente passe de $4,5$ à 7 et 23%), et le ruissellement est très important (R moyen = 25 à 40% , R maximum = 80 à 90%).
3. **Les couverts incomplets** au moins durant une partie de l'année : ce sont les cultures vivrières ou industrielles et les plantes de couvertures ou fourragères implantées tardivement ou encore à démarrage lent. Les phénomènes d'érosion sont intermédiaires, mais extrêmement dépendants de la précocité et de la densité de plantation, de la pente et des techniques culturales.

On remarque immédiatement que les cultures vivrières sont parmi les plantes les moins protectrices du sol : l'érosion sous manioc ou igname s'élève de 22 à 93 t/ha/an, tandis que sous maïs et arachide elle varie de 35 à 131 t/ha. Ceci provient du fait qu'on n'a utilisé aucune technique antiérosive, que les dates de plantation furent tardives et les densités assez faibles vu la pauvreté du sol. En tous cas, le couvert n'a atteint 90% de la surface cultivée qu'après deux à cinq mois, c'est-à-dire après l'époque des plus fortes pluies.

Il n'en va pas de même dans les champs familiaux traditionnels où on plante souvent très tôt après quelques averses et presque toujours en associant plusieurs cultures dont les couverts se complètent et se succèdent dans le temps. En culture intensive cependant, on ne peut prendre le risque de devoir recommencer les semis si des périodes sèches succèdent aux premiers orages : les plantations se font donc nécessairement relativement tard, mais une fertilisation adéquate permettrait d'augmenter les densités.

Du Tableau 14, il ressort donc que l'érosion et, dans une moindre mesure, le ruissellement dépendent pour une large part de la **proportion du sol non couverte par la végétation avant les grosses pluies**. Il ne s'agit pas seulement de la masse de matière verte produite sur un champ, mais plus précisément de la **projection verticale ou légèrement oblique du couvert sur le sol** (l'angle de chute des grosses pluies est généralement inférieur à 25° sauf lors de certaines tornades où il peut atteindre 45°) et de l'**architecture des plantes** (hauteur du feuillage et disposition en gouttière concentrant ou dispersant les gouttes : maïs ou ananas et manioc).

Or, il existe très peu d'études générales sur la **dynamique du couvert végétal** et aucune technique valable pour tous les types de végétaux cultivés. On a donc utilisé différents procédés pour évaluer le couvert végétal (ROOSE, 1973) :

- le diamètre moyen du cercle couvert par les rosettes de l'arachide,
- la proportion de surface couverte (photos verticales) du cercle circonscrit à une touffe de manioc,
- le nombre et la surface des feuilles du maïs,
- les surfaces géométriques simples couvertes ou, au contraire, dénudées entre les lignes de *Stylosanthes* et d'arachides ou dans la savane,
- les points quadrats (aiguilles touchant ou non le couvert) pour les graminées, les mauvaises herbes, les résidus de culture et l'ananas.

On pourrait aussi songer à des photos verticales de la voûte foliaire prises à partir du sol avec un objectif grand angulaire ou du type «fish eye».

Le Tableau 15 et la Figure 4 montrent que la dynamique de la croissance du couvert végétal est très variable en fonction du type de plante, mais aussi des techniques culturales (densité et date de plantation, fertilisation) et du climat (précipitations et éclaircissement). On comprend dès lors que si les fortes averses tombent un mois après le semis, l'érosion sera fonction du type de plante tout autant que des techniques culturales. D'où la notion de «plante dégradante» ou «protectrice» suivant la vitesse du recouvrement du sol par ces plantes, notion qui doit être tempérée par celle des techniques culturales appropriées. En effet, une graminée protégera généralement mieux le sol qu'une légumineuse ou qu'un manioc, encore qu'une plantation hâtive par rapport aux périodes les plus pluvieuses permet d'améliorer très nettement la valeur protectrice des plantes : le *Stylosanthes*, par exemple, atteint le même pouvoir couvrant (95 %) que le *Panicum* avec deux mois de retard.

Tableau 15
Couvert végétal en fonction du temps de croissance

Culture	Année	Couvert % après le semis			
		1 mois	2 mois	3 mois	5 mois
Maïs	1969	9-12/27-45	80-93/55-68	45-55/45-57	–
Arachide	1969	15/30	97/85	93/90	–
Manioc	1966	12	25	45	85
<i>Panicum maximum</i>	1970-72	90	100	100	100
<i>Cynodon aethiopicus</i>	1970-72	80	95	95	95
<i>Stylosanthes guyanensis</i>	1970-72	60	90	95	95
Ananas (rejet)	1975	35	45	55	75

L'influence de l'architecture des plantes n'est pas toujours négligeable. Si on observe de près l'érosion au contact d'un pied de maïs ou d'ananas (= plante entonnoir), on peut constater que les eaux de pluie se concentrent le long de la tige, déchaussent bien souvent les racines et cisailent le billon en provoquant la naissance d'une rigole évoluant vite en ravine. La forme hémisphérique ou en parapluie de la voûte foliaire de l'arachide, du *Stylosanthes* et du manioc provoque, au contraire, une dispersion des gouttes interceptées par les feuilles. En outre, les nombreuses tiges de l'arachide, du *Stylosanthes* et de diverses graminées sont autant de barrages qui freinent l'écoulement des eaux, tandis que les grosses racines pivotantes favorisent leur infiltration. Le *Cynodon aethiopicus* et les autres plantes à stolons sont utilisés avec succès pour fixer les talus et les exutoires, car ils fixent très efficacement les terres à l'aide de leurs tiges rampantes et leurs nombreuses racines. Par contre, le *Panicum maximum* et les autres graminées en grosses touffes provoquent la concentration des écoulements entre les touffes qui finissent par former des rigoles et laisser les touffes «suspendues» quelques centimètres au-dessus du niveau du sol.

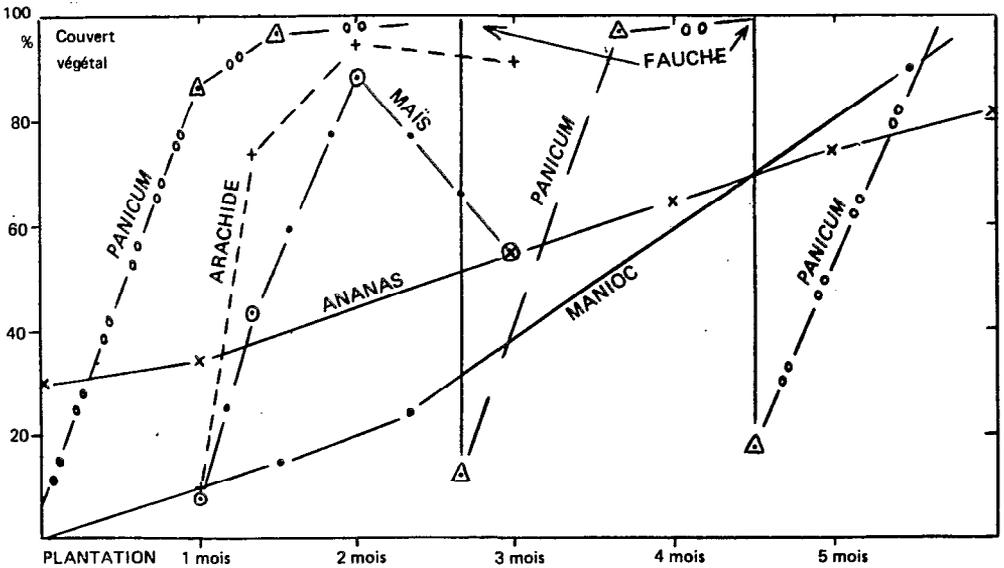


Fig. 4 - Évolution du couvert végétal de différentes cultures au cours de l'année

- Adiopodoumé, cases d'érosion : 1966 à 1975 -

Le Tableau 16 traduit l'importance de la protection antiérosive qu'offrent la base des tiges et les racines superficielles de trois plantes fourragères après leur fauche. On constate que :

- même après la fauche, la protection offerte par les cultures fourragères est considérable : en comparaison avec la parcelle nue, on a réduit le ruissellement à moins de la moitié et l'érosion à 1/17e et jusqu'à 1/415e ;
- le *Cynodon* fauché reste bien plus efficace que le *Stylosanthes* (en ligne) et surtout que le *Panicum* en touffe ;

E -- Influence de l'architecture du couvert sur l'érosion

Manioc : forme parapluie



1968

Ananas : forme entonnoir



1972

Maïs : forme entonnoir



1966

(cf. ORSTOM - Photos ROOSE)

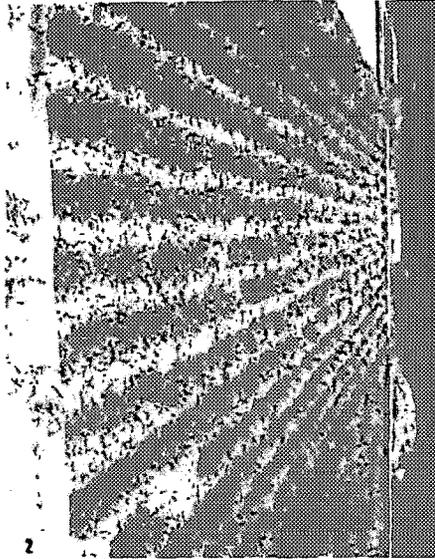
F – Couverture du sol sous plantes fourragères après la fauche

Panicum maximum (G 23)



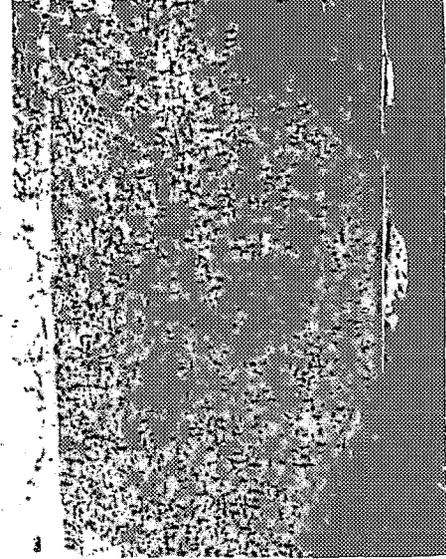
(cf. ORSTOM - Phot. FILLONEAU)

Stylosanthes guyanensis



(cf. ORSTOM - Phot. ROOSE)

Cynodon aethiopicus



(cf. ORSTOM - Phot. ROOSE)

Adiopodoumé

— l'érosion est fonction de la surface du sol découverte après la fauche, soit 20 à 40 % sous *Cynodon*, 60 % sous *Stylosanthes* en ligne et près de 90 % sous *Panicum*.

Tableau 16
Protection antiérosive de trois plantes fourragères après la fauche
— Adiopodoumé 1970-1972 —

	Pluie		<i>Cynodon aethiopicus</i>		<i>Stylosanthes guyanensis</i>		<i>Panicum maximum</i>		Sol nu	
	Hauteur mm	Agressivité RUSA	R %	E kg/ha	R %	E kg/ha	R %	E kg/ha	R %	E kg/ha
3-11-1970	41,5	13,8	3,6	47	19,6	10	0	0	39	1 843
4-11-1970	Fauche									
5-11-1970	20,0	4,4	2,3	12	16,6	69	13,3	110	53	1 323
7-11-1970	22,0	7,3	2,6	2	14,9	87	25,0	175	74	1 111
22-09-1971	Fauche									
27-09-1971	33,5	18,5	1,9	9	15,2	188	3,3	175	32	1 542
15-07-1972	Fauche									
17-07-1972	65,0	42,3	3,4	10	6,1	16	21,8	335	77	9 710
Total après fauche	140,5	72,5	2,8	33	11	360	17	795	62	13 686
Couvert végétal après la fauche le 17-07-1972			60 à 80 %		42 %		8 à 14 %		0	

Il est nécessaire de noter au Tableau 14 que, lorsque le couvert est incomplet, la variabilité des résultats est très importante. C'est une chance pour le conservateur des eaux et du sol, car cette variabilité ne provient pas seulement de l'hétérogénéité des pluies et des imperfections de la méthode, mais surtout de la façon dont les cultures ont été mises en place et menées jusqu'à la récolte. On pourra donc jouer sur les techniques culturales, lesquelles agissent par voie biologique ou mécanique. La première méthode à laquelle il faut penser pour conserver l'eau et le sol est la méthode biologique qui vise à intensifier la production sur les meilleures terres en augmentant le couvert végétal : la technique comporte un semis hâtif et dense de variétés à forte croissance bien adaptées à l'écologie régionale, une préparation adéquate du sol, une fertilisation équilibrée, une protection phytosanitaire suffisante, l'usage de plantes de couverture ou de paillage, des rotations et l'alternance de plantes couvrantes et de cultures sarclées ouvertes. Le Tableau 14 fait bien ressortir l'importance de la couverture du sol pendant la période des pluies les plus agressives (15 mai au 15 juillet à Adiopodoumé). Certaines plantes fourragères, par exemple, offrent une excellente protection (E = 1 t/ha ; R = 5 %) si elles sont plantées à

la bonne densité avant le 1er avril. Si, par contre, elles sont semées juste avant les grosses averses, elles laissent se développer une érosion catastrophique ($E = 23$ à 89 t/ha ; $R = 20$ %).

A Adiopodoumé, sur deux parcelles identiques de 7 % de pente, le retard d'un mois de la plantation d'un *Panicum maximum* a entraîné une augmentation de l'érosion de 1,2 à 89 t/ha, et du ruissellement de 10 à 20 %, pour les trois mois les plus agressifs de l'année.

Le choix d'une variété de manioc très vigoureuse et l'apport de fumier a réduit l'érosion de 93 à 30 t/ha/an.

La technique du paillage est encore plus efficace puisqu'il suffit de recouvrir le sol de débris végétaux quelconques (4 à 6 t/ha/an) pour réduire l'érosion (40 kg/ha/an) et le ruissellement (0,5 %) aux mêmes ordres de grandeur que sous une forêt secondaire de 30 mètres de haut. En grande culture industrielle (banane) il n'est pas toujours rentable et souvent difficile de se procurer du paillage naturel ; il faut alors veiller à maintenir à la surface du sol le plus possible de déchets de culture, ce qui demande parfois une adaptation des techniques culturales (= stubble mulching pratiqué aux USA). Ceci a été réalisé à la SALCI à Ono où on a fort bien réussi un deuxième cycle d'ananas (75 t/ha de fruits) après girobroyage des plants du cycle précédent (10 à 15 t/ha de matières sèches) mais sans enfouissement : d'où un gain de temps de travaux du tracteur et une protection parfaite contre l'érosion. Cependant, c'est dans les petites plantations de brousse que cette technique devrait être appliquée le plus facilement et avec beaucoup de succès, car il pousse toujours suffisamment de broussailles autour des champs, et ce paillage améliore nettement l'alimentation hydrique et chimique des cultures.

En culture arbustive, l'implantation d'une bonne plante de couverture résout généralement les problèmes d'érosion (voir café, palmier, cacao et hévéa).

Tableau 17
Influence du développement du couvert d'une plante de couverture
sous des cultures arbustives sur la protection antiérosive du sol
Pente 7 % - Adiopodoumé 1961 et 1962

Couverture végétale	Développement de la plante de couverture	E t/ha/an	Ruissellement moyen %	Ruissellement maximum %
1961 : Pluies 2289 mm				
P ₁ Caféier + couverture <i>Flemingia</i>	bon	0,4	2,6	8
P ₂ Palmier + couverture <i>Centrosema</i>	presque nul	143,2	2,1	87
P ₅ Caféier + couverture <i>Stylosanthes</i>	lent	5,2	1,8	75
1962 : Pluies 2773 mm				
P ₁ Caféier + <i>Flemingia</i> 2d an	complet	0,05	0,7	2
P ₂ Palmier + <i>Centrosema</i> 2d an	moyen	0,08	1,4	4

Enfin, l'alternance dans le temps (**rotation**) et dans l'espace de cultures qui protègent mal le sol (maïs, arachide, tabac, manioc, igname) et de **prairie temporaire** ou permanente (ou de bandes d'arrêt) permet de réduire l'érosion à l'échelle du bassin versant (voir dans ce chapitre, 5. **Quelques techniques antiérosives**).

4.2. Le travail du sol

Pour conserver l'eau et le sol, on peut aussi avoir recours au travail du sol ; il s'agit d'augmenter sa macroporosité, sa rugosité, sa vitesse et sa surface d'infiltration (labour, buttage, billonnage) et de freiner ou d'annuler la vitesse du ruissellement (culture et billonnage en courbe de niveau). Si ces techniques font appel à des moyens mécaniques pour réduire le ruissellement, il ne faut pas perdre de vue que le travail du sol favorise le développement des racines et par conséquent du couvert végétal : il s'agit donc de méthodes mécaniques et biologiques à la fois.

4.2.1. Le labour profond

Des travaux antérieurs (BIROT, GALABERT, ROOSE, ARRIVETS, 1968) ont montré que le travail du sol diminue temporairement le ruissellement et l'érosion, mais qu'il augmente la détachabilité et donc, à long terme, les risques d'érosion. Il nous suffit de donner ici l'exemple suivant concernant l'effet du travail du sol à la houe.

Tableau 18
Effet d'un labour à la houe sur l'érosion (pente 7 %, à Adiopodoumé)

Août à décembre 1957 : Pluies = 605 mm		E (t/ha)	R %	R % max.
P ₃	Sol nu, tassé, à plat	15,3	27	54
P ₂	Sol nu, labouré sur 15/20 cm à la houe, à plat	26,6	11	48

On constate, sur ce Tableau 18, une augmentation de l'érosion et une diminution du ruissellement sur une parcelle nue labourée. En effet, le labour augmente temporairement la porosité du matériau mais diminue sa cohésion.

Par ailleurs, on peut tirer quelques enseignements de l'observation des réactions des parcelles labourées nues à l'agressivité des pluies avant et après labour à la daba suivi d'un planage entraînant la pulvérisation des mottes de la surface .

Au Tableau 19 sont réunies les observations concernant l'érosion sous les pluies encadrant la date du labour (9-4-71) de trois parcelles nues de pente de 4,5, 7 et 20%.

Le ruissellement s'est arrêté pendant trois semaines où il a plu 87 mm. Il reprend ensuite brutalement sur faible pente dès que la surface est lissée, mais beaucoup plus progressivement sur forte pente. Le labour a ralenti le ruissellement pendant 50 jours (170 mm de pluie).

Tableau 19
 Evolution du ruissellement (%), de l'érosion (kg/ha) et de la turbidité (gr/m³) sur des parcelles nues
 Influence d'un labour (à 15 cm) et de la pente
 -- Adiopodoumé ; campagne 1971 --

Pente.....	Pluies		Ruissellement %			Érosion kg/ha			Turbidité gr/m ³		
	Hauteur mm	Érosivité R	4,5 %	7 %	20 %	4,5 %	7 %	20 %	4,5 %	7 %	20 %
30-3-1971	31,0	30,5	79,3	64,1	44,2	2494	4793	30284	273	664	1225
6-4	36,0	17,4	48,7	53,6	12,1	1003	2250	4795	23	47	110
9-4	labour puis planage de toutes les parcelles terminé le 13-4										
10-4	37,0	16,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19-4	5,5	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22-4	12,5	1,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26-4	5,5	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3-5	27,0	12,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4-5	17,0	8,1	37,8	15,5	3,3	946	145	383	<u>4281</u>	<u>5502</u>	<u>8562</u>
10-5	17,5	1,0	31,6	17,6	2,7	543	549	379	1492	1796	4320
15-5	24,0	12,2	37,8	<u>20,3</u>	6,4	878	676	2316	<u>626</u>	2719	2467
21-5	23,5	10,8	53,8	30,1	<u>6,3</u>	989	859	2031	678	1483	3992
29-5	35,0	17,3	46,9	34,8	15,2	1708	3074	23278	810	784	968

L'érosion n'est guère mesurable tant que le ruissellement est nul. Il est cependant évident qu'elle joue un rôle à courte distance puisque la surface, de motteuse et ouverte au départ, devient lisse et fermée au bout de quatre à six semaines (effet splash et sédimentation dans les parties basses). Au bout de 50 jours, l'érosion atteint un niveau exceptionnellement élevé, puis diminue au bout de deux mois suite au tassement et à l'encroûtement de la surface du sol. Il semble que, sur pente forte, l'effet du labour se fasse sentir plus longtemps que sur pente faible ; mais, à la reprise, l'érosion y redevient beaucoup plus intense à cause de l'énergie élevée du ruissellement.

La turbidité des eaux de ruissellement (charge fine en suspension) est faible durant la saison sèche (sol encroûté), mais augmente très brutalement lors des premières pluies ruisselantes après le labour (10 à 100 fois plus fortes) ; puis elle décroît lentement à mesure que se reforme une surface glacée et battue.

En résumé (Tableau 20), sur un sol sableux, un labour à la houe sur 15 à 20 cm, surtout s'il laisse la surface motteuse, peut absorber totalement des pluies totalisant 45 à 80 millimètres et son action modératrice sur l'érosion et le ruissellement peut se faire sentir pendant trois à cinq semaines (50 à 190 mm de pluie) sur parcelle nue.

Tableau 20
Durée d'efficacité d'un labour suivi d'un planage sur les phénomènes d'érosion

Date du labour	Arrêt total		Influence modératrice	
	Durée jours	Hauteur pluie mm	Durée jours	Pluie hauteur en mm
24-4-1968	10	66	26	160
24-9-1968	9	46	34	190
21-4-1969	21	81	21	121
8-8-1969	60	77	80	179
30-4-1970	0	—	22	127
13-4-1970	21	87	[p = 4,5 % 21 p = 20 % 45	87
				187
28-3-1972	29	51	29	51

Ces résultats obtenus en basse Côte d'Ivoire sur parcelles nues et sols ferrallitiques sableux semblent défavorables à l'usage du labour puisque les bénéfices ne durent qu'un mois et qu'au bout de l'année les pertes en terre sont plus importantes (~ 25 %) que si on avait laissé le sol tassé. En fait, il ne faut pas oublier l'interaction qui joue entre les effets du labour sur le sol (amélioration de la porosité) et la croissance des plantes (meilleur enracinement = meilleure couverture végétale).

Un essai très instructif sur l'influence du travail du sol a été réalisé par l'IRAT dans les cas d'érosion de Bouaké, sur un sol ferrallitique remanié sableux comportant un horizon gravillonnaire vers 30 centimètres de profondeur (KALMS, 1975).

On a comparé pendant quatre ans le comportement à la pluie d'un sol nu gravillonnaire soumis à quatre modes de préparation du sol effectués dans le sens de la pente deux fois l'an : labour profond (25 cm) à la charrue à soc (L), labour semblable suivi d'un pulvérisage léger (L + P), pulvérisage superficiel à 5-10cm (P) et non travail du Sol (O) (Tableau 21).

Tableau 21

Réaction à la pluie en fonction du mode de préparation d'un sol nu ferrallitique gravillonnaire :

Année	Pluie		Ruissellement (% annuel) des pluies érosives				Érosion (t/ha/an)				Turbidité (mgr/l.)			
	h (mm)	R _{USA}	L	L + P	P	O	L	L + P	P	O	I	L + P	P	O
1971	1345	523	34	32	35	(41)	11,5	14,9	12,9	-	-	-	-	-
1972	965	329	37	34	37	42	19,7	11,0	25,0	17,9	-	-	-	-
1973	959	352	35	40	47	49	17,6	9,3	48,6	41,1	690	730	680	210
1974	1121	464	31	31	36	45	12,2	11,2	43,8	51,9	580	340	570	260

On constate que le travail du sol (profond ou superficiel) a amélioré l'infiltration des eaux de pluie : le ruissellement est toujours plus fort sur le sol nu non travaillé, et le phénomène est évidemment encore plus marqué si on ne s'intéresse qu'aux pluies érosives survenues après le labour. L'érosion évolue au cours du temps, mais à partir de la 3^{ème} année elle est nettement plus faible sur sol nu labouré et pulvérisé que sur sol nu travaillé superficiellement ou pas du tout. Par contre, le travail du sol augmente très nettement la charge fine en suspension dans les eaux de ruissellement. Sur le terrain, on peut observer en surface les graviers remontés par le labour (22 à 28 % avec labour ; 10 à 13 % sans labour). Sur ce sol ferrallitique gravillonnaire de Bouaké, le labour a donc augmenté l'infiltration et diminué l'érosion, en remontant des graviers qui ont joué un rôle de mulch protecteur à la surface du sol.

Au Nigéria, LAL (1975) travaillant à Ibadan dans des conditions climatiques et pédologiques voisines de Bouaké, trouve que l'érosion sur parcelle labourée croît de façon exponentielle avec la pente, mais reste faible et stable quelle que soit la pente si on travaille le sol au minimum (mulch tillage) et si on dispose à la surface du sol les résidus de la culture précédente. Ceci proviendrait de la conservation de la macroporosité d'origine biologique grâce à la protection du sol contre la battance des pluies par le mulch de résidus organiques. Ainsi, lors d'une averse de 63 millimètres survenant deux semaines après plantation de pois d'Angole, l'infiltration est restée supérieure à 96 % sur parcelles sans labour alors qu'elle ne

dépassait plus 30 % sur parcelle nue labourée ; quant à l'érosion, elle augmente de 1 à 33,3 t/ha en fonction de la pente (1 à 15 %) avec labour, alors qu'elle reste négligeable (0,01 t/ha) en absence de labour mais en présence de mulch dans les mêmes conditions de pente.

En définitive, l'avantage du labour ou du non-labour à moyen terme en ce qui concerne l'économie de l'eau et du sol dépend dans une large mesure du type de sol (sensibilité à la battance, compacité, teneur en graviers, perméabilité et teneur initiale en matières organiques) de la pente, de la couverture végétale, de l'utilisation des résidus de culture, de la date du labour par rapport aux périodes des pluies agressives et surtout de la qualité du labour. Le travail du sol est un mal souvent nécessaire au développement des racines, à la maîtrise des mauvaises herbes et à la rupture de la pellicule de battance qui ferme certains sols riches en limons et sables fins et pauvres en matières organiques (en particulier les sols ferrugineux tropicaux). Il faut éviter d'en abuser sur forte pente en zone tropicale humide. L'un des principaux thèmes actuels de la recherche en conservation des sols est l'utilisation des résidus de la culture et le travail du sol, que ce soit en Amérique ou en Afrique. En effet, il manque encore des preuves de l'intérêt à long terme sur les plans agronomique et économique, des techniques telles que le minimum tillage, travail localisé avec interlignes protégés par les résidus de culture, le stubble mulching et le zéro tillage associé au mulching (mulch tillage), techniques qui toutes semblent avoir une action favorable sur l'économie de l'eau et des terres. En tous cas, plusieurs obstacles pratiques existent encore à l'utilisation de ces méthodes où l'on conserve en surface les résidus organiques : lutte contre les mauvaises herbes (prix des herbicides), machines pour éclater le sol sans le retourner (dents vibrantes au lieu de charrue), problèmes phytosanitaires.

4.2.2. Travail superficiel (sarclo-binage)

La formation d'une pellicule de battance ayant une influence considérable sur l'infiltration, on pouvait espérer qu'un travail superficiel du sol suffirait pour réaliser une économie en eau et en terre. En fait, à Adiopodoumé (ROOSE, 1973), on constate que les effets d'un sarclo-binage sur des sols nus sableux sont semblables à ceux d'un labour mais encore plus temporairement profitables. Suite à un grattage superficiel à la houe, le sol ne peut absorber qu'une pluie peu agressive de 10 à 30 millimètres et limiter l'érosion durant un à huit jours ; ensuite l'érosion dépasse celle des témoins. Si le ruissellement est temporairement ralenti, la turbidité est nettement plus forte et ne décroît qu'avec la formation d'une nouvelle pellicule de battance.

A Bouaké (Tableau 21), on a observé que le pulvérisage superficiel d'un sol nu limite peu le ruissellement et augmente l'érosion.

En conclusion, il semble que si le travail superficiel du sol peut rendre des services pour améliorer l'infiltration en période sèche, c'est une pratique dangereuse et peu utile, à éviter en pleine saison des pluies.

4.2.3. Le buttage et le billonnage

Ce sont des techniques courantes en Afrique pour assurer le bon développement des racines (manioc, igname), mais ce sont des pratiques dangereuses car, si théoriquement elles augmentent la surface d'infiltration du sol (donc en principe diminuent le ruissellement), elles augmentent également la pente moyenne du terrain et donc l'érosion (qui croît de façon exponentielle avec la pente).

Tableau 22
Effet d'un buttage sur un sol presque nu
- Pente de 7 % ; Adiopodoumé, 1956 -

Mai à août 1956 ; pluies = 1 534 mm	E t/ha	R moy. %	R max. %
P ₂ Manioc planté tardivement sol presque nu sur butte	89,6	26,6	48
P ₃ Manioc planté tardivement sol nu à plat	79,0	28,2	52

D'autres essais temporaires (campagnes 1967 à 1969) suggèrent une légère baisse du ruissellement et une augmentation de l'érosion et de la turbidité sur un sol billonné recouvert de maïs, mais ces phénomènes n'apparaissent pas toujours clairement.

Il serait facile de réduire les pertes en terre et en eau des cultures sur buttes et billons en les cloisonnant et surtout en les paillant. Mais, dans ce cas, on ne peut éviter la formation d'une structure lamellaire très défavorable dans les sillons et cuvettes formées.

L'effet d'un labour isohypse et surtout d'un billonnage isohypse est difficile à tester sur des parcelles d'érosion d'aussi petite dimension. Cependant, il est reconnu par de nombreux auteurs que le travail du sol suivant les courbes de niveau réduit considérablement les risques d'érosion (voir dans ce chapitre, 5. Quelques techniques antiérosives).

Tableau 23
Effet d'un billonnage cloisonné isohypse sur un sol sableux de 7 % de pente

1956 à 1958	E t/ha	R moy. %	R max. %
Ananas à plat isohypse { 1ère année	8,6 - 15,5	17	51
{ 2ème année	0,2	1	5
Ananas billonné cloisonné { 1ère année	1,6	1	2
isohypse { 2ème année	0	0,2	1

Il ne faut cependant pas oublier que la lame d'eau retenue par des billons isohypses diminue avec la pente et que, par conséquent, les risques de rupture en chaîne de billons le long des versants augmentent d'autant. Il est donc indispensable de cloisonner les billons (rétention des sables sur place) et de prévoir un écoulement des excès dans des exutoires aménagés.

4.3. Le facteur C (couvert végétal et technique culturale) dans l'équation de WISCHMEIER

Dans l'équation de WISCHMEIER (1960), le facteur C est le rapport entre l'érosion mesurée sur une jachère nue de référence et sous une culture bien précise. Il exprime l'interaction entre la plante et les techniques culturales sur la réaction à la pluie d'un type de sol. Il évolue au cours de la croissance du végétal et peut se calculer pour chacune des périodes significatives de la culture et de la région considérée (cinq aux USA et jusqu'à neuf en zone tropicale humide à deux cycles culturaux).

En ne tenant compte que d'une valeur globale annuelle, on a obtenu les valeurs suivantes en Afrique de l'Ouest (ROOSE, 1973).

Tableau 24
Influence du couvert végétal sur l'érosion en Afrique de l'Ouest

Plantes et techniques culturales	C annuel moyen
Sol nu	1
Forêt dense ou culture paillée abondamment	0,001
Savane et prairie en bon état	0,01
Savane et prairie brûlées et/ou surpâturées	0,1
Plantes de couverture à développement lent ou plantation tardive	
. 1ère année	0,3 à 0,8
. 2ème année	0,1
Plantes de couverture à développement rapide et plantation hâtive dès la 1ère année	0,01 à 0,1
Maïs, sorgho, mil (en fonction du rendement)	0,4 à 0,9
Riz en culture intensive	0,1 à 0,2
Coton, tabac (en 2d cycle)	0,5
Arachide (en fonction date de plantation)	0,4 à 0,8
Manioc (1ère année), igname (selon date de plantation)	0,2 à 0,8
Palmier, hévéa, café, cacao avec plantes de couverture	0,1 à 0,3
Ananas à plat (en fonction de la pente)	{ résidus brûlés 0,1 à 0,5 { résidus enfouis 0,1 à 0,3 { résidus en surface 0,01
pente 4 à 20 %	
Ananas sur billons cloisonnés (pente 7%)	

L'utilisation du facteur C est susceptible d'aider à la définition des techniques culturales les mieux adaptées à chaque culture et des rotations à mettre en place pour tenir compte des conditions écologiques régionales.

4.4. Conclusions sur le couvert végétal et les techniques culturales

— Quelles que soient la pente, les techniques culturales et l'agressivité climatique, un couvert végétal complet (peu importe son architecture et sa nature botanique pourvu qu'il soit complet) assure une excellente conservation de l'eau et du sol. Son influence prime celle de tous les autres facteurs. C'est donc aux méthodes biologiques favorisant ce couvert qu'il faut s'adresser en priorité pour assurer l'économie de l'eau et la conservation du sol avant de penser aux aménagements antiérosifs classiques (terrassement), lesquels sont généralement peu rentables, difficiles à entretenir et parfois même d'efficacité douteuse.

— Si le couvert est incomplet, c'est l'inclinaison de la pente qui exerce ensuite la plus grande influence sur le niveau des pertes en terre, mais pas nécessairement sur celui du ruissellement (qui dépend beaucoup plus des propriétés hydrodynamiques du sol).

— Les techniques culturales de type mécanique peuvent aider à réduire temporairement les risques d'érosion. Le travail du sol augmente l'infiltration, mais aussi la détachabilité du sol et donc son érodibilité ; cependant son influence sur l'enracinement, sur la vitesse de croissance du végétal et sur les rendements est telle qu'il peut réduire en fin de compte les pertes en terre tout au moins sur certains sols. Il n'en reste pas moins vrai qu'un effort sérieux reste à faire pour mettre au point des techniques culturales rentables réellement adaptées aux cultures et aux conditions écologiques des régions tropicales humides.

Aux États-Unis, où la mécanisation de l'agriculture a été poussée au maximum, il semble qu'on cherche maintenant à réduire le nombre de passages des engins (minimum et zero-tillage) au strict minimum pour limiter la destruction de la microstructure du sol.

En région tropicale sèche, (CHARREAU, NICOU, 1972) où l'eau manque en début de saison et où les sols sont riches en sables fins et limons (donc battants) et pauvres en matières organiques, le labour profond semble indispensable pour assurer un développement correct du système racinaire des plantes cultivées.

En région tropicale très humide, le mulching (à partir des déchets de culture) résoudrait de façon élégante les problèmes d'érosion, mais la question reste posée de savoir si l'enracinement des plantes cultivées pourra être satisfaisant alors que les pluies diluviennes tassent passablement le sol ; sinon, quel outil conviendrait pour remuer le sol sous le mulch sans trop le perturber ?

5. QUELQUES TECHNIQUES ANTIÉROSIVES

Par techniques antiérosives, il faut entendre les méthodes mises au point en vue de maîtriser les phénomènes d'érosion à l'exclusion des façons culturales qui affectent d'abord l'alimentation hydrique ou minérale des cultures (voir 4.2. le travail du sol). Il ne sera question que de deux méthodes de lutte antiérosive dont l'étude est concevable en petite parcelle expérimentale : les bandes d'arrêt et le mulch naturel ou synthétique.

5.1. Les bandes d'arrêt

L'intensification de l'exploitation agricole entraîne nécessairement une augmentation des temps de travaux, des investissements et du coût de production en général, ce qui est incompatible avec une agriculture nomade. Le paysan, en effet, doit pouvoir jouir des effets cumulatifs positifs d'une agriculture conservatrice.

La méthode des bandes d'arrêt permet de fixer un cadre cadastral à l'intérieur duquel il sera facile d'appliquer les techniques d'intensification de l'exploitation agricole tout en modifiant progressivement la topographie.

Cette méthode des bandes antiérosives consiste à alterner des champs cultivés en bandes (20 à 40 m de large) selon les courbes de niveau avec des bandes étroites (2 à 10 m) de végétation permanente herbacée (naturelle ou introduite). On peut observer, en effet, que si une prairie limite en aval un champ cultivé, le ruissellement et l'érosion provenant des cultures sont généralement bloqués en quelques mètres par le tapis graminéen.

La méthode des bandes antiérosives a été testée en parcelles d'érosion à Adiopodoumé et Bouaké en Côte d'Ivoire, ainsi qu'à Allokoto au Niger (ROOSE, BERTRAND, 1971 ; DELWAULLE, 1973). Érosion et ruissellement annuels moyens sont présentés dans le Tableau 25. On constate qu'une fois installées, les bandes densément enherbées de 0,5 à 4 m de large sont capables de réduire les pertes en terre au dixième, et le ruissellement au tiers environ des valeurs correspondantes du témoin. Pour garder une efficacité suffisante, les bandes d'arrêt doivent être d'autant plus larges que le climat est agressif, la pente plus forte, les cultures peu couvrantes et le sol plus érodible. De toute façon, il est sage de prévoir dans un premier temps des bandes de 5 à 10 m de large (efficacité moindre à l'implantation) quitte à les réduire plus tard.

Toute végétation herbacée convient pour recouvrir la bande antiérosive et en particulier celle de la jachère naturelle, mais la présence de légumineuses à enracinement pivotant et de certaines grandes graminées à enracinement profond améliore l'infiltration. On peut utiliser *Andropogon*, *Pennisetum purpurem*, *Paspalum notatum*, *Stylosanthes* en mélange, canne à sucre, etc. Éviter, par contre, les plantes qui se dispersent trop facilement dans les champs par voie de graine (à moins de faucher à temps), de rejet ou de stolon (*Cynodon*). Les plantes qui présentent un

épais feutrage de racines et de tiges freineront le mieux le ruissellement. Les arbres isolés, par contre, protègent très mal le sol contre les eaux ruisselantes. La bande d'arrêt se comporte comme une éponge et un peigne vis-à-vis des eaux de ruissellement et des terres érodées provenant du champ cultivé en amont. Les eaux de ruissellement s'infiltrent en profondeur ou sont freinées ; la baisse de leur capacité de transport et de leur compétence provoque alors le dépôt des éléments érodés les plus grossiers. D'où le maintien d'une excellente porosité et la formation d'une petite terrasse (5 à 10 cm par an) qui, à la longue, transforme le paysage en une succession de champs en pente douce et de ressauts protégés par la végétation herbacée.

Cette méthode a été testée avec succès en grandeur réelle, en station de recherche, en culture industrielle (hévée, ananas), et en culture villageoise modernisée. Elle présente de sérieux avantages :

- faible immobilisation des terres (7%) dans le cas de bandes de 2 m et sur pente de 3%,
- implantation facile (erreur admise 10%) et peu onéreuse par les intéressés,
- traitement rapide de grandes surfaces, sans intervention extérieure trop lourde,
- production fourragère des bandes pouvant servir à nourrir le bétail ou à procurer des éléments pour le paillage des champs,
- usage de ce réseau vivant de courbes de niveau pour orienter les façons culturales.

Tableau 25

Influence des bandes d'arrêt et du travail du sol suivant les courbes de niveau en zone tropicale humide et sèche
— Expérimentations en parcelles d'érosion —

Bandes d'arrêt	Largeur {	0 m	2 m	4 m	rapport efficacité																														
Adiopodoumé (1965)																																			
Pluie : 2300 mm	R%	16,5	10,3	6,0	1/1,6/2,8																														
Manioc																																			
Pente 7%	Et/ha	18,9	5,7	1,8	1/3,3/10																														
Bouaké (1965-66)																																			
Pluie : 1180mm	R%	12,6	5,1	3,8	1/2,5/3,3																														
Arachide/maïs	Et/ha/an	7,6	0,9	0,6	1/8/13																														
Pente 4%																																			
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Traitements</th> <th rowspan="2">témoin culture traditionnelle Haoussa</th> <th colspan="2">bandes d'arrêt 50cm</th> <th colspan="2">murets pierres</th> <th colspan="2">bourelets armés</th> </tr> <tr> <th>dh = 40cm</th> <th>dh = 80cm</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td></td> <td>+labour</td> <td>+billonnage</td> <td>+labour</td> <td>+billonnage</td> <td>+labour</td> <td>+billonnage</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>+binages fréquents</td> <td>+binages fréquents</td> <td>+binages fréquents</td> <td>+binages fréquents</td> <td>+binages fréquents</td> <td>+binages fréquents</td> </tr> </tbody> </table>						Traitements	témoin culture traditionnelle Haoussa	bandes d'arrêt 50cm		murets pierres		bourelets armés		dh = 40cm	dh = 80cm			+labour	+billonnage	+labour	+billonnage	+labour	+billonnage			+binages fréquents									
Traitements	témoin culture traditionnelle Haoussa	bandes d'arrêt 50cm		murets pierres				bourelets armés																											
		dh = 40cm	dh = 80cm																																
		+labour	+billonnage	+labour	+billonnage	+labour	+billonnage																												
		+binages fréquents	+binages fréquents	+binages fréquents	+binages fréquents	+binages fréquents	+binages fréquents																												
Allokoto (1966-71)																																			
Pluie : 437 mm	R%	17,6	5,2	3,8	0,9	1/3,4/4,6/20																													
Arachide, mil sorgho, coton	Et/ha	9,5	1,1	0,5	0,3	1/9/19/32																													
Pente 3%																																			

La principale difficulté réside dans le démarquage clair et définitif des bandes d'arrêt enherbées par rapport aux jachères environnantes. Dans les zones arides où l'herbe a du mal à démarrer, et là où on dispose de débris rocheux, l'efficacité de l'aménagement antiérosif sera augmenté en disposant les blocs en cordons continus dans les bandes d'arrêt (DELWAULLE, 1973).

5.2. Le mulching

Étant donné, d'une part, l'agressivité des pluies et, d'autre part, la perméabilité et la résistance naturelle des sols ferrallitiques à l'érosion hydrique, le problème principal de ces zones tropicales consiste à couvrir la terre durant la période critique des fortes pluies pour éviter la destruction de la structure de l'horizon superficiel du sol. Or, les conditions naturelles sont telles que la plupart des cultures vivrières (manioc, igname, maïs, arachide) et certaines cultures industrielles (banane, ananas, etc.) n'arrivent pas à couvrir suffisamment le sol avant la période critique des fortes pluies. C'est sous cet angle de complément temporaire à la couverture végétale qu'est envisagée l'efficacité d'un mulch de paille, de résidus de culture et d'un conditionneur de sol (Curasol) susceptible de créer une croûte souple protégeant la terre sous-jacente.

5.2.1. Le paillage

Une couverture morte (paillage, par exemple) peut remplacer avantageusement une couverture vivante en ce qui concerne l'économie de l'eau et du sol. C'est ainsi qu'une parcelle couverte de quelques centimètres de paille (4 à 6 t/ha) protège le sol aussi bien qu'une forêt dense secondaire haute d'une trentaine de mètres même en année très pluvieuse (Tableau 26).

Tableau 26

Comparaison des phénomènes d'érosion sous une forêt dense (pente 23 %) et une parcelle de bananier paillés (pente 7 %) : Adiopodoumé, basse Côte d'Ivoire

Année	Précipitation hauteur annuelle (mm)	Érosion (kg/ha/an)		Ruissellement en %	
		Paillis	Forêt	Paillis	Forêt
1960	1 897	5	13	0,47	0,58
1961	2 289	11	15	0,53	0,34

Le paillage est donc une méthode très efficace pour conserver l'eau et le sol et son usage mérite d'être vulgarisé en agriculture traditionnelle où les champs sont toujours entourés de quantités de broussailles.

5.2.2. L'utilisation des résidus de culture

En culture industrielle, par contre, il n'est pas toujours aisé de se procurer la masse des matières vertes nécessaires de façon économique. Toutefois, on peut laisser à la surface du sol le maximum de résidus de cultures pour protéger le sol entre deux cultures et même durant la culture suivante. Cette technique, dont il existe de multiples variantes, est très en vogue aux États-Unis («stubble mulching»), mais demande une adaptation des instruments pour travailler le sol sans trop déranger le mulch.

LAL (1975) propose de repousser les résidus de culture entre les lignes de plantation et de ne préparer le lit de semence pulvérisé que sur la ligne de semis. Sur des parcelles préparées de la sorte à Ibadan (Nigeria), il a observé que la vitesse d'infiltration reste maximale grâce à l'activité des vers de terre et que le ruissellement et l'érosion restent faibles quelle que soit la pente, alors que les pertes en terre croissent exponentiellement avec la pente sur les parcelles labourées voisines.

Un essai récent, mis en place en 1975 à Adiopodoumé par l'ORSTOM avec la collaboration de l'IFAC, de la SALCI et de la SOCABO montre bien le rôle des résidus de culture de l'ananas et du travail du sol dans l'économie de l'eau et du sol en fonction de la pente. Durant les trois premiers mois de plantation (qui sont aussi les mois les plus agressifs), il a plu 628 mm ($R_{USA} = 272$) et l'érosion moyenne sur trois pentes (4 - 7 - 20%) fut de 43 t/ha sur sol nu. Sous plantation d'ananas à plat en lignes perpendiculaires à la pente, les résidus de la culture précédente étant brûlés, le couvert est de l'ordre de 40 à 50% et l'érosion de 23 t/ha. Pour un traitement analogue, mais dans lequel les résidus furent enfouis, le couvert est de 45 à 55% et l'érosion de 10,5 t/ha. Enfin, si on laisse les résidus en surface (environ 12 t/ha), le couvert est total (100%) et l'érosion négligeable (0,4 t/ha, soit 1/100e du sol nu). L'érosion croît plus que proportionnellement avec la pente sur sol labouré incomplètement couvert, mais reste négligeable sur la parcelle protégée par le mulch de résidus de culture. Le ruissellement diminue également de 26% sur sol nu, à 13% sous ananas avec résidus brûlés, 4% sous ananas si résidus enfouis et 1,6% si ananas avec résidus en surface.

Le couvert des rejets d'ananas a réduit l'érosion d'un sol nu de 47%, l'enfouissement des résidus de la culture précédente de 29% supplémentaire tandis que la disposition de ces résidus à la surface du sol réduisait l'érosion à moins de 1%.

La conclusion la plus importante, c'est que, grâce à la disposition des résidus de culture à la surface du sol, on ne doit plus craindre l'érosion lorsque la pente augmente : on peut donc envisager d'abandonner la culture strictement en courbes de niveau, ce qui faciliterait la mécanisation de l'agriculture.

5.2.3. Un mulch artificiel

Les méthodes du mulching et ses variantes entraînent généralement des contraintes techniques ou économiques mal acceptées en grande culture industrielle. D'où l'idée de tester un mulch artificiel susceptible d'être facilement épandu avec du matériel de pulvérisation existant dans bon nombre d'exploitations mécanisées.

Il s'agit d'un acétate de polyvinyl*. A Adiopodoumé, ce produit a été pulvérisé juste après labour, planage et plantation, à une dose unique de 60 gr de Curasol dilué dans un litre d'eau par mètre carré de sol. Après quelques heures d'ensoleillement, ce produit laiteux et collant forme une croûte souple de 1 à 2 mm d'épaisseur qui protège le sol contre l'énergie cinétique des gouttes de pluie. On a testé ce traitement durant quatre années sur trois couples de parcelles :

- une pente de 7 % plantée en *Panicum maximum* à 40 x 40 cm ;
- une pente de 7 % en sol nu ;
- une pente de 20 % en sol nu.

Au Tableau 27, on peut constater que le Curasol a réduit considérablement les pertes en terre (réduction de 40 à 75 %) et dans une moindre mesure le ruissellement (réduction de 20 à 55 %). Son action protectrice diminue après trois mois de pluies violentes (1 200 mm) mais elle reste encore sensible au bout d'un an. Son épandage n'a pas eu d'effet significatif sur les rendements en fourrage (*Panicum*) mais il a été particulièrement efficace contre l'érosion sous ce couvert végétal.

Il n'était pas évident *a priori* que l'épandage de plastique puisse diminuer le ruissellement. L'observation sur le terrain montre que la pulvérisation sur un sol bien aéré (labour récent) forme une croûte souple qui augmente légèrement le ruissellement par rapport au témoin pendant quelques averses. Ensuite, la porosité du sol non traité diminue plus vite que celle de la parcelle protégée par le Curasol et le bilan devient favorable à l'usage de ce dernier. Celui-ci ne constitue pas un film continu imperméable mais enrobe les agrégats de la surface du sol et les rend plus résistants à l'agressivité des pluies.

Le Curasol laisse toujours place à une certaine érosion. La protection n'étant pas uniforme et continue, les eaux découvrent les points faibles de la croûte : l'énergie des gouttes de pluie y creuse des trous dans lesquels les eaux ruisselantes s'engouffrent, sapent la base des microfalaises ainsi formées et élargissent les plages attaquées par érosion régressive. Si donc un couvert végétal protège la croûte souple de plastique contre l'énergie des pluies, le film de Curasol résiste plus longtemps. Signalons enfin que le film plastique ne supporte ni l'abrasion des grains de sable transportés dans une rigole active, ni le passage d'engins mécaniques lourds (tracteurs, etc.) : l'érosion s'installe très vite aux points de rupture.

Bien que très efficace, le traitement au Curasol n'a pas suffi pour abaisser l'érosion sur sol nu au-dessous de dix tonnes de pertes en terre, valeur tolérable

* Ce produit est vendu sous le nom de Curasol par la firme Hoescht.

Tableau 27
Effet d'un mulch plastique (Curasol pulvérisé à 60 g/litre d'eau/m²) sur les phénomènes d'érosion. Adiopodoumé : cases d'érosion 1970-1974

ADIOPODOUMÉ 1970-1974			ÉROSION (t/ha et % du témoin)						RUISSLLEMENT (mm, % et % du témoin)					
Précipitations		RUSA	<i>Panicum</i> , p = 7 %		Sol nu, p = 7 %		Sol nu, p = 20 %		<i>Panicum</i> , p = 7 %		Sol nu, p = 7 %		Sol nu, p = 20 %	
h (mm)			Témoin t/ha	† Curasol % témoin	Témoin t/ha	† Curasol % témoin	Témoin t/ha	† Curasol % témoin	Témoin* mm et % de la pluie	† Curasol % témoin	Témoin mm et % de la pluie	† Curasol % témoin	Témoin mm et % de la pluie	† Curasol % témoin
5/70 à 3/71	1389	1057	89.2	25 %	150	50 %	532	27 %	368 mm 26,5 %	37 %	575 mm 41,4 %	56 %	423 mm 30,4 %	40 %
4/71 à 3/72	1816	1023	4,1	30 %	139	55 %	618	59 %	190 mm 10,5 %	77 %	562 mm 31 %	105 %	286 mm 15,8 %	149 %
4/72 à 3/73	1562	819	1,2	10 %	114	50 %	273	57 %	106 mm 6,8 %	16 %	593 mm 36,3 %	66 %	363 mm 23,2 %	55 %
4/73 à 4/74	1887	1165	15,0	34 %	191	71 %	626	40 %	146 mm 7,7 %	34 %	942 mm 49,9 %	70 %	425 mm 22,5 %	91 %
Moyenne	1664	1016	27,4	26 %	149,4	58 %	512,3	45 %	203 mm	43 %	668 mm	73 %	374 mm	79 %

* Le ruissellement observé sur les parcelles témoins est présenté sous deux formes : la lame ruisselée en mm
le coefficient de ruissellement en % de la hauteur de pluie.

G – Érosion en ravines et lutte antiérosive

ONO - Plantations d'ananas



août 1972 (cf. ORSTOM - Photos ROOSE)

sur ce genre de sol. Son prix de revient (200 000 CFA/ha en 1973 pour une dose moyenne de 60 gr/l/m²) et la grande quantité d'eau nécessaire pour l'épandre (10 m³/ha) sont des inconvénients majeurs à son utilisation courante en agriculture même intensive. Cependant, le Curasol peut jouer un rôle très efficace pour la fixation des talus de route, des canaux d'irrigation et des surfaces découpées des zones urbaines ou industrielles si on le projette en mélange avec certaines graminées herbacées et avec les engrais nécessaires à leur développement.

A titre de comparaison, on peut signaler qu'en Côte d'Ivoire il faut 200 à 250 journées de travail (à 250 CFA en 1973) pour récolter en brousse et à partir sur le champ 40 à 80 tonnes/ha de broussailles (soit environ 50 000 CFA). Si on dispose d'un champ de Guatemala grass (*Tripsacum laxum*), le travail est réduit à 150 journées pour obtenir un mulch épais. Or, des essais ont montré qu'il suffisait de 4 à 10 tonnes/ha de pailles sèches pour obtenir une protection satisfaisante contre l'érosion (MANNERING et MEYER, 1963 ; LAL, 1975) : on pourrait donc encore réduire le prix de revient de cette technique.

On pourrait conclure que la valeur conservatrice des différentes formes de mulching a été maintes fois démontrée et jamais démentie. Si son extension reste trop limitée, c'est qu'il reste à démontrer son applicabilité en milieu tropical (sur différents sols, dans divers milieux humains (problèmes des herbicides et des produits phytosanitaires), et à mettre au point des outils travaillant sans déranger le mulch, ou encore des systèmes de culture sans travail du sol dont la rentabilité aurait été éprouvée sur de longues périodes.

5.3. Le facteur P (pratiques antiérosives) dans l'équation de WISCHMEIER

Le facteur «pratique antiérosive» (P) est le rapport entre les pertes en terre sur un champ aménagé et celle d'une parcelle de taille voisine non aménagée (ou de la parcelle de référence). Les parcelles d'érosion de petite taille (100 à 200 m²) sont généralement mal adaptées à l'étude des pratiques antiérosives : il faut effectuer des comparaisons sur de petits bassins versants d'une superficie d'un hectare environ. On se bornera donc ici à mettre en parallèle les résultats acquis en Afrique de l'Ouest avec les coefficients préconisés aux USA après de nombreuses études sur petits bassins versants (WISCHMEIER, 1958 ; ROOSE et BERTRAND, 1971 ; ROOSE, 1973 ; DELWAULLE, 1973).

Les techniques antiérosives de terrassement pour la diversion ou l'absorption totale des eaux ne figurent pas dans le Tableau 28 car on en tient compte dans le facteur topographique où la longueur de pente va être réduite à la largeur des bandes cultivées entre deux fossés (ou banquettes). Il existe d'ailleurs très peu d'étude démontrant scientifiquement la réduction des pertes en terre des bassins versants après aménagement par terrassement. La plupart des études confondent les effets sur l'érosion des terrassements et ceux de l'amélioration du couvert végétal provoquée en même temps sur le même bassin versant (ROOSE, 1974 ; GOUJON, BAILLY, 1974).

Tableau 28
Le facteur «pratiques antiérosives» en Afrique de l'Ouest

	P
U.S.A.	
. labour isohypse	0,75
. labour et billonnage isohypse	0,50
. labour et bandes enherbées isohypses	0,25
Afrique de l'Ouest	
. billonnage isohypse cloisonné	0,20 à 0,10
. bandes antiérosives de 2 à 4 m de large	0,30 à 0,10
. mulch de paille	0,01
. mulch Curasol (60 gr/1/m ²)	0,50 à 0,20
. prairie temporaire ou plantes de couverture	0,50 à 0,10
. bourrelets armés ou murettes en pierres sèches (dénivelées : 80 cm + labour et binage isohypse et fertilisation équilibrée	0,10

Il faut signaler que les techniques biologiques (couverture maximum du sol grâce au semis hâtif et dense, usage d'engrais, travail correct du sol, mulch, plantes de couverture, rotation, etc.) sont bien plus efficaces que les techniques mécaniques (terrassement, divers) qui sont coûteuses à implanter et difficiles à entretenir : ces dernières sont cependant les plus développées dans les manuels de conservation du sol et préconisées la plupart du temps sans étude préalable d'adaptation (ROOSE, 1971, 1972, 1973, 1974).

5.4. Conclusions sur les méthodes de lutte antiérosive

Avant d'adopter l'une ou l'autre méthode de lutte antiérosive, il est souhaitable de revenir aux causes de l'érosion et aux facteurs qui en modifient l'expression dans les conditions écologiques où ce travail a été effectué : les collines des vieilles surfaces de l'Afrique de l'Ouest.

L'analyse des résultats disponibles dans le cadre de l'équation de prévision de l'érosion de WISCHMEIER et SMITH (1960) permet de les passer en revue et de les chiffrer (ROOSE, 1975) :

a — **L'indice d'agressivité climatique (R_{USA})** est très élevé : il croît de 200 au Nord de la Haute-Volta, à 1 400 en basse Côte d'Ivoire (voir carte). De plus, sa répartition au cours de l'année est très hétérogène : 75 % de la valeur de Rannuel sont souvent concentrés en deux ou trois mois.

— variabilité de R = 1 à 10 —

b — **La résistance à l'érosion (K)** des sols ferrallitiques (K = 0,02 à 0,18) et, dans une moindre mesure, des sols ferrugineux tropicaux cultivés (K = 0,20 à 0,30)

est bien plus satisfaisante que celle de bon nombre de sols lessivés des régions tempérées.

– variabilité de K = 1 à 12 –

- c – **Le facteur topographique** regroupe les effets de la longueur (L) et de l'inclinaison (S) de la pente.

L'influence de la longueur de la pente n'est ni constante ni très élevée ; pour des raisons pratiques, une équipe de chercheurs américains a estimé que l'érosion croît comme la racine carrée de la longueur de pente.

Par contre, l'influence de l'inclinaison de la pente est déterminante : les transports solides croissent de façon exponentielle ($e = \pm 1,4$) avec le % de pente (ZINGG, 1940) ou encore selon une équation du second degré très voisine (WISCHMEIER, SMITH : 1960).

Pour les pentes les plus courantes (0,1 à 15 %) d'une longueur de 60 m, la variabilité de SL se situe dans une gamme de 1 à 25.

- d – **La couverture du sol (C)** assurée par les végétaux (et les cailloux) a une importance qui l'emporte sur celle de tous les autres facteurs conditionnant l'érosion. En effet, quels que soient l'agressivité du climat, la pente et le type de sol, les phénomènes d'érosion seront médiocres si le sol est couvert à plus de 90 %. Noter cependant que les techniques culturales peuvent intervenir puissamment durant la phase de croissance des végétaux.

– variabilité de C = 1 à 1 000 –

- e – **Les pratiques antiérosives classiques (P)** qui tentent de limiter mécaniquement la longueur de la pente et d'augmenter l'infiltration (labour et billonnage isohypses, banquettes, terrasses et fossés de diversion, etc.) peuvent contribuer à réduire l'érosion au cas où la végétation est peu vigoureuse.

– variabilité de P = 1 à 10 –

En conclusion, dans les régions tropicales qui nous intéressent ici, les facteurs les plus importants sur lesquels on peut intervenir pour limiter l'érosion et le ruissellement sont avant tout le **développement du couvert végétal** et l'inclinaison de la pente.

Pour atteindre ce but quatre approches de type biologique semblent possibles :

- 1 – Intensification de l'agriculture sur les terres les meilleures et les moins pentues. Une attention particulière est due à la date et la densité du semis, à la fertilisation et à l'utilisation des pailles et résidus divers à la surface du sol.
- 2 – Protection des zones les plus sensibles par une couverture permanente et protégée des feux sauvages (forêt, savane, pâturage ou vergers avec plantes de couverture).
- 3 – Aménagement des ravines en vue d'évacuer les excès d'eau temporaires avec un transport solide minimum. Aménagement des voies d'accès et de leur drainage.

4 — Aménagement définitif du cadre foncier au niveau du bassin versant à l'aide de bandes antiérosives et orientation des travaux cultureux dans le sens (approximatif) perpendiculaire à la ligne de plus grande pente.

Contrairement aux aménagements antiérosifs mécaniques qui sont chers, peu rentables et difficiles à entretenir, les méthodes biologiques proposées sont bien adaptées au milieu tropical où l'herbe est abondante, où les pentes sont moyennes et où les moyens techniques et financiers sont rares. De même, si on se place au niveau de la stabilisation du régime hydrique du sol et des cours d'eau, de la protection des ouvrages routiers et hydrauliques comme de l'augmentation de la production agricole, nul doute qu'il vaille mieux **augmenter l'infiltration sur l'ensemble du territoire agricole par l'extension du couvert végétal plutôt que d'évacuer les eaux excédentaires en surface.**

6. LIMITES DE L'ÉQUATION DE WISCHMEIER et SMITH

Un nombre relativement important de mesures de l'érosion en parcelles expérimentales ont été réalisées en Afrique de l'Ouest. Elles nous permettent aujourd'hui de critiquer et de mettre en pratique l'équation de prévision de l'érosion proposée par WISCHMEIER et SMITH (1960).

Il convient de rappeler tout d'abord que cette équation vise la prévision de **l'érosion en nappe et en rigole dans les zones de plaine** à l'exclusion des zones montagneuses où domine l'énergie du ruissellement et l'érosion linéaire (ravine et rivière), et où les pluies ont des caractéristiques très différentes : elle n'aborde pas le problème du ruissellement, ni celui des transports en solution.

En second lieu, cette équation empirique étant basée sur l'analyse statistique d'un grand nombre de résultats, il importe de disposer de **nombreuses répétitions** dans l'espace et surtout dans le temps (forte variabilité climatique) pour estimer localement la valeur des différents coefficients à utiliser. En l'absence de résultats locaux, on peut cependant s'appuyer sur les tables donnant les valeurs des coefficients aux USA.

Enfin, les données provenant de parcelles ou de bassins versants de surface très limitée, il peut se poser des **problèmes d'échelle** lorsqu'il s'agit de prévoir des valeurs régionales d'érosion ou encore de transports solides sur de vastes bassins versants concernés par des aménagements hydrauliques ou par l'envasement des barrages. De plus, l'équation néglige l'aspect **qualitatif** des matériaux érodés : or, la richesse de bon nombre de sols tropicaux se trouve stockée dans les vingt premiers centimètres (surtout sous forêt), et l'érosion en nappe arrache sélectivement les colloïdes organiques et minéraux ainsi que les éléments nutritifs qui assurent la réserve chimique et hydrique du sol (ROOSE, 1967, 1968, 1973).

Ceci étant admis, il faut reconnaître non seulement l'utilité pratique de cette équation sur le terrain pour rationaliser l'aménagement de l'espace rural, mais

aussi un intérêt scientifique certain pour définir l'influence relative de chacun des facteurs en cause. Cette équation répond donc bien à sa vocation qui est de fixer les techniques antiérosives à mettre en œuvre dans chaque cas particulier de l'aménagement du territoire.

Sur le vieux continent africain, l'utilisation de l'équation de WISCHMEIER semble parfaitement souhaitable et justifiée par une masse de résultats se rapportant aux sols et aux pentes les plus couramment cultivés en Afrique de l'Ouest.

L'indice d'agressivité tient fort bien compte des interactions de la hauteur, de l'intensité et de la durée des pluies sur les transports solides ; il pourrait cependant lui être ajouté un indice d'humidité du sol exprimant l'état de ce dernier avant la pluie. Le dépouillement fastidieux de milliers de pluviogrammes a permis de présenter une première esquisse de la répartition spatiale de l'indice d'agressivité annuel moyen et de constater qu'en dehors de la frange côtière et des zones montagneuses, les pluies ont des caractéristiques (hauteur x intensité x fréquence) voisines sur de vastes régions de l'Afrique de l'Ouest. Cependant, il faut se poser la question de savoir s'il convient de fonder la lutte antiérosive sur l'agressivité moyenne des pluies ou sur les risques décennaux ou centennaux découlant des averses exceptionnelles.

La couverture du sol assurée par les végétaux (et les cailloux) a une importance qui l'emporte sur celle de tous les autres facteurs conditionnant l'érosion. L'architecture des plantes, ainsi que les techniques culturales, ne jouent qu'un rôle secondaire une fois que le sol est couvert à 90% ; cependant, les techniques culturales peuvent intervenir durant la phase de croissance des végétaux. L'indice C permet par ailleurs de sélectionner les techniques et les plantes les mieux adaptées aux conditions écologiques locales.

Contrairement à une opinion largement répandue parmi les agronomes, les sols ferrallitiques et, dans une moindre mesure, les sols ferrugineux tropicaux, surtout s'ils sont gravillonnaires, semblent moins fragiles que bon nombre des sols lessivés des régions tempérées ; c'est l'agressivité particulière des pluies tropicales qui entraîne les dégâts impressionnants que l'on observe en zone tropicale. Le nomographe proposé en 1971 par WISCHMEIER *et al.* permettant d'estimer rapidement l'indice de résistance des sols à l'érosion semble applicable, à condition toutefois de lui ajouter un coefficient modérateur tenant compte des gravillons ou débris de roches présents dans l'horizon labouré.

Enfin, il semble qu'il faille porter une attention particulière aux sols riches en argiles gonflantes, tels les vertisols et sols bruns tropicaux qui ont un comportement très spécifique.

Le facteur topographique, et en particulier la longueur de la pente, constitue certainement le point faible de cette équation puisqu'il devrait varier avec le type de sol, de texture et de couverture végétale. Mais en attendant de rassembler suffisamment de données sous pluie naturelle ou simulée, il peut être utilisé dans la plupart des cas pratiques. Notons cependant l'importance de cette réserve pour

le choix des techniques antiérosives qui font souvent appel à la limitation de la longueur de la pente.

En conséquence, les techniques antiérosives du type biologique, c'est-à-dire favorisant la couverture du sol, sont à la fois les plus efficaces, les moins onéreuses et les mieux adaptées aux conditions des plaines et plateaux largement ondulés du vieux continent africain.

En conclusion, on ne peut attribuer le terme d'universel à l'équation de WISCHMEIER et SMITH puisqu'elle ne s'applique ni aux sols à argiles gonflantes, ni aux régions montagneuses à relief jeune où l'érosion linéaire et ravinante domine, ni aux zones sahariennes et méditerranéennes où la **pluie exceptionnelle** a une importance décisive. Cependant, cette équation de prévision de l'érosion semble bien adaptée à la majorité des terrains cultivés en Afrique de l'Ouest et en particulier aux pentes moyennes à faibles, sur sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux.

ESSAI DE BILAN DES PERTES PAR ÉROSION SUPERFICIELLE

Par érosion superficielle, on entend les phénomènes de ruissellement et de migration des particules terreuses à la surface du sol à l'exclusion des migrations effectuées à l'intérieur du sol sous l'effet des eaux de drainage. Jusqu'ici, on a envisagé l'aspect quantitatif de l'érosion ; or, l'érosion n'est pas seulement un gaspillage des eaux de pluie, et un simple déplacement de matériaux, c'est aussi la destruction de la structure de l'horizon superficiel du sol (tassement et colmatage), la séparation des particules fines et grossières et l'entraînement sélectif des éléments nutritifs et des colloïdes organiques et minéraux (lixiviation et squelettisation du sol). Il semble donc important de compléter les observations quantitatives effectuées sur petites parcelles et interprétées dans le cadre plus général de l'équation de WISCHMEIER par une étude des conséquences qualitatives des phénomènes d'érosion sur l'évolution actuelle des sols étudiés.

La première démarche qui vient à l'esprit consiste à étudier les caractéristiques analytiques du sol en place après différents traitements et, si on constate une évolution, à chercher à en définir la dynamique depuis le défrichement.

Une deuxième approche s'apparente à la méthode des bilans. On établit les bilans hydriques sous différents traitements, puis on tente de définir les pertes chimiques et colloïdales par érosion (ruissellement, suspension et terres de fond).

1. EVOLUTION DU SOL EN PLACE

Lorsqu'on désire préciser l'évolution actuelle d'un sol sous l'action de différents traitements, on pense d'abord à analyser au cours du temps les caractéristiques physiques et chimiques d'échantillons de terre prélevés sur les parcelles. Or, il s'avère que cette méthode est à la fois lourde et délicate pour de nombreuses raisons :

- l'hétérogénéité du sol est élevée et exige de nombreux prélèvements et analyses ;

- il faut tenir compte des variations saisonnières et de la lenteur de l'évolution (nécessité de répétitions dans le temps) ;
- à cause de la durée des expérimentations, on s'expose à des changements de méthodes analytiques et de manipulateur : les résultats ne sont alors plus comparables ;
- les horizons fondent, d'autres se colmatent ou s'enrichissent en colluvions, si bien qu'on ne sait plus très bien à quel matériau on s'adresse (problème des profondeurs).

De plus, du fait de l'isolement des parcelles d'érosion par une bordure de tôle, certaines compensations ne se font plus dans le haut de la parcelle qui évolue alors différemment du bas.

Les résultats acquis ont été présentés dans un travail antérieur (ROOSE, 1973) : on ne reprendra ici que les conclusions principales concernant les différences observées entre le haut et le bas des parcelles, à l'intérieur de l'horizon meuble (20 cm) et, en fin d'expérience (février 1973), en fonction du couvert végétal et de l'érosion qu'elles ont subies.

Étant donné la faiblesse des variations observées en fonction des traitements et l'absence d'étude statistique de leur signification, il est difficile d'en tirer des conclusions très précises. On peut cependant constater que certains résultats analytiques moyens varient dans le même sens et suggèrent quelques conclusions logiques.

**a – Comparaison de l'horizon superficiel (10 cm) en haut et bas de pente :
Adiopodoumé 1966**

1. Sous culture et sur sol nu, on constate un décapage de l'horizon sableux humifère superficiel et une lixiviation sans compensation des éléments solubles en haut de pente. En bas de pente, on observe la sédimentation des sables grossiers dissociés des colloïdes organiques et minéraux (perte par l'exutoire), qui entraîne une dégradation de la structure, une texture plus grossière et une diminution du taux de matières organiques.
2. Sous forêt, l'énergie cinétique du ruissellement en nappe est trop faible pour déplacer les agrégats et les gros grains de sable, si bien qu'on observe actuellement un appauvrissement général en particules fines par érosion sélective, une lixiviation des solubles sans compensation en haut de pente, mais pas de colluvionnement sableux en bas de pente.

b – Évolution des propriétés physiques et chimiques à l'intérieur de l'horizon meuble (20 cm) : Adiopodoumé 1971

Quinze ans après le défrichement, le sol cultivé et labouré chaque année à la houe sur 15 à 20 cm présente encore certains caractères d'un sol forestier dont la richesse chimique est concentrée à la limite de la litière

Tableau 29

Comparaison des résultats analytiques d'échantillons moyens (sur 15 prises) de l'horizon superficiel (0-10 cm) prélevés en février 1973 sur des parcelles soumises à différents traitements (forêt, cultures fertilisées, sol nu dégradé) — Adiopodoumé, parcelles d'érosion, pente 7 % —

Adiopodoumé Cases d'érosion : horizon 0 - 10 cm	2/73 : parcelle d'érosion pente 7 %				2/1973 pente 7 % moyenne 3 parcelles	1/1958 (DABIN) pente 7 % moyenne 3 parcelles
	Forêt en place	P 5 culture protégée	P 1 culture érodée	P3 Sol nu —		
Argile 0-2 microns	9,7	9,5	11,3	13,2	11,4 *	10,3 *
Limons 2-50 microns	3,9	4,5	5,6	4,6	5,0	2,3
Sables fins 50-200 microns	25,9	28,3	28,5	30,5	29,5	34,3
Sables grossiers 200-2000 microns	58,2	56,4	52,9	50,9	54,1	53,1
Carbone C‰	18,7	12,1	12,6	7,6	10,8	8,7
Azote N‰	1,43	0,90	1,03	0,60	0,84	0,76
Acides humiques C‰	2,59	1,43	2,00	0,92	1,45	—
Acides fulviques C‰	2,72	1,36	1,51	1,52	1,46	—
Taux C humifié	28,4	23,1	28,0	32,0	27,7	—
Acides fulviques/Acides humiques	1,05	0,95	0,75	1,65	1	—
Matières organiques Mo‰	32,3	20,8	21,6	13,1	18,5	15,0
C/N	13,1	12,0	12,2	12,5	12,9	11,4
Phosphore total ‰	0,72	1,12	1,29	0,93	1,11	0,73
Phosphore assimilable Olsen‰	0,05	0,22	0,44	0,09	0,25	0,05
Ca échangeable mé/100 g	0,20	1,61	0,83	0,03	0,82	0,85
Mg " "	0,30	0,50	0,60	0,27	0,46	0,24
K " "	0,04	0,04	0,20	0,19	0,14	0,03
Na " "	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02
Somme bases échangeables S	0,56	2,16	1,64	0,51	1,43	1,14
Capacité échange bases T	4,28	3,72	3,67	3,53	3,63	—
V = S/T x 100	13 %	58 %	45 %	14 %	39 %	—
pH eau	4,25	5,60	4,95	3,95	4,85	4,20
Ca total mé/100 g	0,55	3,25	2,50	0,50	2,08	2,97
Mg " "	1,70	2,25	2,40	1,65	2,10	—
K " "	1,04	1,07	1,33	1,20	1,20	0,39
Na " "	0,34	0,34	0,67	0,48	0,50	0,96
Total bases totales	3,63	6,91	6,90	3,83	5,88	—
Densité réelle	2,59	2,62	2,62	2,64	2,63	
Densité apparente	0,99	1,45	1,49	1,55		
Porosité totale %	61,8	44,6	43,1	40,8		
Instabilité structurale I _s	1,05	0,95	0,75	1,65	1,12	
Perméabilité K Hénin cm/h	70,5	39,2	14,9	16,3	23,5	
Vitesse infiltr. au champ	120	60	—	10	40	
Var. Stock d'eau du sol sur 3 mètres mm	forêt secondaire 206	<i>Panicum</i> 157	<i>Cynodon</i> 107	Sol nu 96	Moyenne ± 120	

* Valeurs ramenées à 100 % de matière minérale.

en décomposition et de l'horizon humifère (0 à 10 cm) : les teneurs en argile et limons (0 à 50 microns) augmentent avec la profondeur (13 à 20 %) tandis que celles des éléments fertilisants diminuent : bases échangeables (de 3,1 à 1,3 mé %), azote (de 1 à 0,6‰) et phosphore assimilable (de 0,9 à 0,2‰). Les phénomènes d'appauvrissement en particules fines de la croûte superficielle du sol (0-2 cm) et la lixiviation qui l'accompagne sont bien marqués sous culture dix mois après le labour annuel.

c – Comparaison des propriétés analytiques de l'horizon superficiel (10 cm) de quatre parcelles soumises à des traitements différents (forêt, sol nu, culture) : Adiopodoumé 1973 (Tableau 29)

Si, après 17 années d'expérimentation, on compare un échantillon moyen (15 prises) de l'horizon superficiel (0-10 cm) sous forêt (pente 7 %) à des échantillons semblables de parcelles de plus en plus érodées (culture et sol nu), on constate que, lorsque l'érosion augmente :

- les teneurs en particules fines (A+L) augmentent (13,6 à 17,8 %) par suite de la fonte et du décapage de l'horizon sableux,
- les teneurs en carbone et azote décroissent (C = 18,7‰ sous forêt à 7‰ sous sol nu ; N = 1,4‰ sous forêt à 0,6‰ sous sol nu).

Le pH est acide sous forêt et sol nu (4,2 et 4), mais il s'améliore quelque peu sous culture fertilisée (5 à 5,6) parallèlement à l'accroissement de la somme des bases échangeables et du phosphore total et échangeable.

Il semble donc que, moyennant une fumure minérale appropriée, on puisse assez facilement maintenir et même améliorer quelque peu le niveau de fertilité chimique des sols forestiers défrichés. Par contre, les propriétés physiques se dégradent nettement lors de la culture après défrichement, qu'il s'agisse de la porosité, de la densité apparente, de l'eau utile ou de la vitesse d'infiltration.

Sur les Figures 5 à 7 on a tenté de représenter la dynamique des phénomènes d'appauvrissement, de décapage et de lixiviation, et donc leur vitesse d'action en fonction des traitements auxquels sont soumises quatre parcelles d'érosion depuis 1956 jusqu'en 1973.

A voir ces figures, il semble tout d'abord que les résultats analytiques évoluent de façon anarchique probablement plus en fonction du mode de prélèvement, de manipulation, d'analyse et des aléas de l'hétérogénéité naturelle du sol, que des traitements d'ailleurs trop nombreux. Cependant quelques exemples de vitesse d'évolution sont assez clairs pour être cités.

La texture (Fig. 5)

Lorsqu'en 1967 on a défriché la forêt sur la parcelle 6, l'érosion est passée brutalement de 0,1 t/ha/an à 520 t/ha/an et le taux d'argile + limons (A+L) est passé de 12-16 % à 23-25 % puis à 28 % après deux ans.

Par contre, sous culture fourragère protectrice (parcelle P₁ et P₅), le taux de A+L a diminué de 19-22 % à 12-16 % en trois ans.

Le décapage par érosion est donc très rapide sur pente forte, mais l'appauvrissement en particules fines est également un phénomène assez rapide lorsque le sol est bien couvert.

Le carbone et l'azote (Fig. 6)

— En parcelle 3, sous jachère nue, le taux de carbone a diminué de 11 à 7,3‰ de 1956 à 1960, et de 12 à 7,2‰ de 1966 à 1969.

Par contre, ce taux remonte doucement de 7,5 à 11,9‰ en quatre ans de jachère de régénération (*Digitaria*).

— Le taux de carbone de la parcelle 6, sous forêt jusqu'en 1966, diminue de 17,9‰ avant défrichement à 11,7‰ un an après le défrichement, 8,6‰ après trois ans et il se stabilise autour de 7,3‰ en 1973.

— Sous culture, l'enfouissement de 40 t/ha de fumier ne marque plus sur le taux de carbone organique un an après l'enfouissement. Par contre, l'influence du paillage d'une plante de couverture ou d'une culture fourragère fertilisée se fait sentir dès la première année.

L'évolution de l'azote est parallèle et aussi rapide que celle du carbone.

On constate donc que l'évolution du carbone et de l'azote est très rapide durant les deux premières années dans un sens comme dans l'autre, puis leurs taux se stabilisent à un nouvel équilibre. Tout se passe comme s'il existait deux types de matières organiques, l'un stable qui fixe le niveau de base (C = 7‰) en fonction des conditions écologiques des dix dernières années et l'autre très instable qui évolue d'une année à l'autre de 0 à 10% en fonction des conditions de fertilisation, de production et d'enfouissement des matières organiques.

La somme des bases échangeables (Fig. 7)

— En parcelle 6, la somme des bases échangeables s'abaisse rapidement de 0,8 mé/100 g sous forêt à 0,2 mé/100 g après quatre années de jachère nue (décapage et lixiviation).

— En parcelle 3, la somme des bases échangeables diminue de 0,9 mé/100 g en 1968 à 0,3 mé/100 g après trois années de jachère nue.

Ceci donne une estimation de la vitesse de la lixiviation des bases dans des sols sableux, à argile kaolinitique, sous climat subéquatorial.

Les propriétés physiques du sol, telles que stabilité de la structure ($I_s = 0,4$ à $1,7$), vitesse d'infiltration ($K = 70$ à 10 cm/h) et porosité totale (60 à 40%), ont toutes régressé sérieusement lors du défrichement, puis se sont stabilisées à des niveaux en relation avec le taux de matières organiques du sol.

Fig. 5 - Évolution du taux de particules fines
(argile + limons = 0-50 microns)
en fonction des cultures

- Adiopodoumé, cases d'érosion : 1956 à 1973 -

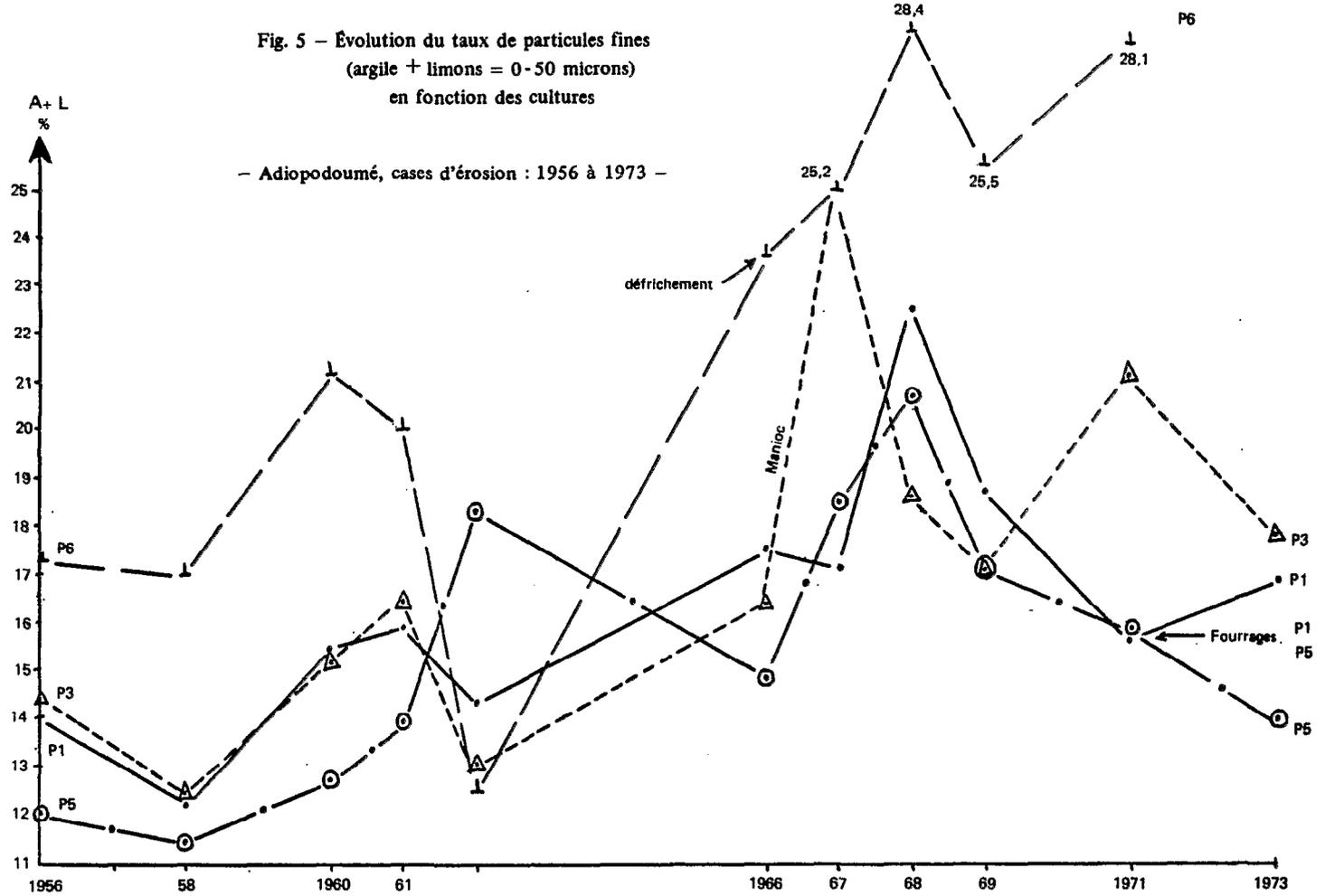


Fig. 6 – Évolution du carbone en fonction des cultures

– Adiopodoumé, cases d'érosion : 1956 à 1973 –

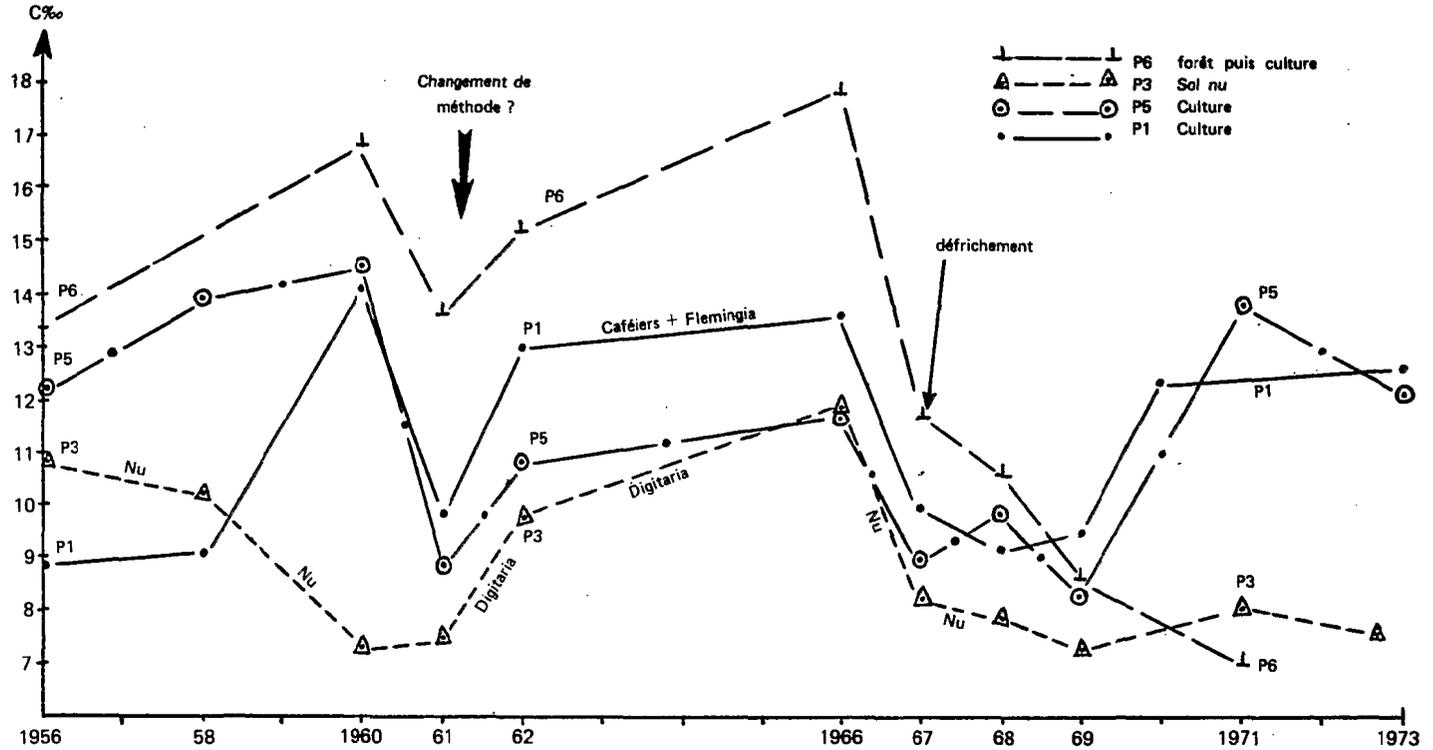
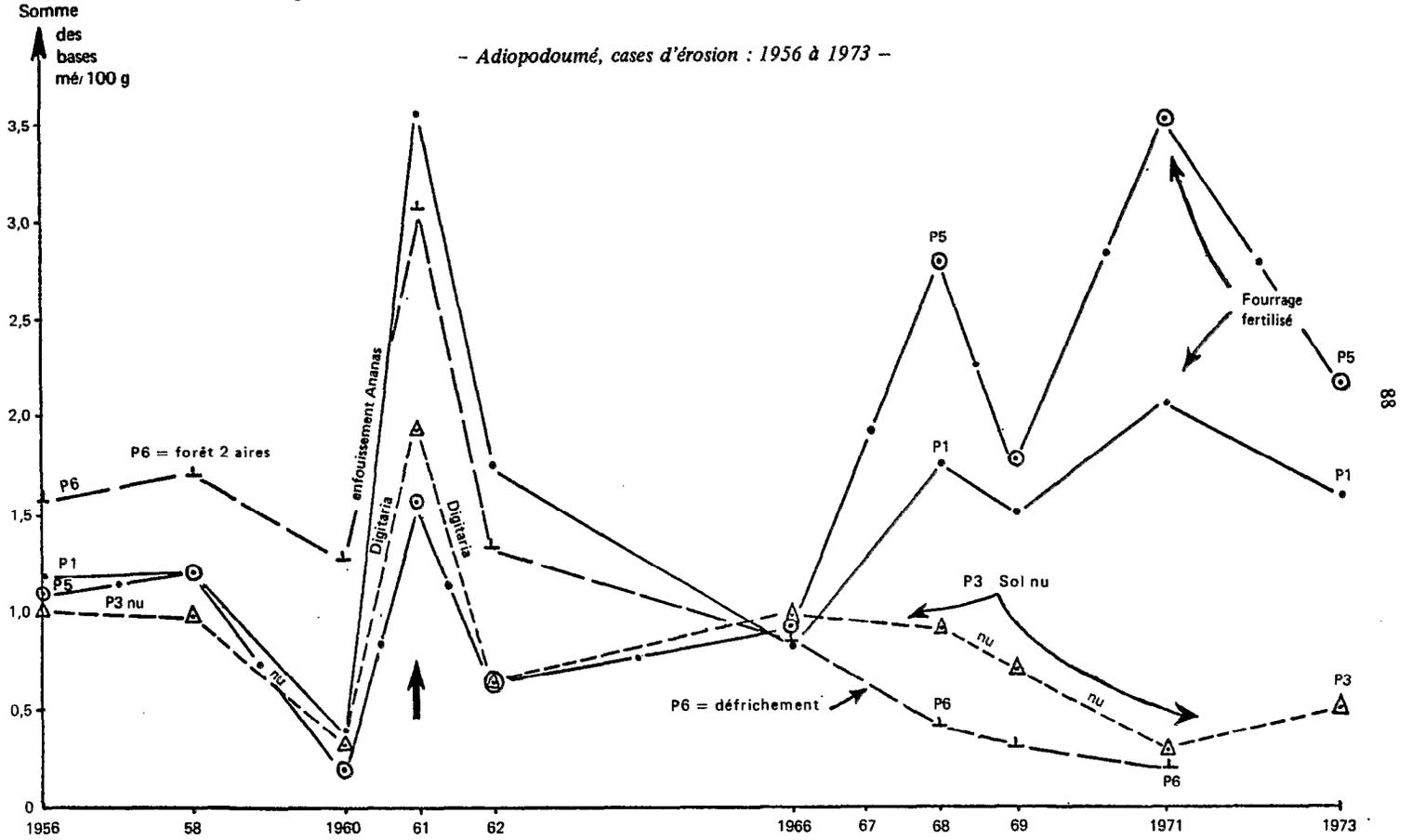


Fig. 7 – Évolution de la somme des bases échangeables (mé/100 g) en fonction des cultures

– Adiopodoumé, cases d'érosion : 1956 à 1973 –



Discussion

Cette étude de l'évolution du sol en place n'a porté que sur l'horizon superficiel (10 cm) le plus sensible puisque le plus riche en éléments nutritifs organiques et minéraux. Il serait cependant intéressant de savoir jusqu'où les phénomènes d'érosion font sentir leurs effets secondaires à l'intérieur du profil. De plus, l'érosion n'est pas seule à intervenir dans les phénomènes de migration (lixiviation des solubles, lessivage des colloïdes, remontées biologiques) mais il en sera fait abstraction dans ce paragraphe.

Malgré les imperfections de la méthode utilisée, quelques conclusions d'ensemble peuvent être tirées :

- Outre le décapage de l'horizon humifère superficiel, les phénomènes d'érosion entraînent des pertes sélectives en particules fines (moins de 50 microns) et en éléments nutritifs (lixiviation de surface).
Plus le sol est couvert et en pente douce, plus l'érosion est sélective. Plus le sol est découvert et pentu, plus l'érosion est décapante (transport des particules de toutes tailles), et plus on constate la fonte de l'horizon sableux de surface et le mélange de cet horizon avec les niveaux plus argileux du sous-sol lors du labour.
- La culture continue d'un sol forestier ne met pas nécessairement en péril sa productivité. Moyennant une fertilisation minérale suffisante pour compenser les pertes imputables au drainage, à l'érosion et à l'exploitation par les récoltes, et à condition d'utiliser des techniques culturales bien adaptées à la région, on peut augmenter le potentiel de production du sol. Il faut cependant noter que la mise en culture d'un sol entraîne nécessairement une dégradation de ses propriétés physiques et hydrodynamiques, encore que certaines cultures fourragères (jachère cultivée) pourraient contrecarrer cette tendance fâcheuse. Un gros effort devrait être fourni pour adapter à l'écologie équatoriale les techniques culturales souvent importées telles quelles des régions tempérées qui ne connaissent pas une agressivité climatique aussi redoutable.
- A Séfa (ROOSE, 1967), il avait été remarqué que le potentiel de production (rendements de cultures) des parcelles d'érosion n'avait pas baissé grâce à l'usage des engrais minéraux : le taux de carbone a diminué sur parcelle cultivée et celui des particules fines (A+L) a augmenté sur les parcelles les plus érodées.
- A Bouaké, LE BUANEC (1971) est arrivé à des conclusions semblables en ce qui concerne le niveau de fertilité chimique des sols d'un bassin versant d'une dizaine d'hectares dans la station agricole de Bouaké après dix années de culture motorisée. Des rotations d'igname, maïs, coton, riz et *Desmodium asperum* n'ont entraîné aucune dégradation du potentiel de fertilité (défini par le taux d'argile, de matières organiques, de phosphore total, le pH, la capacité d'échange de bases et la somme des bases échangeables) sur les sols ferrallitiques rajeunis de ce bassin versant. LE BUANEC note seulement une augmentation des sables dans le bas-fond (sédimentation) et une légère augmentation des matières organiques (non significative) sur les autres sols.

Le décapage de l'horizon sableux superficiel et la perte d'une certaine masse de terre ne sont pas catastrophiques par eux-mêmes ; il ne faut cependant pas oublier que ce sont les éléments les plus utiles à la fertilité qui s'en vont les premiers, laissant le sol démuné de minéraux directement assimilables pour les plantes. Un apport d'éléments nutritifs sur les sols érodés peut donc favoriser le démarrage de la végétation, laquelle peut recréer un horizon humifère et fertile en trois ou quatre années tout au moins en zone tropicale humide (Pluie > 1 200 mm). Mais, en culture extensive où l'usage des engrais minéraux est exclus, la perte de fertilité d'un sol par érosion peut se faire sentir durant de longues années. La fertilisation minérale est donc une arme très efficace pour le conservateur des eaux et des terres.

Enfin, tous les sols tropicaux ne sont pas aussi homogènes et aussi profonds que les sols ferrallitiques sur sables tertiaires. Lorsqu'une cuirasse ou une nappe gravillonnaire compacte se trouve en-dessous de 10 à 15 cm de sol arable, il faut lutter contre toute perte de substance pour éviter de diminuer encore l'épaisseur de la couche arable.

Il n'est donc pas inutile de souligner l'importance des aspects qualitatifs des phénomènes d'érosion à côté de l'aspect quantitatif généralement mieux étudié et plus facile à saisir.

2. ESSAI DE BILAN HYDRIQUE

Il n'est pas possible de calculer un bilan hydrique exact avec les données observées uniquement sur les parcelles d'érosion, mais si on dispose en outre d'une estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP) et des variations maximales du profil hydrique du sol, on peut tenter d'établir un schéma global régional. Dans ce but, on se base sur l'équation générale du bilan hydrique :

$$\text{Pluie} = \text{Ruissellement} + \text{Drainage} + \text{ETR} \pm \text{Variations du stock d'eau du sol}$$

Dans cette équation, on connaît la pluie, le ruissellement (Ruiss.) et les variations maximales du stock d'eau du sol (profil hydrique à capacité au champ moins profil hydrique en saison sèche). Si on définit le drainage comme étant l'eau infiltrée qui passe au-delà des horizons explorés par les racines, on peut évaluer le drainage à partir de l'ETP. On considère en effet que l'évapotranspiration réelle (ETR) représente la plus grande partie de l'ETP compatible avec l'eau susceptible de s'évaporer, c'est-à-dire la pluie moins le ruissellement) plus l'eau disponible du sol. Cette approximation n'est satisfaisante que pour un couvert complet et en absence de nappe d'eau superficielle.

En pratique, en saison sèche, Pluie - Ruissellement est inférieur à ETP : il n'y aura donc pas de drainage et $\text{ETR} = \text{Pluie} - \text{Ruissellement}$.

En saison des pluies, lorsque $\text{Pluie} - \text{Ruissellement} > \text{ETP}$, on sait que ETR tend vers ETP et le $\text{Drainage} = \text{Pluie} - \text{Ruissellement} - \text{ETP}$.

On additionne alors les ETR mensuels bruts et on leur ajoute les variations maximales du stock d'eau du profil exploré par les racines de la culture considérée. Par ailleurs, on somme les drainages mensuels bruts moins ces mêmes variations du stock. En effet, après la saison des pluies ETR est plus grande que la pluie utile ($P - R$) car le stock d'eau du sol s'épuise ; par contre, au début de la saison des pluies, il faut regarnir le stock d'eau du sol avant que le drainage soit possible. THORNTWAITE soustrayait systématiquement 100 millimètres du drainage calculé pour compenser les variations du stock. Ceci demande à être précisé en fonction du volume de sol exploré par les racines. D'après les études de profils hydriques effectués à Adiopodoumé et au Banco (LESPINAT, DAUDET, TALINEAU, ELGIN, HUTTEL, MARINI et ROOSE) les variations du stock d'eau du sol seraient négligeables au-delà de 150 à 350 cm de profondeur dans la région d'Abidjan en fonction de la couverture végétale. Ceci équivaldrait à des variations du stock de l'ordre de 100 mm sous sol nu, 120 mm sous culture de *Panicum* et 200 mm sous forêt dense.

Les résultats sont résumés dans le Tableau 30 pour le cas d'une forêt secondaire de la région d'Abidjan (Ruissellement = 0,5 % en saison sèche et 1 % en saison des pluies) et d'une culture fourragère couvrant bien le sol (Ruissellement = 10 % en saison sèche et 25 % en saison des pluies). A titre de comparaison, on y a joint les résultats obtenus pour une savane et une culture en zone soudano-sahélienne de la région de Ouagadougou (ROOSE, BIROT ; 1971).

Tableau 30

Résumé des schémas de bilan hydrique sous végétation naturelle et sous culture en zone tropicale humide et sèche
D'après les observations météorologiques de l'ORSTOM et de l'ASECNA

	Pluie (mm)	Ruiss. %	ETP (mm)	ETR brute %	Var.stock (mm)	ETR rectifiée %	Drainage rectifié	
							%	mm
Abidjan								
Forêt	2158	0,9	1219	52,4	200	55,9	43,2	932
Culture	2158	21,3	1219	44,9	120	50,5	28,2	608
Ouagadougou								
Savane	860	2,6	1905	71,9	160	90,5	6,9	59
Culture	860	15	1905	68,3	120	82,2	2,7	24

On constate que, lorsque le ruissellement augmente (1 à 21 %) par suite d'une diminution de la protection végétale du sol (tandis que les variations du stock d'eau du sol diminuent), l'évapotranspiration diminue relativement peu par rapport à la baisse du drainage. Dans la région d'Abidjan, il y a donc en moyenne une lame d'eau de 600 à 1000 millimètres qui s'infiltre à travers le sol au-delà de la zone exploitée par les racines : ces résultats ont été vérifiés expérimentalement en lysimètres (ROOSE, TALINEAU, 1973). On conçoit que le lessivage des colloïdes et la lixiviation

des éléments nutritifs solubles soient les moteurs de la pédogénèse actuelle de ces sols ferrallitiques fortement désaturés, acides, poreux, à capacité d'échange de bases de l'ordre de 2 à 4 mé/100 g de terre fine, en étroite relation avec la teneur en argile (kaolinite) et en matières organiques (ROOSE, 1971).

Par contre, dans la région tropicale sèche de Ouagadougou (Pluie = 860 mm), le drainage n'est plus un facteur très actif du bilan et la lixiviation des éléments nutritifs en saison des pluies est partiellement compensée par les remontées par évaporation en saison sèche.

La Figure 8 montre bien que, en année «normale», le drainage est concentré de fin mai à fin juillet avec des apparitions aléatoires en octobre et novembre : cette répartition inégale des risques de drainage ne peut qu'accentuer les phénomènes de lessivage et de lixiviation. Or, en réalité, la répartition des pluies ne suit jamais celle d'une année moyenne. Si donc on compare les schémas de bilan pour des années excédentaires (1962) et déficitaires (1967) par rapport à la normale, on constate que, là encore, les variations des précipitations exercent leur influence surtout sur le drainage (646 à 1825 mm), et relativement peu sur l'ETR, car l'excédent de pluie survient généralement en saison humide.

Tableau 31
Schéma de bilan hydrique en année exceptionnellement sèche (1967) ou humide (1962)
sous forêt dense près d'Abidjan

	Pluie (mm)	Ruissellement		ETP (mm)	ETR brut		Var. stock (mm)	ETR rect. (mm)	Drainage	
		%	(mm)		(mm)	%			%	(mm)
Sèche	1619	1%	16,1	1320	773	47,7	200	973	39,9	646
Humide	2776	1%	27,7	1107	751	27,0	200	951	65,7	1825

En conclusion, ces simples schémas de bilan hydrique ont permis de constater l'importance du drainage concentré en quelques mois de l'année, et de pressentir le rôle du lessivage et de la lixiviation dans les sols ferrallitiques de la zone tropicale humide. Or, ces schémas sont basés sur des moyennes et non sur les séquences exceptionnellement pluvieuses qui surviennent chaque année : dans la réalité ces phénomènes sont donc encore plus exacerbés.

Ces schémas montrent aussi qu'à l'échelle annuelle, une diminution des précipitations ou une augmentation du ruissellement entraînent une diminution de drainage plutôt que de l'évapotranspiration. On pourrait donc se poser la question de savoir s'il vaut mieux tolérer les inconvénients liés à un certain niveau de ruissellement ou à un fort drainage. En fait, les méthodes antiérosives qui ont le plus d'impact sur l'amélioration des rendements sont celles qui visent tout particulièrement à la conservation des eaux de pluie en début et fin de saison des pluies tout en permettant l'évacuation des excès d'eau (avec transport solide minimum) au plus fort de la saison humide.

3. PERTES CHIMIQUES ET COLLOÏDALES IMPUTABLES AUX PHÉNOMÈNES D'ÉROSION SUPERFICIELLE

Cette approche consiste à comptabiliser la totalité des éléments exportés des parcelles : l'eau et les ions en solution, les terres fines en suspension, les terres de fond et les matières organiques flottantes. C'est une méthode astreignante sur le terrain et au laboratoire, mais beaucoup plus précise et rapide, car elle permet de déceler en deux ou trois années les principales voies d'évolution actuelle des horizons superficiels d'un sol soumis à un traitement particulier. Les analyses ont été réalisées à plusieurs reprises à Adiopodoumé (DABIN, LENEUF, 1958 ; ROOSE, 1967 et 1968) et on ne rapportera ici qu'un résumé des principaux résultats observés sous forêt dense, jachère nue et culture extensive sans apport d'engrais minéral.

3.1. Résultats

Les pertes en éléments nutritifs du sol varient plus en fonction des quantités de matériaux érodés sur les parcelles qu'en fonction des conditions expérimentales (DABIN, LENEUF, 1958). On peut donc se contenter des teneurs moyennes pour évaluer les pertes par érosion. Ceci s'est avéré exact sous culture et sol nu.

Sous forêt cependant, on a constaté que, si les volumes des migrations en surface sont très faibles, les produits érodés sont généralement plus riches en carbone, azote et particules fines ; de même, il arrive que les terres érodées sur parcelles fertilisées soient plus riches en bases et phosphore. Mais ceci ne change rien au principe de la méthode et l'on ne s'appesantira pas sur le détail des pertes pluie après pluie.

Le Tableau 32 résume les pertes par érosion totale, et les proportions qui existent entre les différents éléments érodés et ceux qu'on trouve dans le sol en place (indice de sélectivité) sous forêt dense, sous culture extensive et sous sol nu à Adiopodoumé (Pluie = 2 100 mm), sur une pente de 7%.

	Érosion totale t/ha	Suspensions t/ha	Mat. organiques t/ha	Ruissellement %
Forêt dense	0,11	0,1	0,01	1
Culture extensive	32	4,8	0,2	25
Sol nu	138	12,9	0,1	30

Tableau 32

Pertes par érosion superficielle sur une pente de 7% à Adiopodoumé en fonction du couvert végétal

	Érosion totale (kg/ha/an)			Indice de sélectivité par rapport au sol en place (10 cm)		
	Forêt	Culture	Sol nu	Forêt	Culture	Sol nu
Carbone total	26,4	855,6	2 725	12,8	2,1	1,5
Azote totale	3,5	98,3	259	22,5	3,1	1,9
Phosphore total	0,5	28,5	111	6,6	1,4	1,3
CaO échangeable	3,0	49,9	113	492	18,5	9,7
MgO échangeable	2,2	29,0	45	327	14,1	5,1
K ₂ O échangeable	1,2	17,7	35	550	2,4	1,1
Na ₂ O échangeable	0,6	9,5	15	849	15,4	5,6
CaO total	3,7	57,1	139	216	8,8	5,0
MgO total	2,3	39,0	78	60	5,8	2,7
K ₂ O total	1,3	35,1	87	18	1,7	1,0
Na ₂ O total	0,6	12,6	27	49	3,2	1,6
Argile 0-2 microns	64,5	5 142	18 275	5,9	1,2	1,1
Limons 2-50 microns	33,8	2 179	7 115	7,7	2,5	1,9
Sable fin 50-200 microns	1,7	5 174	23 135	0,1	0,6	0,6
Sable grossier 200-2000	0	19 305	89 375	0	1,1	1,2
Érosion totale t/ha	0,11	32	138			
Ruissellement m ³ /ha	210	5 250	6 300			

- On observe d'abord que la somme des produits érodés est inférieure à l'érosion annoncée en bas de tableau puisqu'on n'a pas affiché les valeurs de Fe₂O₃, Al₂O₃ et SiO₂ (argiles), ni surtout celle du résidu insoluble au triacide (sables quartzueux).
- La croissance des pertes chimiques est presque parallèle à celle des pertes en terre : elle est donc fonction inverse du couvert végétal. Les concentrations en éléments nutritifs dans les substances érodées baissent quelque peu lorsque l'érosion croît, mais cette diminution est sans commune mesure avec l'augmentation des pertes en eau et en terre.
- L'érosion ayant des répercussions à court et moyen terme, il faut distinguer les éléments nutritifs directement assimilables (échangeables) de ceux inclus dans les réserves minérales.
- La migration du carbone et du phosphore se fait essentiellement sous forme solide (terre de fond et suspension). Par contre, la migration de l'azote, des bases totales et surtout des bases assimilables, se fait exclusivement en solution

sous forêt et en forte proportion en solution sous culture et sol nu. Parmi les bases le calcium serait lié aux terres de fond et le potassium aux suspensions fines.

Sous forêt, les pertes chimiques par érosion sont faibles : 26 kg de carbone, 3,5 kg d'azote, 0,5 kg de phosphore et quelques kilogrammes de bases.

Sous culture extensive non fertilisée, les pertes en éléments nutritifs sont d'autant moins négligeables que la culture protège mal le sol sous ce climat humide et très agressif : 98 kg d'azote, 29 kg de phosphore et de potasse, 57 kg de chaux et 39 kg de magnésie. S'il fallait compenser ces pertes par des apports d'engrais, il faudrait apporter 7 tonnes de fumier frais, 470 kg de sulfate d'ammoniaque, 160 kg de superphosphate, 200 kg de dolomie et 60 kg de chlorure de potasse. On comprend qu'après deux années de culture traditionnelle en basse Côte d'Ivoire le sol soit épuisé, d'autant plus qu'il faut encore ajouter les pertes par les eaux de drainage qui sont encore bien plus considérables.

Les résultats sur parcelles nues ne sont rapportés que comme limite des pertes possibles sous des parcelles très mal couvertes par la culture. Ces chiffres sont assez parlant à l'agriculteur pour le convaincre que l'érosion n'est pas seulement le déplacement d'une masse de terre plus ou moins considérable, mais qu'elle provoque aussi des pertes en éléments nutritifs pour les plantes dont il tire profit. Il a donc tout intérêt à couvrir sa terre.

3.2. Discussions

L'érosion en nappe entraîne dans les champs un décapage du sol souvent à peine perceptible à l'échelle humaine (0,1 à 10 mm par an). Mais cette forme d'érosion est pernicieuse, car elle amoindrit le potentiel de fertilité du sol resté en place en diminuant insidieusement sa réserve en éléments nutritifs et sa capacité à retenir l'eau et les cations échangeables. En effet, l'érosion entraîne des pertes sélectives en particules fines (argile, limons et matières organiques) et en éléments fertilisants, de 1,3 à 18 fois supérieures à celles auxquelles on pourrait s'attendre s'il n'y avait qu'un décapage du sol en place (Tableau 32). Cette sélectivité est extrêmement poussée sous forêt et provoque l'appauvrissement en particules fines des horizons superficiels, ainsi que la lixiviation des éléments solubles et la désaturation très poussée du sol. La sélectivité diminue lorsque l'érosion s'accroît, soit que la pente augmente, soit que le couvert s'éclaircisse. Cette sélectivité de l'érosion en nappe avait déjà été notée par DABIN et LENEUF (1958), puis par l'auteur à Adiopodoumé (1967) et à Séfa au Sénégal (1965).

A Bouaké, BERTRAND a publié en 1967 un schéma de bilan des pertes par érosion sous culture. Comme il ne tient compte que des terres de fond, son bilan est largement sous-estimé. On peut cependant retenir que les terres de fond sont riches en carbone et phosphore. Cet auteur constate qu'il y a peu de différence chimique entre les horizons superficiels des parcelles les plus érodées et une jachère herbacée voisine, mais une nette augmentation de l'indice d'insta-

bilité structurale (is passe de 0,7 à 1,7 sous culture). BERTRAND en conclut qu'une fertilisation relativement faible peut compenser les pertes chimiques, mais que le travail du sol à la houe ne peut entretenir la structure du sol.

A Agonkamey au Dahomey (VERNEY, VOLKOFF et WILLAIME, 1967 à 1969), des études semblables ont conduit à des résultats voisins.

A Gampela en Haute-Volta (BIROT *et al.*, 1969), on a mesuré sur faible pente (0,8 %) des pertes chimiques par érosion assez faibles, mais des indices de sélectivité très élevés. A Saria (Haute-Volta) (ARRIVETS, ROOSE, 1972 à 1974), les résultats obtenus vont dans le même sens.

4. CONCLUSIONS SUR L'ÉVOLUTION DU SOL SOUMIS A L'ÉROSION

L'analyse répétée de l'horizon superficiel du sol, les bilans hydriques et l'analyse systématique de tous les éléments exportés des parcelles expérimentales, concourent à formuler plusieurs conclusions concernant l'évolution actuelle du sol.

1 - Comme d'autres auteurs l'avaient déjà signalé, on a constaté une baisse rapide du taux de matières organiques (C et N) du sol après défrichement et une dégradation sensible des propriétés physiques sous culture jusqu'à un niveau déterminé par le nouvel équilibre écologique. Cependant, ces phénomènes sont réversibles dans une certaine mesure sous réserve de l'utilisation des techniques appropriées (fertilisation minérale, restitution des résidus de culture, jachère fourragère, mulching, etc.). L'amélioration du potentiel de production du sol est malheureusement limitée dans la zone tropicale humide du fait de l'importance du drainage (600 à 1 000 mm), de l'instabilité des matières organiques et de la faiblesse de la capacité d'échange de bases des sols ferrallitiques (kaolinite).

2 - Les phénomènes d'érosion en nappe provoquent non seulement un décapage de l'horizon superficiel de l'ordre de 0,1 à 10 mm par an, mais aussi un entraînement sélectif des particules fines et des éléments solubles (lixiviation superficielle). L'appauvrissement en colloïdes de l'horizon superficiel serait transmis en profondeur, soit par le labour, soit par l'activité de la mésofaune. Les voies préférentielles de migration diffèrent : le carbone et le phosphore (de même que le fer et l'alumine) sont liés aux particules érodées, tandis que l'azote et les bases échangeables s'échappent principalement en solution. Pour avoir un aperçu valable des phénomènes actuels d'érosion, on ne peut négliger l'analyse ni des eaux, ni des suspensions fines, ni des terres de fond.

3 - Le couvert végétal joue un rôle essentiel sur les phénomènes d'érosion, tant du point de vue qualitatif que quantitatif. L'érosion sera d'autant plus sélective et restreinte que le sol est bien couvert et la pente faible.

4 - Prévues initialement pour comparer l'effet de différents traitements sur l'économie de l'eau et la conservation du sol, la méthode d'étude de l'érosion sur parcelles expérimentales permet aussi une meilleure compréhension du bilan hydrique et de la dynamique actuelle du sol.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Vingt années d'étude expérimentale de l'érosion et du ruissellement ont permis d'aboutir à un certain nombre de résultats intéressants sur les plans pratiques et scientifiques.

Leur interprétation à l'aide de l'équation de WISCHMEIER a permis de faire apparaître l'importance relative de chaque facteur dans les conditions subéquatoriales de la Basse Côte d'Ivoire, et de les comparer aux résultats obtenus dans des régions très différentes d'Afrique, de Madagascar et des États-Unis d'Amérique. Certains résultats présentés dans ce mémoire doivent encore être précisés, mais on dispose dès à présent des éléments d'information nécessaires pour appliquer à l'aménagement rationnel des vieilles surfaces Ouest-africaines la formule de prévision de l'érosion qui sert de base aux USA pour la conservation de l'eau et du sol.

Les études entreprises par l'ORSTOM à Adiopodoumé dès 1956 ont bien mis l'accent sur l'importance, d'une part, de l'agressivité des pluies des zones subéquatoriales (fortes hauteurs, intensités élevées, concentration des pluies en quelques décades) et, d'autre part, de l'action protectrice du couvert végétal (variation de 1 à 1000) qui domine largement tous les autres facteurs. Ensuite interviennent l'inclinaison de la pente (var. de 1 à 25), le sol (var. de 1 à 12), les techniques culturales (var. de 1 à 10) et les pratiques antiérosives (var. de 1 à 10) lorsque le couvert végétal n'est pas suffisant.

Les graves dégâts provoqués par l'érosion en Afrique proviennent avant tout de l'agressivité particulière des pluies tropicales (2 à 6 fois plus énergétiques qu'en région tempérée) plutôt que d'une éventuelle fragilité des sols tropicaux. En effet, les sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux, surtout s'ils sont gravillonnaires, se sont avérés expérimentalement plus résistants à l'érosion que bien des sols lessivés des régions tempérées.

Il reste un gros effort à fournir pour mettre au point des techniques culturales qui tiennent compte des effets de la battance des pluies sur les propriétés physiques de la couche superficielle des sols.

La fertilisation, le labour profond et la mécanisation peuvent jouer un rôle favorable à la conservation de l'eau et du sol dans la mesure où ces techniques favorisent la croissance des plantes et l'infiltration des eaux de pluie. Cependant, le travail du sol diminue sa cohésion et le laisse généralement dénudé face à l'agressivité des pluies. Il semblerait donc judicieux d'étudier les différentes méthodes d'utilisation des résidus de culture, ainsi que les techniques de travail du sol respectant le «paillis» qui protège si efficacement les propriétés hydrodynamiques de la couche superficielle du sol et piège les matériaux solides en voie de migration.

Un esprit nouveau vient donc féconder les recherches dans le domaine de la lutte contre l'érosion. La défense et la restauration des sols ont été trop longtemps réduites à des concepts défensifs supprimant la liberté d'exploitation de certaines zones rurales trop dégradées par l'homme et l'animal. La croissance démographique et la concentration de la population le long de certains axes et l'extension des cultures d'exportation conduisent désormais à envisager les problèmes d'érosion sous l'angle agronomique d'une exploitation rationnelle et continue du milieu sans dégradation du capital «sol et eau».

Les techniques de conservation du sol et de l'eau constituent donc un complément indispensable de la fertilisation, de l'irrigation, de la sélection et de la protection sanitaire pour l'exploitation intensive et pérenne du milieu. Conservation du sol, hauts rendements et rentabilité vont désormais de pair.

Par ailleurs, dans les régions tropicales où les sols peuvent être très profonds, mais où la fertilité (assez réduite en réalité) est concentrée dans un mince horizon de surface, il faut faire intervenir les notions d'érosion qualitativement sélective. Or, la méthode qui consiste à mesurer toutes les exportations d'une parcelle expérimentale du type des cases d'érosion permet une approche bien plus rapide et plus fine de la dynamique actuelle des sols que l'analyse d'échantillons du sol en place.

Ces considérations d'ordre qualitatif doivent compléter, semble-t-il, les résultats quantitatifs classiques pour guider le planificateur qui doit décider des possibilités d'exploitation des terres.

Ces études de l'érosion sur parcelles fixes sous pluies naturelles doivent désormais être complétées par des tests au simulateur de pluie qui, par sa mobilité, permet d'étendre à des conditions très variées de sol, de couverture végétale et de techniques culturales, les observations jusqu'ici effectuées en quelques points d'Afrique.

BIBLIOGRAPHIE

- ARNOLDUS (H.M.J.) - 1975 - Soil type and erosion hazard. I.I.T.A., Ibadan, 10 p. multigr. (Communication au colloque sur la Conservation et l'Aménagement du Sol dans les tropiques humides, 30/6-4/7/75, Ibadan).
- AUBERT (G.) et SÉGALEN (P.) - 1966 - Projet de classification des sols ferrallitiques. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 4, 4, pp. 97-112.
- AVENARD (J.M.), ROOSE (E.J.) - 1972 - Quelques aspects de la dynamique actuelle sur versants en Côte d'Ivoire. ORSTOM, Centre d'Adiopodoumé, 25 p. multigr. (Communication présentée au 22e Congrès International de Géographie, Canada, août 1972).
- BEARD (J.B.) - 1966 - «A comparison of mulches for erosion control and grass establishment on light soil». *Q. Bull. Mich. St. Univ. agric. Exp. Stn*, 48, pp. 369-376.
- BERTRAND (R.) - 1967 - L'érosion hydrique. Nature et évolution des matériaux enlevés. Relation et conséquences sur le sol érodé (Station de Bouaké). *Colloque sur la Fertilité des Sols Tropicaux*, Tananarive (19-25/11/67) n° 107, pp. 1296-1301, 4 réf.
- BERTRAND (R.) - 1967 - «Étude de l'érosion hydrique et de la conservation des eaux et du sol en pays Baoulé». *Coll. sur la Fertilité des Sols Tropicaux*, Tananarive (19-25/11/67), n° 106, pp. 1281-1295, 9 réf.
- BIROT (Y.), GALABERT (J.), ROOSE (E.), ARRIVETS (J.) - 1968 - Deuxième campagne d'observations sur la station de mesure de l'érosion de Gampela : 1968. Rapport multigr. CTFT, 40 p.
- BORST (H.L.) and WOODBURN (R.) - 1940 - «Rain simulator studies of the effect of slope on erosion and runoff». *U.S. Dept. Agr. SCS-TP-36*.

- BRUNET-MORET (Y.) - 1963 - Étude générale des averses exceptionnelles en Afrique Occidentale : République de Haute-Volta. Rapport multigr., ORSTOM, Comité Inter-États d'Études Hydrauliques ; 23 p.
- BRUNET-MORET (Y.) - 1967 - «Étude générale des averses exceptionnelles en Afrique Occidentale. République de Côte d'Ivoire». Rapport ORSTOM - Comité Interafricain d'Études Hydrauliques, multigr., juin 1967, 20 p., 11 graph.
- BRYAN (R.B.) - 1968 - The development, use and efficiency of indices of soil erodibility. *Geoderma*, 2, pp. 5-26.
- CHARREAU (C.) - 1969 - «Influence des techniques culturales sur le développement du ruissellement et de l'érosion en Casamance». VIIe Congrès International du Génie Rural CNRA, Bambey, 13 p.
- CHARREAU (C.), NICOU (R.) - 1971 - L'amélioration du profil cultural dans les sols sableux et sablo-argileux de la zone tropicale sèche ouest-africaine et ses incidences agronomiques. *Agron. Trop.*, 26, 9, pp. 903-978 et 11, pp. 1183-1247.
- C.T.F.T. - 1971 - Défense et restauration des sols. Station de Gampela. Rapport annuel 1971. Haute-Volta, Ministère de l'Agriculture, de l'Élevage et des Eaux et Forêts, C.T.F.T., 1971 - 18 p. multigr.
- C.T.F.T.-H.V. - 1973 - Rapport de synthèse 1972. C.T.F.T./Minist. Agric. de Haute-Volta. Ouagadougou, 46 p. multigr.
- DABIN (B.) et LENEUF (N.) - 1958 - «Étude de l'érosion et du ruissellement en basse Côte d'Ivoire». Mai 1956-58. Rapport ORSTOM, Abidjan, 20 p. multigr.
- DELWAULLE (J.C.) - 1973 - Résultats de six années d'observations sur l'érosion au Niger. *Bois et Forêts des Tropiques*, 150, pp. 15-37.
- DULEY (F.L.), MILLER (M.F.) - 1923 - Érosion and surface runoff under different soil conditions. *Res. Bul.*, 63. Missouri Agric. Exp. Station, Columbia, 50 p.
- DULEY (F.L.) and HAYS (O.E.) - 1932 - «The effect of the degree of slope on runoff and soil erosion». *J. Agr. Res.*, 45, pp. 349-360.
- DUMAS (J.) - 1965 - Relation entre l'érodibilité des sols et leurs caractéristiques analytiques. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 3, 4, pp. 307-333.
- ELLISON (W.D.) - 1944 - «Studies of raindrop erosion». *Ag. Eng.*, 25, pp. 131-181.
- ELLISON (W.D.) - 1945 - Some effects of raindrops and surface flow on soil erosion and infiltration. *Trans. Am. Geophys. Un.*, 26, p. 415.

- EL-SWAIFY (S.A.) - 1975 - Susceptibilities of certain tropical soils to erosion by water. I.I.T.A., Ibadan, 12 p. multigr. (Colloque sur la conservation et l'aménagement du sol dans les tropiques humides, Ibadan, 30/6 au 4/7/1975).
- EPSTEIN (E.), GRANT (W.J.), STRUCHTEMEYER (R.A.) - 1966 - «Effets of stones on runoff, erosion and soil moisture». *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* (Madison), 30, 5, pp. 638-640.
- FOURNIER (F.) - 1954 - La parcelle expérimentale. Méthode d'étude expérimentale de la conservation du sol, de l'érosion et du ruissellement. Extrait du rapport de la mission O.E.C.E. «Étude des sols». Aux États Unis (T.A.38-63), ORSTOM, Bondy.
- FOURNIER (F.) - 1960 - «Climat et érosion». Presses Universitaires de France, Paris, 201 p.
- FOURNIER (F.) - 1962 - Carte du danger d'érosion en Afrique au sud du Sahara fondée sur l'agressivité climatique et la topographie. Notice explicative, CEE-CCTA, Paris avril 1962, 11 p.
- FOURNIER (F.) - 1967 - «La recherche en érosion et conservation des sols sur le continent africain». *Sols africains*, 12, 1, pp. 5-53.
- FREE (G.R.) - 1952 - Soil movement by raindrops. *Agr. Eng.*, vol. 33, 8, pp. 491-494.
- FREE (G.R.) and BAY (C.E.) - 1969 - «Tillage and slope effects on runoff and erosion». *Trans. Am. Soc. Agr. Engr.*, 12, 2, pp. 209-211, 215.
- GALABERT (J.), MILLOGO (E.) - 1973 - Indice d'érosion de la pluie en Haute-Volta. CTFT, Ouagadougou, 34 p. + annexes.
- GARDNER (W.R.) - 1975 - Water entry and movement in relation to erosion. I.I.T.A., Ibadan, 10 p. multigr. bibliogr. (Colloque sur la conservation et l'aménagement du sol dans les tropiques humides, Ibadan, 30/6-4/7/1975).
- GOUJON (P.), BAILLY (C.) - 1974 - Aménagements antiérosifs et économie de l'eau. Communication aux XIII journées de l'Hydraulique : Paris, octobre 1974 : question 3, rapport 11, 7 p.
- HEUSCH (B.) - 1969 - «L'érosion dans le bassin du Sebou : une approche quantitative». *Revue Géogr. du Maroc*, n° 15, pp. 109-128.
- HEUSCH (B.) - 1970 - L'érosion hydraulique au Maroc : son calcul et son contrôle. Rapport multigr. Dir. Eaux et Forêts du Maroc, 16 p.
- HEUSCH (B.) - 1970 - L'érosion du pré-Rif. Une étude quantitative de l'érosion hydraulique dans les collines marneuses du Pré-Rif occidental. (in : *Annales de la Recherche Forestière au Maroc*, numéro spécial, Études sur l'érosion, 1970, t. 12, Rabat, pp. 9-176).

- HEUSCH (B.) - 1971 - Estimation et contrôle de l'érosion hydraulique. *Soc. Sci. nat. phys. Maroc. C.R.*, 37, pp. 41-54.
- HUDSON (N.W.) - 1957 - Soil erosion and tobacco growing. *Rhodesia Agr. Journ.*, Vol. 54, n° 6, nov.-déc. 1957, pp. 547-555.
- HUDSON (N.W.) - 1957 - Érosion control research. Progress Report on Experiments at Henderson Research ; station : 1953-1956. *Rhodesia Agr. Journ.*, 54, pp. 297-323.
- HUDSON (N.W.), JACKSON (D.C.) - 1959 - Results achieved in the measurement of erosion and run-off in southern Rhodesia. 3rd Inter-African Soils Conference Dalaba - nov. 1959 section II - point 1, 15 p.
- HUDSON (N.W.) - 1961 - An introduction to the mechanics of soil erosion under conditions of sub-tropical rainfall. *Proceedings and transactions of the Rhodesia scientific association*. Vol. XLIX, Part. 1, 1961, pp. 15-25.
- HUDSON (N.W.) - 1963 - Rainfall intensity and erosivity. Advisory Notes, Dept of Cons. & Ext. Rhodesia, 5 p.
- HUDSON (N.W.) - 1973 - *Soil conservation*. B.T. Bastsford limited, London, 320 p.
- KALMAN (R.) - 1967 - Le facteur climatique de l'érosion dans le bassin du Sebou (Maroc). Projet Sebou, 32 p. multigr.
- KALMS (J.M.) - 1975 - Influence des techniques culturales sur l'érosion et le ruissellement en région centre de Côte d'Ivoire. IRAT, Bouaké, 9 p. multigr., (Colloque sur la conservation et l'aménagement du sol dans les tropiques humides, Ibadan, 30/6-4/7/75).
- LAL (R.) - 1975 - Role of mulching techniques in tropical soil and water management. *Technical Bull.*, 1, I.I.T.A., Ibadan, 38 p.
- LAL (R.) - 1975 - Soil management systems and erosion control. I.I.T.A., Ibadan, 7 p. multigr. (Colloque sur la conservation et l'aménagement du sol dans les tropiques humides : I.I.T.A., Ibadan, 30/6-4/7/75).
- LE BUANEC (B.) - 1972 - Dix ans de culture motorisée sur un bassin versant du Centre Côte d'Ivoire. Évolution de la fertilité et de la production. *Agron. Trop.*, 27, 11, pp. 1191 à 1211.
- LISON (L.) - 1968 - *Statistique appliquée à la biologie expérimentale. La planification de l'expérience et l'analyse des résultats*. Gauthier-Villars, Paris, 346 p. (Collection science et techniques d'aujourd'hui, sous la dir. de M.P. Lepine).
- MASSON (J.M.) - 1971 - L'érosion des sols par l'eau en climat méditerranéen. Méthode expérimentale pour l'étude des quantités de terre érodée à l'échelle du champ. Thèse Doct. Ing. Univ. Sciences et Techniques du Languedoc, CNRS, n° AO 5445, 213 p.

- MOLDENHAUER (W.C.), LOVELY (W.G.), SWANSON (N.P.) and CURRENCE (H.D.) - 1971 - Effect of row grades and tillage systems on soil and water losses. *J. Soil and Water Cons.*, 26, 5, pp. 193-195.
- NEAL (J.H.) - 1938 - «The effect of the degree of slope and rainfall characteristics on runoff and soil erosion». *Missouri Agr. Expt. Sta. Res. Bull.* 280.
- NGO-CHAN-BANG - 1967 - Méthode et appareil pour l'étude dynamique de la structure des sols. Application à divers cas agronomiques de Madagascar. *in* Colloque sur la fertilité des sols tropicaux, Tananarive du 19 au 25 nov. 1967. Com. n° 1, pp. 51-68.
- RODIER (J.), AUVRAY (C.) - 1965 - Estimation des débits de crues décennales pour les bassins versants de superficie inférieure à 200km² en Afrique Occidentale. Rapport ORSTOM-CIEH, 30 p. multigr.
- ROOSE (E.J.) - 1967 - Dix années de mesure de l'érosion et du ruissellement au Sénégal. *Agron. Trop.*, 22, 2, pp. 123-152.
- ROOSE (E.J.) - 1968 - Mesure de l'érodibilité d'un sol (facteur K) sur la parcelle de référence de Wischmeier. Deuxième projet du protocole standard et sa discussion. Note multigraphiée ORSTOM, Abidjan 4 + 6 p.
- ROOSE (E.J.) - 1968 - «Érosion en nappe et lessivage oblique dans quelques sols ferrallitiques de Côte d'Ivoire» Communication à la 6e Conf. Biennale de la WASA/ASOA, Abidjan, 8-13/4/1968, 15 p.
- ROOSE (E.), BIROT (Y.) - 1970 - Mesure de l'érosion et du lessivage oblique et vertical sous une savane arborée du plateau mossi (Gonsé - Haute-Volta). 1. Résultats des campagnes 1968-69. Rapport multigr., CTFT -ORSTOM, Abidjan, 148 p.
- ROOSE (E.) - 1971 - Note technique concernant l'érosion hydrique au Maroc. *Bull. de liaison des Ing. forestiers du Maroc*, 6, pp. 47-52.
- ROOSE (E.J.) - 1971 - Influence des modifications du milieu naturel sur l'érosion, le ruissellement, le bilan hydrique et chimique, suite à la mise en culture sous climat tropical. Synthèse des observations en Côte d'Ivoire et en Haute-Volta. Rapport multigr., ORSTOM, Abidjan, 22 p. -
- ROOSE (E.J.), BERTRAND (R.) - 1971 - Contribution à l'étude de la méthode des bandes d'arrêt pour lutter contre l'érosion hydrique en Afrique de l'Ouest. Résultats expérimentaux et observations sur le terrain. *Agron. Trop.* 26, 11, pp. 1270-1283.
- ROOSE (E.J.) - 1972 - «Contribution à l'étude de l'appauvrissement de quelques sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux situés entre Abidjan et Ouagadougou par l'utilisation de méthodes expérimentales de terrain». ORSTOM Bull.

- liaison thème A, n° 1, p. 19-41. Comm. à la journée des pédologues de l'ORSTOM, 28 sept. 1971.
- ROOSE (E.J.) - 1972 - «Comparaison des causes de l'érosion et des principes de lutte antiérosive en région tropicale humide, tropicale sèche et méditerranéenne». Comm. aux journées d'Étude du Génie Rural à Florence du 12-16/9/72, pp. 417-441.
- ROOSE (E.) - 1972 - Contribution à l'étude de la résistance à l'érosion de quelques sols tropicaux. Rapport multigr., ORSTOM, Abidjan, 11 p. Comm. au Congrès de Science du Sol de Moscou, 1974.
- ROOSE (E.J.), TALINEAU (J.C.) - 1973 - Influence du niveau de fertilisation sur le bilan des éléments nutritifs majeurs de deux plantes fourragères cultivées sur un sol sableux de basse Côte d'Ivoire. *C.R. du 10e Coll. de l'Inst. Intern. de la Potasse*, Abidjan, décembre 1973, pp. 305-320.
- ROOSE (E.J.) - 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. ORSTOM, Abidjan, 125 p. multigr. Thèse Doct. Ing., Fac. Sc: Abidjan, 1973, n° 20.
- ROOSE (E.J.) - 1973 - Natural mulch or chemical conditioner for reducing soil erosion in humid tropical areas (Symposium «Uses of and experimental methods for Chemical Soil Conditioners» at the annual meeting of the Soil Science Society of America, Las Vegas, Nevada, nov. 11-16-1973). *Soil Conditioners SSSA*, Special Publication 1975, n° 4, chap. 12.
- ROOSE (E.J.) - 1974 - Conséquences hydrologiques des aménagements antiérosifs. *In XIII Journées de l'Hydraulique*, question 3 rapport 10, 6 p.
- ROOSE (E.J.), ARRIVETS (J.) et POULAIN (J.F.) - 1974 - Étude du ruissellement, du drainage et de l'érosion sur deux sols ferrugineux de la région Centre Haute-Volta. Bilan de trois années d'observation à la station de Saria. Rapport ORSTOM-Abidjan - IRAT-Haute-Volta, 83 p. multigr.
- ROOSE (E.J.) - 1975 - Compte rendu technique de la mission ROOSE en Tunisie du 8 au 15/12/74. ORSTOM, Abidjan, 4 p. multigr.
- ROOSE (E.J.) - 1975 - Quelques techniques antiérosives appropriées aux régions tropicales. ORSTOM, Abidjan, 7 p. multigr. (Colloque sur la conservation et l'aménagement du sol dans les tropiques humides, Ibadan, 30/6-4/7/75).
- ROOSE (E.J.) - 1975 - Application de l'équation de prévision de l'érosion de Wischmeier et Smith en Afrique de l'Ouest. ORSTOM, Abidjan, 22 p. multigr. (Colloque sur la conservation et l'aménagement du sol dans les tropiques humides, Ibadan, 30/6-4/7/75).

- ROOSE (E.J.) - 1976 - «Application of the Universal Soil loss Equation in West Africa». Comm. National Erosion Conference : Purdue, 24-26/5/76, 18 p. dact., sous presse.
- SEGINER (I.), MORIN (J.), SHACHORI (A.) - s.d. - Runoff and erosion studies in a mountainous terra-rossa region in Israël. Symposium de Bari, pp. 79-92.
- SMITH (D.D.) and WISCHMEIER (N.H.) - 1957 - «Factors affecting sheet and rill erosion». *American Geophysical Union Transactions*, 38 (6), pp. 889-896.
- SMITH (D.D.) and WISCHMEIER (W.H.) - 1962 - «Rainfall erosion». *Advances in Agron.*, 14 : p. 109-148. Academic Press, Inc, New-York, p, 109-148.
- STALLING (J.H.) - 1953 - «Continuous plant cover - the key to soil and water conservation». *J. Soil and Water Cons.*, 8, pp. 63-68.
- STALTENBERG (N.L.) and WHITE (J.L.) - 1953 - «Selective loss of plant nutrients by erosion». *Proc. Soil Sci. Soc. Amer.*, 17, p. 406-410.
- SWANSON (N.P.) and DEDRICK (A.R.) - 1965 - «Protecting soil surface against water erosion with organic mulches». Annual Meeting of the Amer. Soc. of Agronomy, 31/10-5/11/65 Columbus Ohio, 10 p.
- VERNEY (R.), VOLKOFF (B.), WILLAIME (P.) - 1967 - «Étude de l'érosion sur «Terres de Barre» Comparaison sol nu - jachère arbustive - année 1965. Rapport multigr., ORSTOM, 14 p.
- VUILLAUME (G.) - 1968 - Premiers résultats d'une étude analytique du ruissellement et de l'érosion en zone sahélienne. Bassin représentatif de Kountkouzout (Niger). *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, V, n°2, pp. 33-56.
- WILLAIME (P.) - 1962 - Études pédologiques de Boukombé. ORSTOM, mission Dahomey, 76 p. multigr. + annexes.
- WILLAIME (P.) - 1965 - Érosion «normale» sur terres de barre. Rapport ORSTOM, multigr., 7 p. + annexe, 9 p.
- WISCHMEIER (W.H.), SMITH (D.D.), UHLAND (R.E.) - 1958 - Évaluation of factors in the soil loss equation. *Agron. Eng.*, 39, 8, pp. 458-462 et 474.
- WISCHMEIER (W.H.) - 1959 - A rainfall erosion index for a universal soil-loss equation. *Soil Sc. Soc. Amer. Proc.*, 23, pp. 246-249.
- WISCHMEIER (W.H.) - 1960 - Cropping management factor evaluations for a universal soil loss equation. *Soil Sc. Soc. Amer. Proc.*, 24, 4, pp. 322-326.
- WISCHMEIER (W.H.), SMITH (D.D.) - 1960 - A universal soil-loss estimating equation to guide conservation farm planning. 7th Intern. Congr. Soil Science, vol. I, pp. 418-425.

- WISCHMEIER (W.H.) - 1962 - Rainfall erosion potential. Geographic and location differences of distribution. *Agr. Eng.*, n° 43, pp. 212-215.
- WISCHMEIER (W.H.) - 1966 - «Surface runoff in relation to physical and management factors» *Proceeding, First Pan American Soil Conservation Congress, Sao Paulo, Brazil*, pp. 237-244.
- WISCHMEIER (W.H.), JOHNSON (C.B.), CROSS (B.V.) - 1971 - A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *J. of Soil and Water Conservation*, 26, 5, pp. 189-192.
- WISCHMEIER (W.H.) - 1974 - New developments in estimating water erosion. *Proc. 29th annual meeting of the Soil Conservation Soc. of Am., 11-14/8/74, Syracuse, New-York*, pp. 179-186.
- WOODRUFF (C.M.) - 1948 - Erosion in relation to rainfall, crop cover, and slope on a greenhouse plot. *Soil Sc. Proc.*, n° 12, p. 475.
- ZINGG (A.W.) - 1940 - «Degree and length of land slope as it affects soil loss and runoff». *Agr. Eng.*, 21, pp. 59-64.

OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
ET TECHNIQUE OUTRE-MER

Direction générale :

24, rue Bayard - 75008 PARIS

Service des Publications :

70-74, route d'Aulnay - 93140 BONDY

O.R.S.T.O.M. Éditeur
Dépôt légal : 3e trim. 1977
I.S.B.N. : 2-7099-0480-2