

OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE OUTRE-MER

CENTRE D'ADIPODOUME

Laboratoire de Pédologie

EROSION ET RUISSELLEMENT EN AFRIQUE DE L'OUEST

Vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales

par

ROOSE (E.J.)

Maître de Recherche en Pédologie à l'ORSTOM

SOMMAIRE

	pages
I - INTRODUCTION.	1
II - LE MILIEU.	3
III - LE DISPOSITIF ET SA PRECISION.	8
31. Approche descriptive.	8
32. Approche expérimentale.	8
IV - LES RESULTATS QUANTITATIFS ET LEUR ANALYSE.	12
41. La pluie : cause primaire de l'érosion.	13
411. La hauteur des pluies et l'humidité préalable du sol.	13
412. L'influence de l'intensité des pluies et de leur durée.	15
413. L'indice d'agressivité climatique : R	17
42. L'érodibilité du sol (K)	20
43. La pente.	23
431. L'inclinaison.	23
432. La longueur de la pente.	28
433. La forme de la pente.	28
434. Le facteur topographique : SL.	29
435. Conclusions.	29
44. Le couvert végétal et les techniques culturales.	30
441. Le couvert végétal.	30
442. Le travail du sol.	35
443. Le facteur C dans l'équation de Wischmeier.	39
444. Conclusions.	40
45. Quelques techniques antiérosives.	41
451. Les bandes d'arrêt.	41
452. Le mulching.	43
4521. Paillage.	43
4522. Mulch artificiel : Curasol.	44
453. Le facteur P dans l'équation de Wischmeier.	46
454. Conclusions.	47
46. Limites de l'équation de Wischmeier.	49
V - ESSAI DE BILAN DES PERTES PAR EROSION SUPERFICIELLE.	51
51. Evolution du sol en place.	51
52. Schéma de bilan hydrique.	56
53. Pertes chimiques et colloïdales par érosion superficielle.	58
54. Conclusions sur l'évolution du sol soumis à l'érosion.	61
VI - CONCLUSIONS GENERALES.	62
BIBLIOGRAPHIE.	64

R é s u m é

L'auteur présente une synthèse des résultats obtenus depuis une vingtaine d'années en cas d'érosion sur les sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux de l'Ouest Africain. 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 WISCHMEIER.

Les graves dégâts d'érosion constatés localement en Afrique proviennent avant tout de l'agressivité ($R = 200$ à 2000) des pluies tropicales (2 à 6 fois plus énergétiques qu'en zone tempérée) plutôt que de la fragilité légendaire 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 (var. 1 à 1000) domine largement tous les autres facteurs : d'où l'intérêt des méthodes biologiques conservatrices de l'eau et du sol. Lorsque la couverture végétale n'est pas suffisante, interviennent l'inclinaison de la pente (var. 1 à 25), l'érodibilité du sol (var. 1 à 12), les techniques culturales (var. 1 à 10) et les pratiques antiérosives classiques (var. 1 à 10).

L'analyse du sol en place, du bilan hydrique et des pertes minérales 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 se rangent au côté de celles qui permettent une exploitation intensive du milieu tout en maintenant son potentiel de fertilité.

S u m m a r y

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 colloïds.

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

I - 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'oeuvre 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 sèches, 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 des 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, c'est en avril 1956 que furent installées les six premières cases d'érosion par les pédologues DABIN et LENEUF (1952). Une septième parcelle fut montée en 1957, deux autres en 1970 et trois autres en 1975 en même temps que l'ensemble du dispositif fut adapté à l'utilisation d'un simulateur de pluie. Les expérimentations furent successivement confiées aux pédologues PERRAUD (1960-63) puis ROOSE (1964-75).

L'objet de cette note n'est pas de faire le tour 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 MITH (1960). Cette note 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 Monsieur F. LELONG, professeur de géologie à l'Université d'Orléans et de Monsieur F. FOURNIER, directeur scientifique à l'ORSTOM.

Il ne peut être question de donner ici en détail tous les résultats obtenus en cases d'érosion en Afrique de l'Ouest (Note 1) 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.

(Note 1) Il ne nous est pas paru utile de publier l'ensemble du détail des résultats : ceux-ci n'intéressent que quelques rares spécialistes qui pourraient se les procurer dans les documents multigraphiés (rapports annuels, thèse et divers...) disponibles à l'ORSTOM ou dans les différents instituts.

II - LE MILIEU.

Les parcelles d'érosion du Centre ORSTOM d'Adiopodoumé sont situées à 5°20' de latitude Nord, 4°8' longitude Ouest et 30 mètres d'altitude. Le réseau établi en Afrique de l'Ouest couvre une large gamme de latitude (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.

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 (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 (voir tableau 1). A mesure qu'on monte 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 rapportée 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 on a extrait quelques valeurs 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.

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 5 ans à Abidjan, 80 à 60 mm. chaque année et plus de 100 mm. tous les 5 ans dans les stations situées plus au Nord. Quant aux intensités (tableau 3), elles peuvent dépasser 200 mm/h pendant 5 à 10 minutes, 100 mm/h pendant 30 minutes et 80 mm/heure pendant 1 heure à Abidjan. Plus au Nord, elles atteignent rarement 100 mm/h pendant 10 minutes, 60 mm/h pendant 30 minutes et 50 mm/h pendant une heure.

Tableau 1 - Quelques informations climatiques entre Abidjan et Ouagadougou

	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 aéro	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
ETP (mm)													
Adiopodoumé	108	114	130	123	116	79	82	78	82	111	115	107	1245
Bouaké aéro	122	122	132	123	122	93	82	78	91	111	107	104	1287
Korhogo/Ferké	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 aéro	196	195	204	184	187	115	88	73	112	164	168	163	1849
Korhogo/Ferké	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													
max.+ 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 aéro	26,8	27,8	27,8	27,4	26,7	25,5	24,4	24,2	24,9	25,5	26,1	26,1	26,1
Korhogo/Ferké	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 voir GOSSE - ELDIN 1974 = Pluie 1948/73 ; ETP Turc 1956/74 ; insolation 1956/73 ; température de 1948-73
- . Bouaké asecna voir ROOSE, BERTRAND 1972 - Pluie 1948/70 ; ETP Turc 1948/74 ; insolation 1948/70
température de 1948/70
- . Korhogo/ ASECNA voir MOLINIER - 1971 - Pluie : ASECNA 1938/70 ; ETP Turc Ferké 1953/74 ; insolation Ferké 1961/70 ; Température Ferké 1961/70
- . Ouagadougou ASECNA voir ROOSE - BIROT, 1970.

Tableau 2 - Hauteur des précipitations journalières exceptionnelles en fonction de la latitude (Brunet-Moret 1963 et 67).

	Nombre d'années observées	Moyenne annuelle	Probabilité calculée					
			1 an	2 ans	5 ans	10 ans	50 ans	100 ans
Abidjan aéro	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 max en					
		5'	10'	30'	60'	180'	
Adiopodoumé	-chaque année	130 à 150	120-150	100-130	75-100	40-60	15-30
ROOSE(1973)	-exceptionnel en 7 ans	210 à 280	240-200	200-150	150-100	120-70	45
BRUNET-MORET (1963-67)							
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 max. 40 km de large entre Sassandra et le Ghana (soit 8000 km²) : les mêmes dépôts se retrouvent au Togo, Dahomey et Nigéria (= terre de barre). Il s'y développe un sol ferrallitique très désaturé appauvri modal (AUBERT, SEGALIN ; 1966), riche en sables grossiers (plus de 50 %), à profil homogène et perméable sur une grande profondeur (K = 10 à 120 cm/heure), acide, à faible capacité d'échange de cations (CEC = 1 à 5 méq/100 gr), de couleur grise en surface (matières organiques = 1 à 3 %) et brun jaune en profondeur (plus rouge en zone sèche). Leur 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 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, compacts en saison sèche et fluides en saison des pluies. Les sols bruns et les vertisols riches en argiles gonflantes réagissent différemment aux pluies : le ruissellement et l'érosion en ravine y sont très actifs une fois les fentes de dessiccation bouchées.

Tableau 4 - Caractéristiques des principales stations d'étude de l'érosion citées dans le texte.

	Nombre parcelles	Pente %	Durée études	Milieu
<u>Côte d'Ivoire</u>				
• Adiopodoumé ORSTOM	9 + 2	4-7-23	1956-75	Forêt dense humide : Pluie = 2100 mm en 4 saisons
• Bouaké ORSTOM puis IRAT	5	4	1960-74	Savane arbustive guinéenne : P = 1200 mm en 4 saisons
• Korhogo ORSTOM	3	3	1967-75	Savane arbustive dégradée : P = 1400 mm en 2 saisons
<u>Haute-Volta</u>				
• Gampela CTFT	4	0,7	1966-71	Savane arborée cultivée P = 800 mm en 2 saisons
• Gonsé ORSTOM x CTFT	1	0,5	1968-74	Savane arborée Soudano- sahélienne : P = 800 mm/ 2 saisons
• Saria ORSTOM x IRAT	4	0,7	1971-74	Savane arborée cultivée P = 830 mm / 2 saisons
<u>Dahomey</u>				
• Agonkamey ORSTOM	3	4	1964-70	Fourré dégradé cultivé P = 1200 mm / 4 saisons
<u>Sénégal</u>				
• Séfa ORSTOM puis IRAT	10	1 à 2	1954-68	Forêt claire P = 1400 mm / 2 saisons
<u>Niger</u>				
• Allokoto CTFT	4	3	1966-71	Savane arbustive sahélien- ne P = 500 mm / 2 saisons

III - LE DISPOSITIF ET SA PRECISION.

3.1. Approche descriptive.

A Adiopodoumé le dispositif comprend un pluviographe à augets CERF (rotation en 24 heures) (voir photos), permettant de mesurer la hauteur et l'intensité des pluies en 5 minutes et 6-7 puis 9 parcelles d'érosion de 90 m² de surface, de pentes égale à 4,5-7 et 23 %, longues de 15 mètres 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 sédiment et de deux cuves de 1 ou 2 m³ reliées 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 sur de grandes distances en suspension et en terre grossière rampant sur de courtes distances : l'érosion est par définition la somme des pertes solides. Pour aborder les problèmes d'érosion chimique, qui recouvre les migrations de 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 5000 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.

Etant 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 %.

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 ravinements 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.

3.2. Approche expérimentale.

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 :

- 1/ en soumettant toutes les parcelles à un même traitement,
- 2/ en organisant un plan statistique permettant d'analyser la signifiante des variances.

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

Après labour à la daba, 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 regroupés les mesures d'érosion et de ruissellement de mai à juillet (période la plus significative), le tarage des partiteurs 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 nous amène à distinguer trois groupes de parcelles :

- 1) Parcelle 7 : érosion et ruissellement faibles s'expliquent par la faible pente (4,4 %) le partiteur qui sousestime le ruissellement (-30 % pour les fortes pluies) et secondairement l'histoire peu érosive de la parcelle.
- 2) 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 sousestime les fortes pluies (-5 %), d'une erreur géométrique de surface (2,7 %) et ceci malgré une histoire peu érosive de la parcelle.
- 3) Parcelles 1 à 5 : érosion et ruissellement sont voisins et leurs variations 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 de la plante cultivée et des adventices domine tout le reste. Les exemples abondent qui le prouvent mais signalons dès ici que l'érosion sous une forêt dense secondarisée 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 qui semble n'avoir joué qu'un rôle secondaire et peu important à Adiopodoumé dans le cadre des sols ferrallitiques perméables mais très désaturés où les matières organiques dont dépend la fertilité du sol se dégradent très vite (2-3 ans).

3.2.2. 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 d'Adiopodoumé, il restait à chercher 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

TABLEAU 5.1. - Erosion et ruissellement aux 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
EROSION								
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	120	97	97	85	626	29
RUISSELLEMENT								
Mai à juillet 1966								
%	29,2	28,7	32,1	27,6	26,9	30,6	27,0	17,7
% de la moyenne	100 %	98	110	95	92	105	92	61
Tarage des partiteurs pour un débit de 50 l./min.	50/7=7,14 L/min. = 100 %	90 %	115 %	100 %	90 %	85 %	95 %	70 %
Couvert végétal du manioc mesuré le 6/7/1966	24,5 m ² /90mm ² = référence	87 %	88 %	95 %	111 %	119 % + mauvaises herbes	54 %	94 % + mauvaises herbes
Pente								
- mesurée par JEANNERET le 15/3/1972	6,3	6,28 %	6,25 %	6,31 %	6,37 %	6,16 %	23,37	4,43
Erreur sur la surface à cause de la pente				0,6 à	0,7 %		2,7 %	0,3 %
Erosion moyenne annuelle depuis 1956	en t/ha/an	34,7	36,7	46,5	22,3	6,7	0,338	1,0
Ruissellement moyen annuel depuis 1956	en %	12 %	10 %	13 %	10 %	10 %	1 %	6 %

la moindre quantité de matériel" (LISON, 1968 p. 149). Pour dissocier l'influence du précédent cultural sous maïs, on a placé donc 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 où les traitements correspondent aux trois couvertures du sol, les colonnes aux trois parcelles et les lignes à l'agressivité des pluies des 3 années successives.

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

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

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 aussi 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 § 4.1.3.).

Le ruissellement varie beaucoup moins fort que l'érosion. Il est nettement plus élevé sur sol nu que sous culture maïs du même ordre quelque 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 3 traitements ne donne aucune signification, au niveau de probabilité de 5 %, aux variations de l'érosion mais bien pour celles 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.

En conclusion, il ne faut pas chercher à interpréter à toute force la moindre différence de réaction aux pluies observées (bien souvent sans répétition) aux 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 indiquer des tendances). Pour ce faire, il nous semble recommandé 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 ($E = 138 \text{ t/ha/an}$; $R = 32 \%$), d'une même parcelle protégée par un mulch de 10 t/ha de paille ($E = 0,04 \text{ t/ha}$; $R = 0,5 \%$) et d'une parcelle voisine sous forêt secondaire ($E = 0,2 \text{ t/ha/an}$ $R = 0,6 \%$) est très parlante et parfaitement valable sans qu'il soit nécessaire de faire intervenir d'analyse statistique. Il est par ailleurs bien entendu que, lorsque les cases d'érosion sous pluies naturelles (gardées comme repaire 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 dépendent par ordre décroissant du couvert végétal, des différences même minime de l'inclinaison et de la forme de la pente, du dispositif lui-même (partiteur) et enfin du sol.

IV - LES RESULTATS QUANTITATIFS ET LEUR ANALYSE.

Les expérimentations en cases d'érosion donnent lieu à de très nombreux résultats partiels dont l'intérêt est inégal : on a recensé plus de 25.000 résultats partiels rien qu'à Adiopodoumé et plus de 400 résultats annuels en Afrique de l'Ouest. Devant une telle masse de chiffres deux positions sont possibles :

- soit on procède à une analyse statistique sur ordinateur de l'ensemble des résultats comme cela a été fait aux USA par WISCHMEIER ; cette méthode est peu adaptée aux essais réalisés en Afrique à cause du manque de répétitions.
- soit on effectue un triage des résultats partiels et on les regroupe en résultats plus globaux (moyennes annuelles) en vue de définir des ordres de grandeur, d'illustrer des tendances ou de chiffrer des mécanismes connus en d'autres lieux.

Cette méthode est critiquable sur le plan scientifique car on risque de biaiser les résultats mais ici les risques sont atténués puisqu'on s'appuie sur une analyse statistique empirique des faits naturels observés sur le terrain en d'autres lieux. En effet, l'équation de prévision de l'érosion de WISCHMEIER et SMITH (1960) est basée sur l'analyse des régressions menées sur plus de 10.000 résultats annuels observés sur parcelles et petits bassins versants

dans 45 stations de recherches des USA. Elle vise à relier les transports solides à l'importance relative des différents facteurs mesurables. Cette équation est de la forme $E = R.K.SL.C.P$. Elle signifie que l'érosion mesurée ou prévisible (E en t/ha) est une fonction multiplicative de cinq facteurs : l'érosivité du climat (R index), l'érodibilité du sol (K), un indice topographique (SL) couvrant à la fois l'inclinaison et la longueur de la pente, la couverture du sol et les techniques culturales utilisées (C) ainsi que les pratiques antiérosives classiques (P).

C'est dans cette seconde optique qu'ont été sélectionnés les résultats présentés ici afin de les situer dans un cadre plus vaste que leur lieu d'observation.

4.1. 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 lorsque la pente atteint 16 % (WOODRUFF, 1948). Sur forte pente et là où domine 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.

41.1. 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 au tableau 7 les 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 hauteur voisine (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 Panicum.

En analysant le tableau 7 de plus près, on s'aperçoit que les plus faibles ruissellements et érosions proviennent des pluies tombant après une période sèche (h 10 jours faible) et avec des intensités max. en 30 minutes (I_{max} 30') faibles (ex. le 27/3 et 31/7/72). Par contre les pertes en terre et les ruissellements les plus élevés ont 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 précipitation peu ordinaire : 726 mm en 40 jours (plus qu'à Paris en 1 an!).

TABEAU 7 - Influence de l'époque, de l'intensité maximum en 30 minutes, et des pluies de la décade précédente (= 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	P l u i e			"Ruissellement (%)"		Erosion (kg/ha)	
	h (mm)	h 10 jours	Intensité MAX 30'	Sol nu	Panicum	Sol nu	Panicum
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	53	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

Inversément, 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 ont un rôle important.

Il est intéressant d'étudier l'importance des phénomènes d'érosion en fonction des classes de hauteur de pluie. On a constaté à Adiopodoumé que durant la campagne 1965 (maïs billonné selon la pente) il n'y eut pas de ruissellement pour les pluies de moins de 15 millimètres, ni d'érosion sérieuse pour moins de 30 mm. Il a fallu au moins 30 mm pour avoir un ruissellement à chaque pluie et plus de 90 mm pour avoir à coup sûr des transports solides. Chaque parcelle caractérisée par le sol mais aussi par la couverture végétale et les façons culturales ont ainsi des seuils de déclenchement au-dessous desquels rien ne bouge (ROOSE, 1973).

On a rassemblé au tableau 8 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 qu'en observe 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 des pentes en équilibre peu stable (cas fréquent dans le bassin méditerranéen et les paysages de montagnes jeunes).

TABLEAU 8 - Danger des averses exceptionnelles : Adiopodoumé, pente 7 %.

! Date et traitement	! Pluie			! Ruissellement		! Erosion	
	" Hauteur! " mm	! R USA	" KR % " 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 manioc/buttes	" 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	
! 2-3/7/71 nu	" 142	! 94	" 52	! 14	" 19,9	! 15	
! 26/6/72 nu	" 134	! 113	" 65	! 14	" 19,8	! 17	

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 par le temps séparant 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 que sous un couvert dense, peut naître du ruissellement par saturation de la porosité du sol lors des pluies de forte hauteur mais qu'il ne s'y passe 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 %.

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

L'intensité est le caractère 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'évacuation par les pores du sol. Mais au cours d'une pluie l'énergie qu'elle développe 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 max. 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 du ruissellement par engorgement temporaire de la porosité du sol. Voilà pourquoi 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 conjuguent une grande fréquence des précipitations, un sol très humide, des pluies importantes (100 à 250 mm/24 heures) 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 2.

- En étudiant les régressions liant le ruissellement et l'érosion à l'intensité maximale de 33 pluies (Adiopodoumé 1971 et 72) 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 2 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 max. en 30 minutes comme l'une des caractéristiques de la pluie les mieux liées aux phénomènes d'érosions 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 observé souligne l'importance de l'humidité du sol quand tombe la pluie. En effet, les plus fortes intensités instantanées ont lieu durant les orages qui éclatent entre les saisons des pluies tandis que les intensités max. 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.

4.1.3. 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 c'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 (exprimée en mm/heure) durant trente minutes : $- R = E \times I_{30}$ - 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.

$E_c = 1214 + 890 \log I$ 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 somme les produits des énergies de chaque segment par leur nombre de mm, et on multiplie cette somme par l'intensité max en trente minutes. Un coefficient (1735,6) permet de passer aisément des unités anglaises aux unités décimales. Les résultats montrent qu'il existe de fortes variations de l'indice R pour les pluies d'une 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.

Pluie hauteur en mm	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	-	-

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 $I_{30 \text{ max}}$ ($I_{30 \text{ max}} = f(h)$) : par conséquent les erreurs se multiplient.

Tableau 10 - Indices d'agressivité climatique de WISCHMEIER et de FOURNIER dans quelques Stations d'Afrique.

	Dépouillement sur courtes périodes				SOURCES	Moyennes sur longues périodes				Indice FOURNIER P^2/P
	Période	Pluie Ha (mm)	Index Ra	Ra/Ha		Nombre années	Hauteur pluie annuelle	Ra/Ha retenu	RUSA annuel moyen	
<u>Côte-d'Ivoire</u>										
Abidjan (ORSTOM)	1966-73	1432	910	0,53	Roose, inédit 1975	27	2 100	0,60	12 60	2 33
Azagué (IFAC-ORSTOM)	68-73	1640	800	0,49	Roose, inédit, 75	41	1 770	0,50	8 85	81
Divo (IFCC-ORSTOM)	68-74	1400	741	0,53	Roose, Jadin, 68, 75	29	1 680	0,50	8 40	50
Bouaké (IRAT-ORSTOM)	60-72	1232	512	0,42	Roose, Bertrand, 72	60	1 160	0,45	5 20	38
Korhogo (ORSTOM)	67-74	1296	673	0,52	Roose, inédit, 75	47	1 440	0,50	7 20	68
<u>Haute-volta</u>										
Niangoloko (IRHO)	1968-72	1265	656	0,52	Galabert, Millego, 1973	23	1340	0,50	670	86
Gaoua (ASECNA)	66-72	1124	538	0,48	" " "	53	1240	0,50	620	63
Bobo-Dioulasso (ASECNA)	66-72	1142	554	0,48	" " "	58	1150	0,50	575	84
Farako-Ba (IRAT)	67-72	1083	485	0,45	" " "	-	-	-	-	-
Ouagadougou (ASECNA)	67-72	861	466	0,54	" " "	21	880	0,50	440	68
Goné (CTFT-ORSTOM)	68-73	709	345	0,49	Roose, inédit, 1975	-	-	-	-	-
Saria (IRAT-ORSTOM)	71-74	694	392	0,56	" " "	30	840	0,50	420	75
Saria (" METEO)	68-72	826	357	0,45	Galabert, Millego 73	30	840	0,50	420	75
Mopto (IRAT)	68-72	754	378	0,50	" " "	-	-	-	-	-
Fada N'Gourma (ASECNA)	66-72	857	428	0,50	" " "	48	890	0,50	445	75
Ouahigouya (ASECNA)	67-72	600	301	0,50	" " "	49	700	0,50	350	76
Dori (ASECNA)	66-72	511	261	0,51	" " "	44	540	0,50	270	62
<u>Senegal</u>										
Séfa (IRAT)	1964-68	1234	681	0,55	Charreau, Nicou, 1971	54	1310	0,50	655	148
Dambey (IRAT)	60-68	590	290	0,50	" " "	47	650	0,50	325	92
<u>Niger</u>										
Allokoto (CTFT)	66-71	437	199	0,46	Delwuelle, 1973	25	500	0,50	250	78
<u>Tchad</u>										
Deli (ORSTOM)	65-72	976	514	0,53	Audry, inédit, 1974	22	1100	0,50	550	82
<u>Coméroun</u>										
Dschang (IRAT)	68-71	1970	625	0,32	Seguy, 1971	-	-	-	-	-
<u>Madagascar</u>										
Bélandriana (CTFT)	69-70	2030	1375	0,68	CTFT ; 1971	-	-	-	-	-

En cherchant à simplifier le dépouillement, GALLABERT, MILLOGO (1972), PIOT (voir CTFT, 1974) et DELWAULLE (1973) ont trouvé une régression (2) permettant d'estimer R en fonction de la hauteur de pluie (H) et de son intensité max. 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).

$$R = 0,01572 H \times I_{30} - 1,179.$$

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 ils 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 (sur 40 km) 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 après jour les hauteurs des précipitations journalières des postes étudiés d'après cette régression, on a constaté que l'écart moyen sur 5 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 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 tabl. 10).

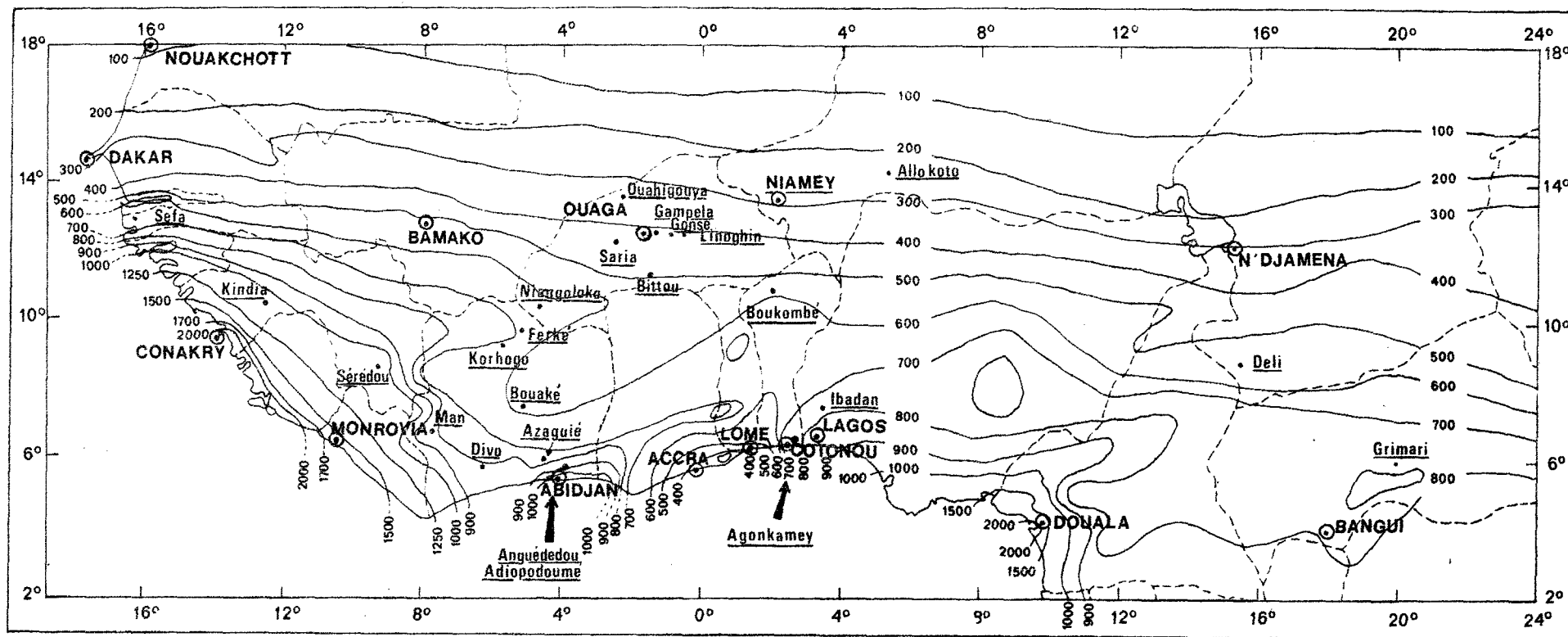
$$R_{am} / H_{am} = 0,50 \pm 0,05$$

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 météo 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 nous 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).

**ESQUISSE DE LA REPARTITION DE L'INDICE D'AGRESSIVITE CLIMATIQUE
ANNUEL MOYEN (RUSA DE WISCHMEIER) EN AFRIQUE DE L'OUEST ET DU CENTRE
SITUATION DES PARCELLES D'EROSION**



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

Dressée par ROOSE (E.J)
Maître de Recherche en Pédologie - ORSTOM - B.P 20 Abidjan

L'esquisse (ROOSE, 1975) que nous présentons ici 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 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 67) : en d'autres termes, les pluies sont de même type dans toute cette zone, à l'exception des régions côtières 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, signalons que l'indice d'agressivité climatique annuel moyen (R_{usa}) varie de :

- 5050 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, 62) a montré que sur de grands bassins versants, il y a 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 (1961-63-73) 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 ($KE_{25\text{mm}}$); il 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. Remarquons cependant 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.

En conclusion, l'énergie cinétique et l'intensité maximale pendant 30 minutes sont les paramètres climatiques qui expliquent le mieux l'érosion en nappe. Or en Afrique de l'Ouest plusieurs chercheurs ont montré qu'il y avait 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 ($R_{am}/H_{am} = 0,5 + 0,05$) 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 1000 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, leur intensité, l'énergie cinétique et si possible l'action du vent sur cette énergie.

4.2. 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 HENIN est correct sous forêt naturelle ($I_s = 0,4$ à $0,5$) mais augmente rapidement sous culture d'arachide ($I_s = 0,8$ la 1ère année, $1,2$ la seconde et $1,4$ à $1,8$ après 6 années de culture). Parallèlement l'indice de perméabilité de HENIN passe de $K = 3$ à 5 cm/heure sous forêt à $2,5$ après 2 ans et $1,8$ à $2,6$ après 6 années de culture. A titre de comparaison signalons que 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 TCHANG 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 de l'étudier au champ dans des conditions standart qui servent de référence en tous points du globe. Il s'agit d'une parcelle de $22,1$ mètres 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) se calcule à partir de la formule :

$$K = \frac{E}{R \times SL \times 2,24}$$

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 anglaises (t/acre).

Aux U.S.A., 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.

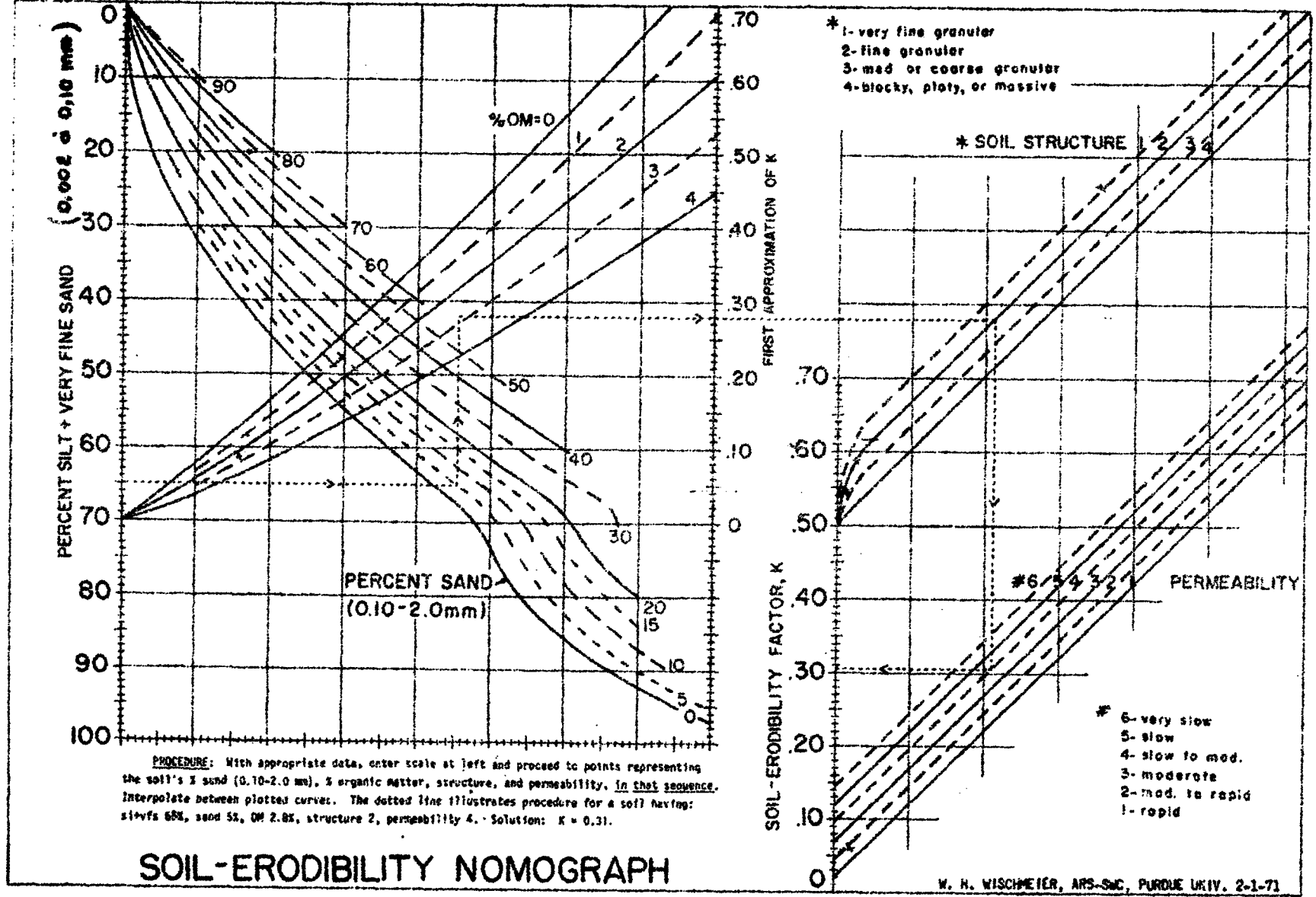
TABLEAU 11	Type de sols	K mesuré			Nombre de mesures	Source
		Max.	Min.	Retenu		
Adiopodoumé	Ferrallitique très désaturé sur sables tertiaires	0,17	0,05	0,10	24	ROOSE, 1973
Agonkamey	- " - - " -	0,11	0,03	0,10	4	VERNEY et coll. ROOSE, 73
Bouaké	Ferrallitique remanié rajeuni sur granite	0,16	0,02	0,12	4	BERTRAND 67 KALMS, 1975
Kouhogo	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	- " - à 50 cm	0,20	0,06	0,20	3	ROOSE et coll. 74
Sefa	Ferrugineux tropical lessivé à taches	0,17	0,05	0,25	2	CHARREAU, 69

Le nomographe de WISCHMEIER, JOHNSON et CROSS (1971) a permis d'évaluer la susceptibilité des sols américains à l'érosion (K) à $\pm 0,02$ près, 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 a donné les résultats suivants (ROOSE, 1972).

	K estimé
- <u>sols ferrallitiques divers</u>	- issus de sables tertiaires 0,05 - 0,10
	- issus de granites 0,10 - 0,15
	- issus de schistes 0,15 - 0,18
- <u>sols ferrugineux tropicaux divers</u>	- issus de granites 0,20 - 0,30

FIG. 2 NOMOGRAPHE PERMETTANT UNE EVALUATION RAPIDE DU FACTEUR K DE SUSCEPTIBILITE DES SOLS.

- D'après WISCHMEIER, JOHNSON et CROSS; 1971 -



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 2 à 5 ans après défrichage 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 3 ou 4 ans, les résidus de culture ayant été exportés : le travail du sol est réduit au labour et 2 ou 3 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 2 ou 3 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 la légende 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 les sols étudiés sauf pour les sols gravillonnaires ; le nomographe 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 65 ; 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 kaolinitique, 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 le choix de l'indice K d'érodibilité du sol du fait qu'il évolue au cours du temps et des périodes de l'année 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 définitif ou 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 pédologique tout au moins aux niveaux supérieurs. (ARNOLDUS, 1975).

4.3. 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 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.

4.3.1. 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). HUDSON et JACKSON (1959), soulignent le fait qu'en Afrique, 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 de 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 serait 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 %) (voir tableau 12).

TABLEAU 12 -

! Séfa (Sénégal). Cultures sarclées!	!	!	!	!
! de 1955 à 62. Sol ferrugineux	!	!	!	!
! tropical lessivé à taches et con-	! pente 1,25!	! 1,50 %!	! 2 %!	!
! créations	!	!	!	!
! Erosion moyenne (t/ha/an)	! 5	! 8,6	! 12	!
! Ruiss. moyen annuel (%)	! 16	! 22	! 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 $E = \frac{1}{100} (0,76 + 0,53 S + 0,076 S^2)$ où E s'exprime en tonne/ha et S 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.

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 72 : 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 72 (ROOSE, 1973).

TABLEAU 13	Pente %	Erosion t/ha/an			Ruissellement K_R %		
		forêt	sol nu	culture	forêt	sol nu	culture
Adiopodoumé 1956-72	4,5	-	60	19	-	35	16
Sol ferrallitique sur matériaux ar- gilo-sableux ter- tiaires	7 23	0,03 0,1	138 570	75 295	0,14 0,6	33 24	24 24
Pluie moyenne = 2100 mm	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 quadruple 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 à cause 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 : apparaissent 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 pentés 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 bucinées 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 en fonction des pentes à Adiopodoumé. Sous culture, le coefficient de ruissellement atteint 16 % sur une pente de 4,5 % et se stabilise autours 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 3ème 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 ont déjà été rapportés par HUDSON (1957) en Rhodésie où il 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) trouve 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'en suit 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 du fait même augmente encore 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 grossières. Lors d'une pluie, celles-ci vont être libérées par l'effet splash puis trainées lentement vers les parties basses. Au passage elles sont souvent happées par les pores dont elles colmatent l'orifice : 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 15 % de pente.

C'est bien ce que nous avons 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 trainées 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 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'infiltrèrent jusqu'au niveau imperméable, drainent rapidement jusqu'en bas de pente (faible pente) d'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 veut dire 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 sa porosité. Ces sols en 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, divagation des oueds, ravinements et glissement 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) trouvent une augmentation du coefficient de ruissellement en fonction des classes de pente et d'imperméabilité du substrat. Alors que nos essais se sont déroulés sur un seul type de sol en jachère nue, ces auteurs ont classés 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 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 réels reportés sur les graphiques on constate de nombreuses exceptions. Par ailleurs, plus on se rapproche de la zone forestière (où ont 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 lesquelles ils admettent que l'on y 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 absorbant vis-à-vis du ruissellement provenant des versants ou au contraire très vite saturés et donc provoquant 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 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.

4.3.2. 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 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 endroit à un autre : l'importance de l'exposant (0,1 à 0,9) est fort influencé 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 essais 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 mètres 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 inférieur 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) par rapport à celle qu'on a observé 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 désouché, les ruissellements sont voisins tandis que l'érosion sur la parcelle courte (30 mètres) est nettement plus forte ($E = 27,5$ contre 17 t/ha/an).

4.3.3. 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 si on ne veut 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.

4.3.4. 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 :

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

L est la longueur de la pente exprimée en pieds (1 pied = 0,3048 mètres) 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 mètres 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 5 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 (voir tableau 12).

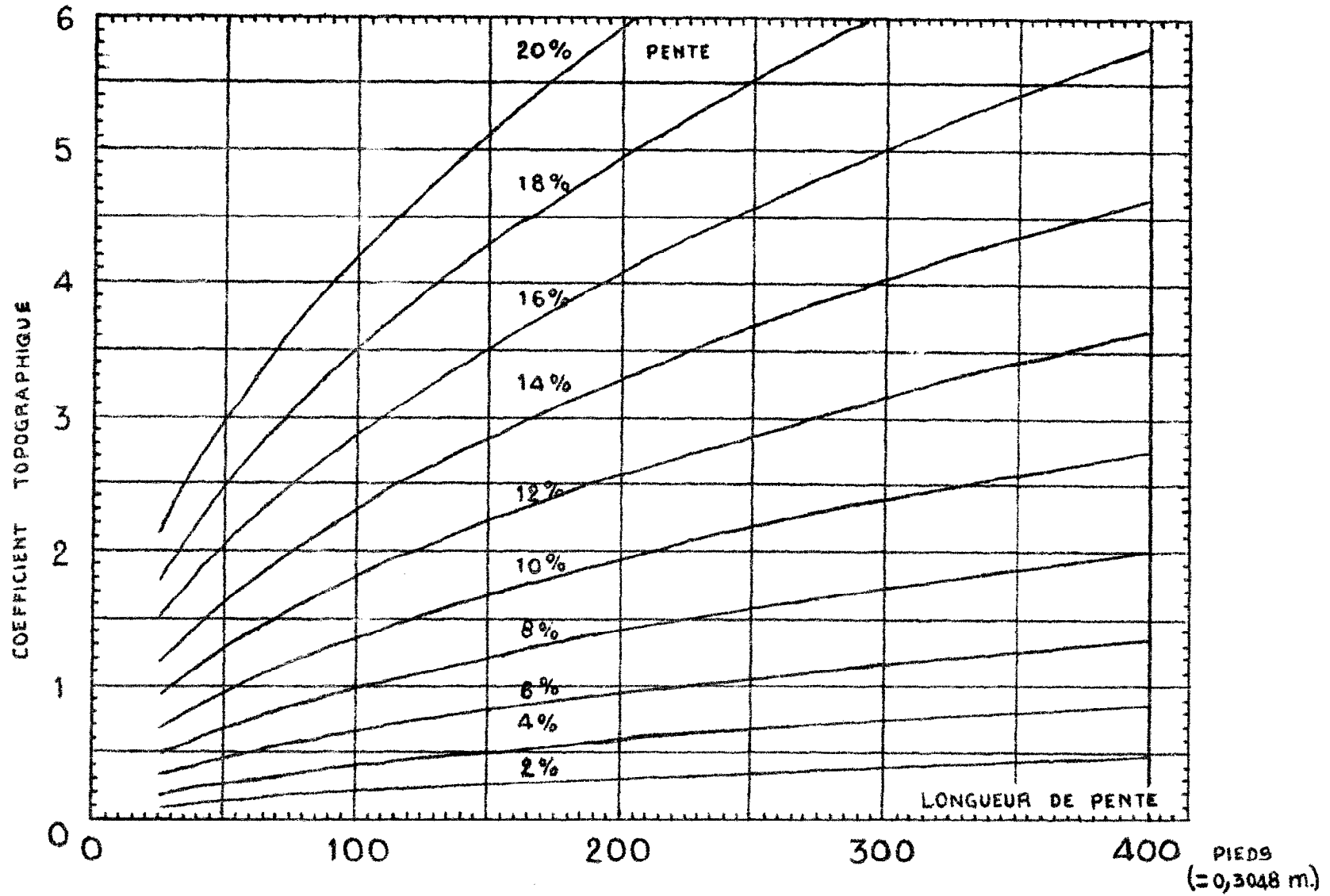
Du point de vue scientifique c'est sûrement le point faible de cette équation empirique de prévision de l'érosion car il est évident que l'érosion (et le ruissellement) évoluent de façon très différentes sur sols sableux ou argileux, en fonction des discontinuités du profil, de la couverture végétale, 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 donnent satisfaction dans bon nombre de cas pratiques sur les sols à argile dominante kaolinique.

- Diagramme facteur topographique - (fig. 3)

4.3.5. Conclusions.

Il semble qu'en moyenne l'érosion croît de façon exponentielle avec l'inclinaison de la pente et peut être avec sa longueur mais l'exposant varie considérablement suivant 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'investigation 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.

Fig. 3 Coefficient topographique.



d'après Wischmeier et Smith (1958)

Il convient de souligner ici que l'incertitude sur 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 de façon aveugle sous des climats et des sols très variés.

4.4. 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 75 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 (voir tableau 14).

4.4.1. Le couvert végétal.

Du tableau 14 se détachent 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 max. pour les averses exceptionnelles).

2/ Les sols nus ou pratiquement nus durant les mois les plus agressifs (mai à juillet). L'érosion est 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 max = 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 dépendant de la précocité et de la densité de plantation, de la pente et des techniques culturales.

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

Couvert végétal et façons culturales		Erosion annuelle t./ha extrêmes	Ruiss. annuel moyen %	Ruiss. max. %	
Forêt secondaire (pente 23,3 %)		0,01 à 0,2	0,1	0,7	6* (12)*
Sol nu*	pente { 4,5 7 20-23,3	34 à 74	60	37	71 (98)
		69 à 150	138	33	66 (87)
		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)
	Pennisetum purpureum, Guatemala grass, Panicum maximum, Cynodon dactylon, Setaria				
	- Plantation tardive, faible densité, faible développement 1ère année	23 à 89	40	20	62 (87)
	Crotalaria, Flemingia congesta Mimosa invisa, Panicum maximum, Digitaria umfolozi, Centrosema. Titonia diversifolia, Stylosanthes				
2ème année	Toutes les plantes de couverture - 2ème année.	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)
	- 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 { - à plat 7 % - butté 4,5 %	8 à 20	12	14	51
		-	1,5	9	5
		0,1 à 0,3	0,2	3	12
	-2ème année				
Manioc et igname (p = 7 %)					
	- butté 1er an	22 à 93	32	22	53 (82)
	- butté 2e an	-	2	7	24
Maïs 20 x 100 cm (p = 7 %)		(35) à 131	92	30	75 (86)
billonné dans le sens de la pente					
Arachide 20 x 40 cm (p = 7 %)		59 à 120	82	27	73 (87)
à plat					

* Le premier chiffre est maximum probable chaque année par pluie unitaire :
le 2e () = évènement exceptionnel 1/10 ans.

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 monte 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 2 à 5 mois c'est-à-dire après le gros des pluies.

Il n'en va pas de même dans les champs familiaux traditionnels où on plante souvent très tôt après quelques bonnes 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 elle peut atteindre 45°) et de l'architecture des plantes (hauteur du feuillage et disposition en gouttière concentrant ou dispersant les gouttes : voir maïs ou ananas et manioc).

Or il existe très peu d'études générales sur la dynamique du couvert et aucune technique, à notre connaissance, 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 couverte (photos verticales) du cercle circonscrit à un touffe de manioc,
- le nombre et la surface des feuilles du maïs,
- les surfaces géométriques simples couvertes ou au contraire laissées dénudées entre les lignes de Stylosanthes et d'arachides âgées 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 "fish eye".

TABLEAU 15 - Couvert végétal en fonction du temps de croissance.

Culture			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	
Panicum maximum	1970-72	" 90	100	100	100	
Cynodon aethiopicus	1970-72	" 80	95	95	95	
Stylosanthes guyanensis	1970-72	" 60	90	95	95	
Ananas (rejet)	1975	" 35 %	45 %	55 %	75	

Au tableau 15 et à la figure 4 on voit 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 2 mois de retard.

L'influence de l'architecture des plantes n'est pas toujours négligeable. Si on observe de près l'érosion au 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 bien 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 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. Evolution du couvert végétal de différentes cultures au cours de l'année.

— Adiopodoumé, cases d'érosion 1966 à 1975 —

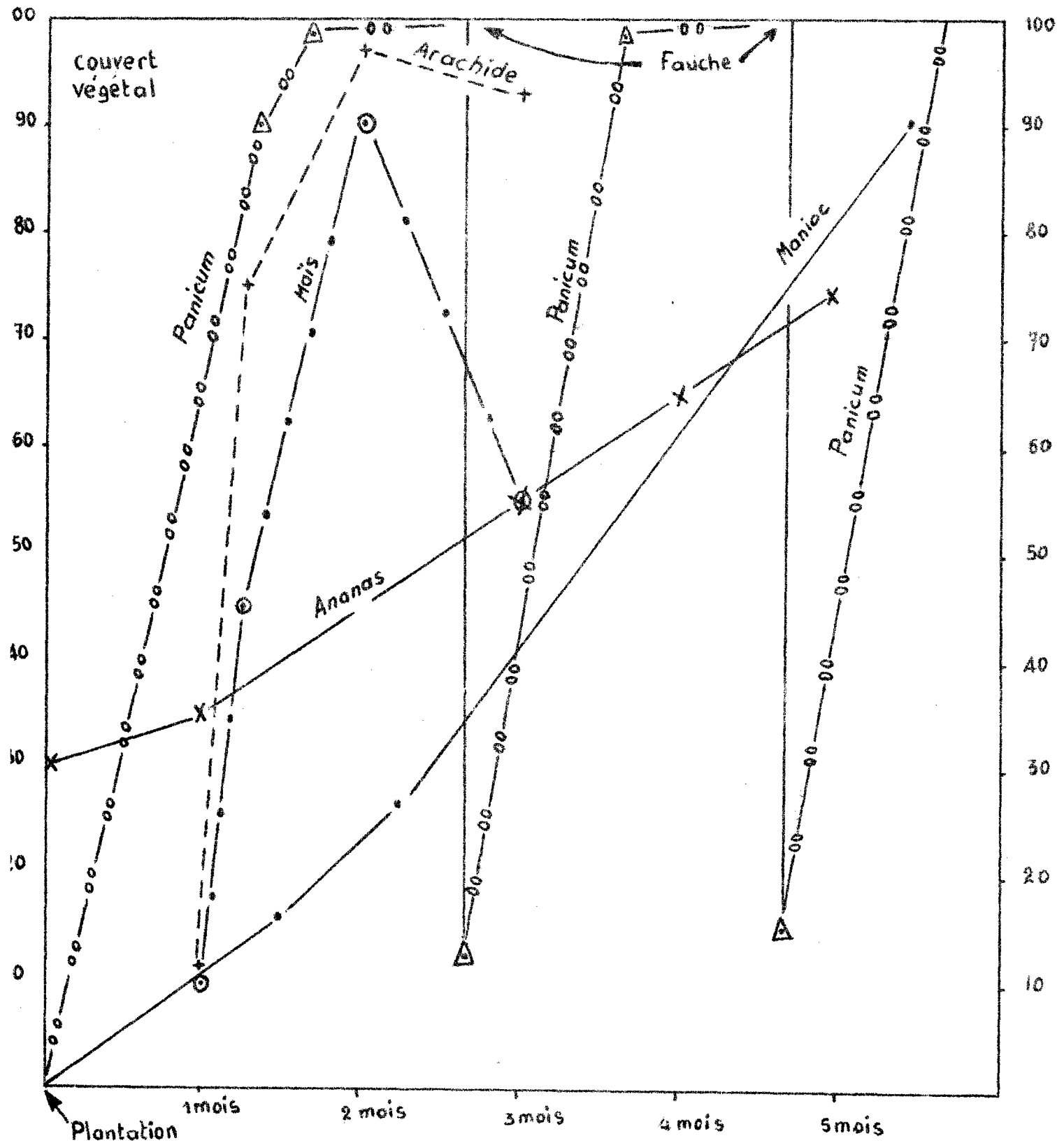


Tableau 16 - Protection antiérosive de trois plantes
fourragères après la fauche.
- Adiopodoumé 1970-72 -

	Pluie		" Cynodon "aethiopicus		"Stylosanthes " guyanensis		" Panicum maximum " "		Sol nu	
	Hauteur mm	Vitesse R*	R %	E kg/ha	R %	E kg/ha	R %	E kg/ha	R %	E kg/ha
3/11/70	41,5	13,8	3,6	47	19,6	10	0	0	39	1.843
4/11	Fauche		"	"	"	"	"	"	"	"
5/11	20,0	4,4	2,3	12	16,6	69	13,3	110	53	1.323
7/11	22,0	7,3	2,6	2	14,9	87	25,0	175	74	1.111
22/ 9/71	Fauche		"	"	"	"	"	"	"	"
27/ 9	33,5	18,5	1,9	9	15,2	188	3,3	175	32	1.542
15/ 7/72	Fauche		"	"	"	"	"	"	"	"
17/ 7	65,0	42,3	3,4	10	6,1	16	21,8	335	77	9.710
Total après fauche	140,5 mm	72,5	2,8%	33	11 %	360	17	795	62	13.686
Couvert végétal après la fauche	le 17/7/72,		60 à 80 %	"	42 %	"	8 à 14 %	"	0	"

Le tableau 16 traduit l'importance de la protection anti-érosive 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 ;

- 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.

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 limite, 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 quelconque (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 cher aux américains). 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	R Moy. %	R Max. %
1961 : Pluies 2289 mm		"	"	"	"
P1	Caféier + couverture Flemingia	bon	0,4	2,6	8
P2	Palmier + couverture Centrosema	presque nul	143,2	2,1	87
P5	Caféier + couverture Stylosanthes	lent	5,2	1,8	75
1962 : Pluies 2773 mm		"	"	"	"
P1	Caféier + Flemingia 2d an	complet	0,05	0,7	2
P2	Palmier + Centrosema éd 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 § 45.).

44.2. Le travail du sol.

Pour conserver l'eau et le sol on peut aussi penser 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.

442.1. 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 augmente la détachabilité et donc, à long terme, les risques d'érosion. Qu'il nous suffise de donner ici l'exemple suivant concernant l'effet du travail du sol à la houe.

Tableau 18 - Effet d'un labour à la daba sur l'érosion sur une pente de 7 % à Adiopodoumé.

Août à décembre 1957 : Pluies = 605 mm		E (t/ha)	R %	R % max.
P3	Sol nu, tassé, à plat	15,3	27	54
P2	Sol nu, labouré sur 15/20 cm à la daba, à plat	26,6	11	48

On constate au 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 plannage entraînant la pulvérisation des mottes de la surface (voir tableau 19).

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 redémarre ensuite brutalement sur faible pente une fois la surface 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	P l u i e s			Ruissellement %			Erosion kg/ha			Turbidité gr/m ³		
	Hauteur mm	Erosivité 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	2.494	4.793	30.824	273	664	1.225
6/ 4/	36,0	17,4		48,7	53,6	12,1	1.003	2.250	4.795	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	4.281	5.502	8.562
10/ 5/	17,5	1,0		31,6	17,6	2,7	543	549	379	1.492	1.796	4.320
15/ 5/	24,0	12,2		37,8	20,3	6,4	878	676	2.316	626	2.719	2.467
21/ 5/	23,5	10,8		53,8	30,1	6,3	989	859	2.031	678	1.483	3.992
29/ 5/	35,0	17,3		46,9	34,8	15,2	1.708	3.074	23.278	810	781	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 4 à 6 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 décroît lentement à mesure que se reforme une surface glacée et battue.

En résumé (voir 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 3 à 5 semaines (50 à 190 mm de pluie) sur parcelle nue.

Tableau 20 - Durée de l'effet d'un labour suivi d'un planage sur les phénomènes d'érosion.

		Arrêt total		Influence modératrice	
Date du labour	Durée	Hauteur	Durée	Pluie	
	jours	pluie mm		hauteur en mm	
1968	24/ 4/68	10	66	26	160
	24/ 9/68	9	46	34	190
1969	21/ 4/	21	81	21	121
	8/ 8/	60	77	30	179
1970	30/ 4/	0	-	22	127
1971	13/ 4/	21	87	p = 4,5% 21	87
				p = 20 % 45	187
1972	28/ 3/	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 qu'on en tire 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 cases 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 (herbicide) 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 5-10 cm (P.) et non travail du Sol (O) - (voir tableau 21).

Tableau 21 - Réaction à la pluie en fonction du mode de préparation d'un sol nu ferrallitique gravillonnaire :
Bouaké, pente 4 %. - Selon KALMS, 1975 -

Années	Pluie h (mm)	RUSA	"Ruissellement (% annuel) des pluies érosives"				Erosion (t/ha/an)				"Turbidité (mgr/l.)"			
			L	L+P	P	O	L	L+P	P	O	L	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 cela 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 3ème 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 % si 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 2 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 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 en matières organiques au départ), 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. C'est d'ailleurs l'un des principaux thèmes actuels de la recherche en conservation des sols que 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 de preuves de l'intérêt à long terme des points de vue agronomique et économique des techniques telles que le minimum tillage, travail localisé avec interlignes protégés par les résidus de culture, de stubble mulching et de zéro tillage associé au mulching (mulch tillage) 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.

442.2. 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 daba, le sol ne peut absorber qu'une pluie peu agressive de 10 à 30 millimètres et limiter l'érosion durant 1 à 8 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 (voir 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.

442.3. 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 = presque sol nu sur butte	89,6	26,6	48
P ₃	Sol nu à plat	79,0	28,2	52

D'autres essais temporaires (campagnes 1967 à 69) 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.

Notons qu'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 § 45).

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	1er an	8,6-15,5	17	51
	2e an	0,2	1	5
Ananas billonné cloisonné isohypse	1er an	1,6	1	2
	2e an	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 par conséquent que 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.

44.3 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 (5 aux USA et jusqu'à 9 en zone tropicale humide à deux cycles culturaux).

En ne tenant compte que d'une valeur globale par année, 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
pente 4 à 20 %	résidus enfouis	0,1 à 0,3
	résidus en surface	0,01
- ananas sur billons cloisonnés (pente 7 %)	0,1	

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.

44.4. 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 influence ensuite le plus le niveau des pertes en terre mais pas nécessairement 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 Etats-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 il manque d'eau en début de saison et où les sols sont riches en sables fins et limons (donc battant) 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.

4.5. 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 visent d'abord l'alimentation hydrique ou minérale des cultures (voir § 44.2). 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.

45.1. 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 mètres 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). Erosion et ruissellement annuels moyens sont rapportés au tableau 25. On constate qu'une fois installées, les bandes densément enherbées de 0,5 à 4 mètres 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 (Note 1) améliore l'infiltration. 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 sa capacité de transport et de sa 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% si bandes de 2 m et pente = 3 %),
- implantation facile (erreur admise 10%) et bon marché par les intéressés,
- traitement rapide de grandes surfaces, sans intervention extérieure trop lourde,
- la production fourragère des bandes peut 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.

(Note 1) - Utiliser *Andropogon*, *Pennisetum purpureum*, *Paspalum notatum*, *Stylosanthes* en mélange, canne à sucre, etc.. Eviter 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*).

Tableau 25 - Influence des bandes d'arrêt et du travail du sol suivant les courbes de niveaux 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 Manioc Pente 7%	R%	16,5	10,3	6,0	1/1,6/2,8	
	Et/ha	18,9	5,7	1,8	1/3,5/10	
Bouaké (1965-66) Pluie = 1180 mm Arachide/maïs Pente 4%	R%	12,6	5,1	3,8	1/2,5/3,3	
	Et/ha/an	7,6	0,9	0,6	1/8/13	
Allakoto (1966-71) Pluie = 437 mm Arachide, mil Sorgho, Cotton. Pente 3%	Traitements	Émoin culture traditionnelle Nacoussa	bandes d'arrêt 50cm dh = 40cm + labour + billonnage + binages fréquents	murets pierres dh = 80cm + idem 2	bourellets armés dh = 80cm + idem 2	
	R%	17,6	5,2	3,8	0,9	1/3,4/4,6/20
	Et/ha	9,5	1,1	0,5	0,3	1/9/19/32

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 ces blocs en cordons continus dans les bandes d'arrêt (DELWAULLE, 1973).

45.2. Le mulching.

Etant données 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.

45.21. 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 secondarisée haute d'une trentaine de mètres même en année très pluvieuse (voir 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.

Années	Précipitation hauteur annuelle (mm)	Erosion (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.

45.22. 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. Par contre 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 Etats-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, 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 (RUJA = 272) et l'érosion moyenne sur 3 pentes (4-7-20 %) fut de 43 t/ha sur sol nu. Sous plantation d'ananas à plat en ligne perpendiculaire 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 le même traitement à part que les résidus furent enfouis, le couvert est de 45 à 55 % et l'érosion 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 1/100 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.

45.23. 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 vendu sous le nom de Curasol par la firme Hoechst. A Adiopodoumé, il a été pulvérisé juste après labour planage et plantation à une dose unique de 60 gr de Curasol dilué dans 1 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 durant 4 années ce traitement sur 3 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 3 mois de pluies violentes (1200 mm) mais 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 son couvert.

Il n'était pas évident à priori que l'épandage de plastique diminue 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 en-dessous des 10 tonnes de pertes en terre tolérables sur ce genre de sol. Son prix de revient (200.000 CFA/ha en 1973 pour une dose moyenne de 60 gr/1/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 décapées des zones urbaines ou industrielles si on le projette en mélange avec certaines graines herbacées et les engrais nécessaires à leur développement.

A titre de comparaison, signalons qu'en Côte d'Ivoire il faut 200 à 250 journées de travail (à 250 CFA en 1973) pour récolter en brousse et répartir sur le champ 40 à 80 tonnes/ha

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

ADIOPODOUME 1970-1974		EROSION (t/ha et % du témoin)						RUISSELLEMENT (mm, % et % du témoin)						
Précipitations		Panicum, p= 7%		Sol nu, p= 7%		Sol nu, p= 20%		Panicum, p = 7 %		Sol nu, p = 7%		Sol nu, p= 20%		
h(mm)	USA	Témoin t/ha	+Curasol % témoin	Témoin t/ha	+Curasol % témoin	Témoin t/ha	+Curasol % témoin	Témoin mm	+Curasol % témoin	Témoin mm	+Curasol % témoin	Témoin mm	+Curasol % témoin	
5/70 à 3/71	1389	1057	89,2	25 %	150	50 %	532	27 %	368mm 26,5%	37 %	575mm 41,4%	56 %	423mm 30,4%	40 %
4/71 à 3/72	1816	1023	4,1	30 %	139	55 %	618	59 %	190mm 10,5%	77 %	562mm 31 %	105 %	286mm 15,8%	149 %
4/72 à 3/73	1562	819	1,2	10 %	114	50 %	273	57 %	106mm 6,8 %	16 %	593mm 36,3%	66 %	363mm 23,2%	55 %
4/73 à 4/74	1887	1165	15,0	34 %	191	71 %	626	40 %	146mm 7,7 %	34 %	942mm 49,9%	70 %	425mm 22,5%	91 %
Moyenne	1664		27,4	26 %	149,4	58 %	512,3	45 %	203mm	43 %	668mm	73 %	374mm	79 %

de broussailles (soit environ 50.000 CFA). Si on dispose d'un champ de Guatemala grass 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, milieux humains; problèmes herbicide et phytosanitaire) 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 a été éprouvée sur de longues périodes.

45.3. 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 de la taille de l'hectare environ. On se bornera donc ici à joindre nos résultats aux coefficients préconisés aux USA après de nombreuses études sur petits bassins versants (WISCHMEIER, 1958 ; ROOSE et BERTRAND, 1971 ; ROOSE, 1973, DELWAULLE, 1973).

Tableau 28 - Le facteur "pratiques antiérosives" en Afrique de l'Ouest.

	P
<u>U.S.A.</u>	
- labour isohypse	0,75
- labour et billonnage isohypse	0,50
- labour et bandes enherbées isohypses	0,25
<u>Afrique de l'Ouest</u>	
- 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/l/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 (dénivellées : 80 cm) + labour et binage isohypse et fertilisation équilibrée	0,10

Les techniques antiérosives de terrassement pour la diversion ou l'absorption totale des eaux ne figurent pas dans cette liste car on en tient déjà 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 provoqué en même temps sur le même bassin versant. (ROOSE, 1974 ; GOUJON, BAILLY, 1974).

Notons 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, 72, 73, 74).

45.4. 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 l'on travaille : 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) nous 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 sa valeur 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 comprend la longueur (L) et 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 ($e = + 1,4$) avec le % de pente (ZINGG, 1940) ou encore selon une équation du 2^d degré très voisine (WISCHMEIER, SMITH : 1960).

Pour les pentes les plus courantes (0,1 à 15 %) d'une longueur de 60 mètres, la variabilité de $SL = 1$ 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 sont médiocres si le sol est couvert à plus de 90 %. Notons 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 nous proposons quatre approches de type biologique :

1. Intensifier 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 temporaire avec 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, les pentes 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.

4.6. Limites de l'équation de WISCHMEIER.

Un nombre relativement important de mesures de l'érosion en parcelles expérimentales ont été réalisées en Afrique de l'Ouest qui 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 qu'elle 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 hyârique 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 oeuvre dans chaque cas particulier de l'aménagement du territoire.

Sur le vieux continent africain, son utilisation nous 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 nous 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 des 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 déoulant 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 all. 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 nous 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.

V - ESSAI DE BILAN DES PERTES PAR EROSION 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 parlé de l'aspect quantitatif de l'érosion; or l'érosion ce n'est pas seulement un gaspillage des eaux de pluie, et un 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 nous 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 (en 1973) et si on constate une évolution, à chercher à définir sa dynamique depuis le défrichement.

Une deuxième approche tient de la méthode des bilans. On calcule les bilans hydriques sous différents traitements puis on tente d'établir les pertes chimiques et colloïdales par érosion (ruissellement, suspension et terres de fond).

5.1. Evolution du sol en place.

Lorsqu'on désire des précisions sur 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 difficile 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 : répétitions dans le temps;
- à cause de la durée des expérimentations on risque des changements de méthodes analytiques et de manipulateur : les résultats ne sont plus comparables;
- les horizons fondent, d'autres se colmatent ou gagnent des 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 en haut de parcelle qui évolue alors différemment du bas de la parcelle.

Les résultats 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.

Etant données 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.

1)- Comparaison de l'horizon superficiel (10 cm) en haut et bas de pente : Adiopodoumé 1966.

1. Sous culture et 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, la sédimentation des sables grossiers dissociés des colloïdes organiques et minéraux (perte par le marigot) 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, la lixiviation des solubles sans compensation en haut de pente mais pas de colluvionnement sableux en bas de pente.

2)- Evolution des propriétés physiques et chimiques à l'intérieur de l'horizon meuble (20cm) : Adiopodoumé, 1971.

Quinze ans après le défrichement, ce 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 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 : 3,1 à 1,3 mé % ; N de 1 à 0,6 % et phosphore assimilable 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.

3)- Comparaison des propriétés analytiques de l'horizon superficiel (10cm) de 4 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%) (fonte et 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 s'améliore quelque peu sous culture fertilisée (5 à 5,6) parallèlement à la somme des bases échangeables et au 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 par 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.

Aux figures 5 à 7 on a tenté de montrer la dynamique des phénomènes d'appauvrissement, de décapage et de lixiviation et donc leur vitesse d'action en fonction des traitements auxquels sont soumis 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 28 % après 2 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 diminue 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 4 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 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.

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

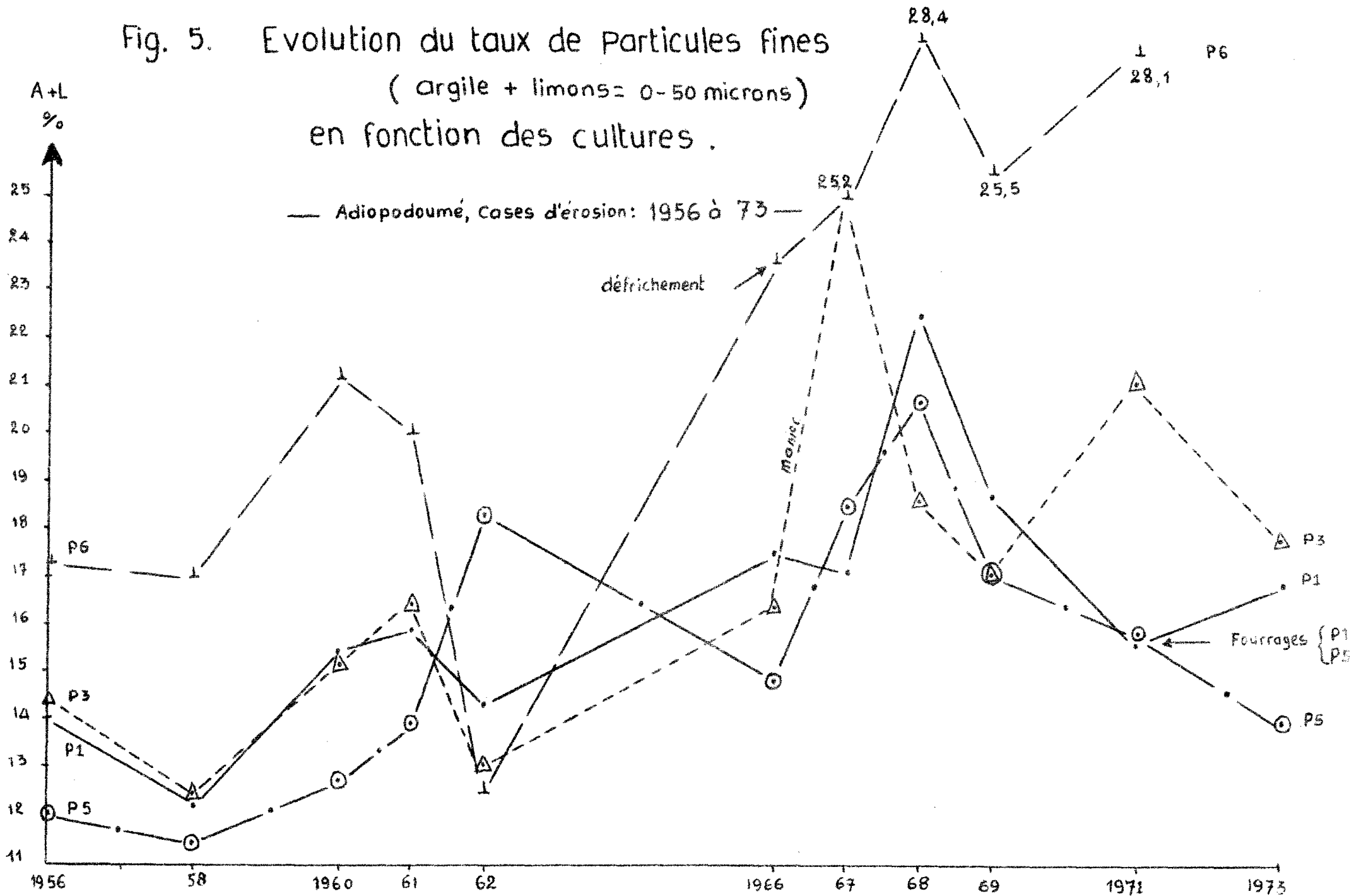
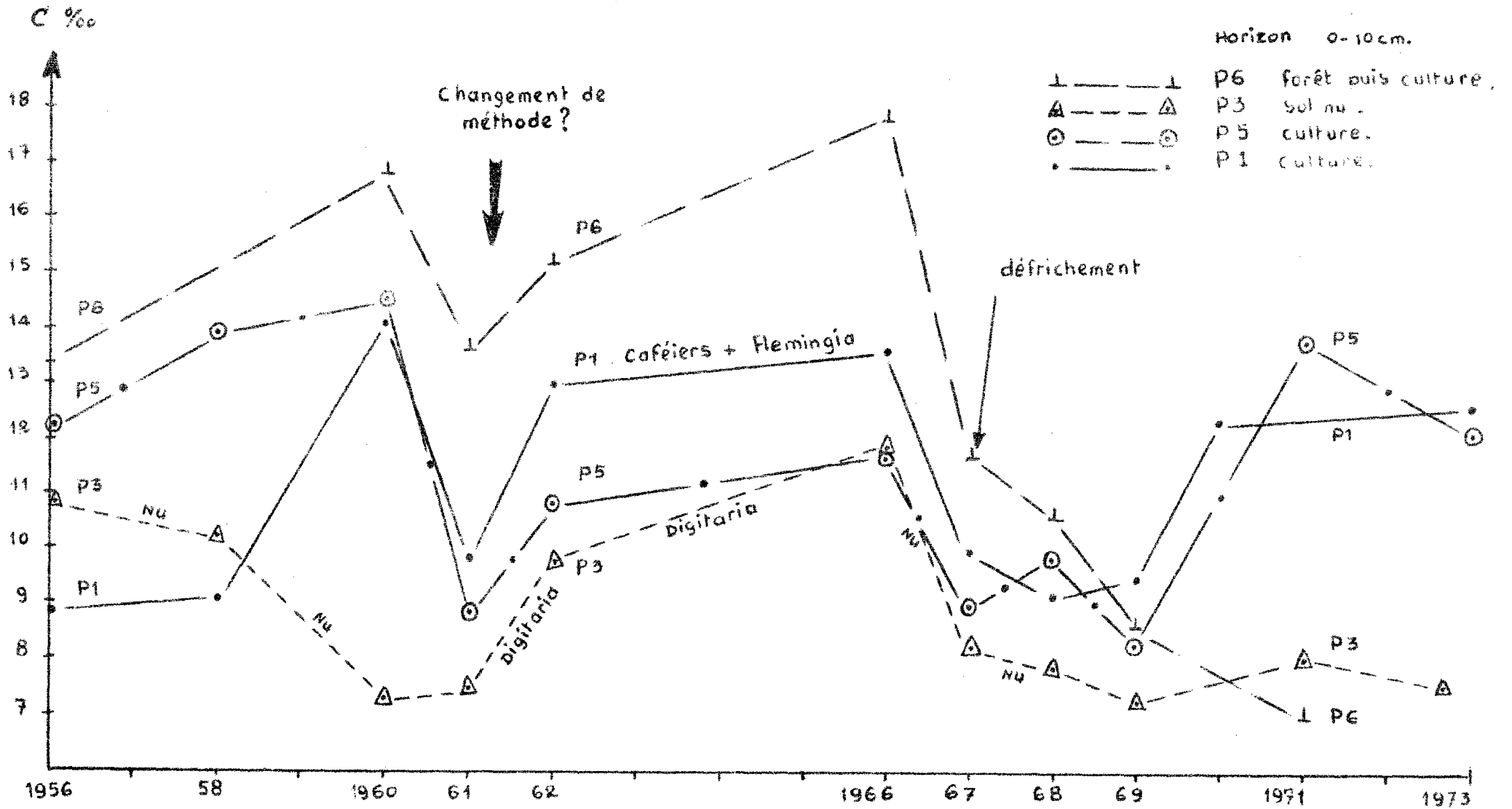


Fig. 6. Evolution du carbone en fonction des cultures.

— Adiopodoumé, cases d'érosion: 1956 à 73 —



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 tombe rapidement de 0,8 mé/100 gr sous forêt à 0,2 mé/100 gr après 4 années de jachère nue (décapage et lixiviation).
- En parcelle 3, la somme des bases échangeables diminue de 0,9 mé/100 gr en 1968 à 0,3 mé/100 gr après 3 années de jachère nue.

Ceci donne une estimation de la vitesse de la lixiviation des bases dans ces 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 la 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.

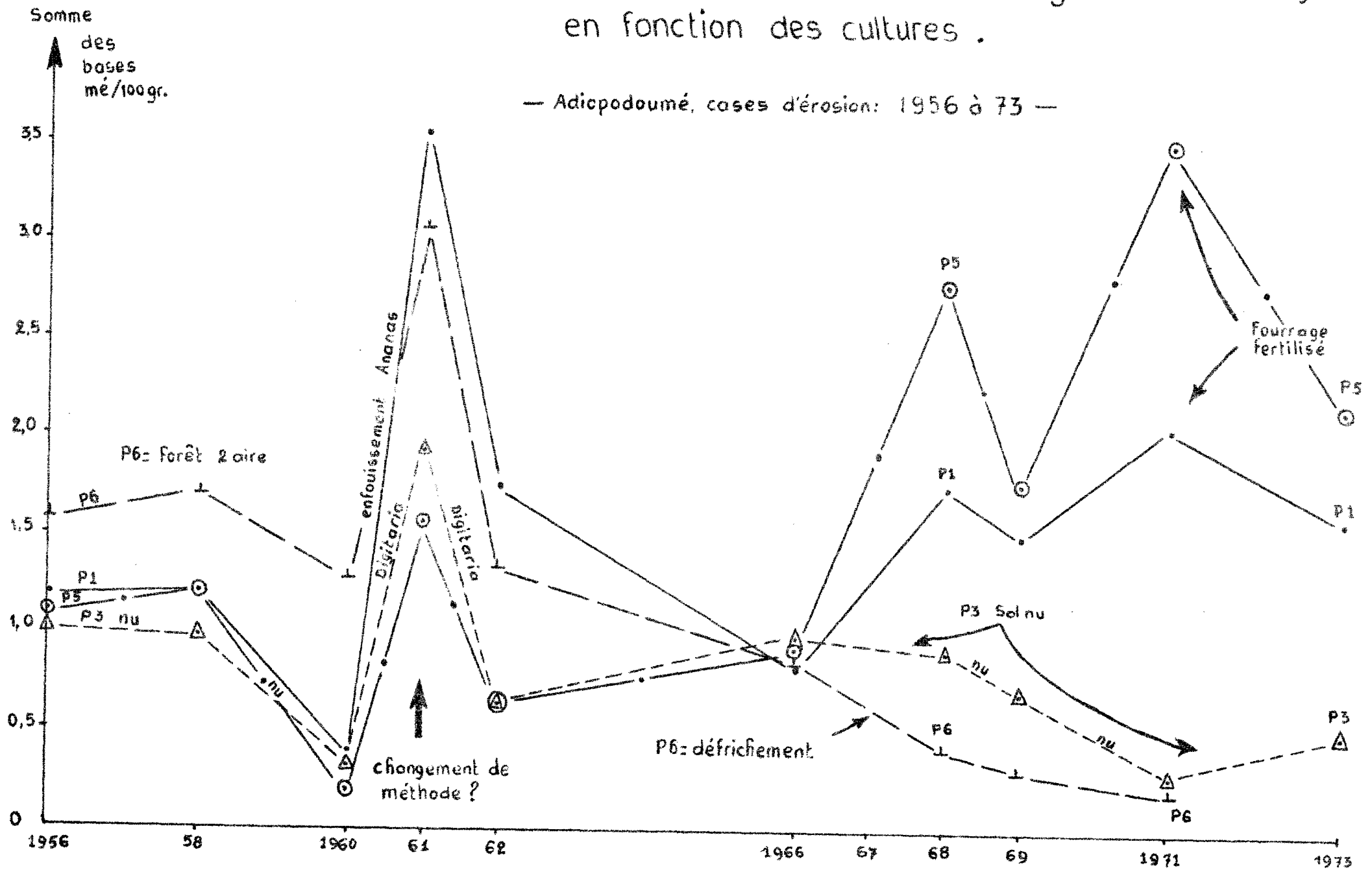
Discussion.

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.

Malgré les imperfections de cette méthode, il ressort quelques conclusions d'ensemble :

- en plus du 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 par drainage et par l'érosion et l'exportation par les récoltes et à condition d'utiliser des techniques culturales bien adaptées à la région on peut augmenter légèrement son potentiel de production. 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

Fig. 7. Evolution de la somme des bases échangeables (mé/100 gr). en fonction des cultures.



tendance fâcheuse. Un gros effort devrait être fourni pour adapter à l'écologie équatoriale les techniques culturales souvent importées telles qu'elles des régions tempérées qui ne connaissent pas une agressivité climatique aussi redoutable.

- A Séfa (ROOSE, 1966) nous avons également remarqué que le potentiel de production 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, de 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 n'est pas catastrophique en soi : il ne faut cependant pas oublier que ce sont les éléments les plus fertiles 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 3 ou 4 années. 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.

5.2. Essai de bilan hydrique.

Il n'est pas possible de calculer un bilan hydrique exact avec les données observées uniquement aux 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 applique la formule suivante :

$$- \text{Pluie} = \text{Ruiss.} + \text{DRAIN.} + \text{ETR} \pm \text{Var. stock eau du sol} -$$

Dans cette équation on connaît la pluie, le ruissellement et les variations maximales du stock en eau du sol (profil hydrique à capacité au champ moins profil hydrique en saison sèche). On va évaluer le drainage (= l'eau infiltrée qui s'échappe des horizons explorés par les racines) à partir de l'ETP. On considère en effet que l'évapotranspiration réelle (ETR) est 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.

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

En saison des pluies lorsque Pluie - Ruiss. \geq ETP on sait que ETR tend vers ETP et le Drainage égal Pluie - Ruiss - ETP.

On additionne alors les ETR mensuels bruts et on leur ajoute les variations max. 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, ELDIN, HUTTEL, MARINI et ROOSE) les variations du stock d'eau du sol seraient négligeables au-delà de 150 à 350cm de profondeur dans la région d'Abidjan en fonction de la couverture végétale. Ceci équivaudrait 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 au tableau 30 dans le cas d'une forêt secondaire de la région d'Abidjan (Ruiss. = 0,5 % en saison sèche et 1 % en saison des pluies) et d'une culture fourragère couvrant bien le sol (Ruiss = 10 % en saison sèche et 25 % en saison des pluies). A titre de comparaison on y a joint les résultats 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 météo. de l'ORSTOM et l'ASECNA.

	Pluie (mm)	Ruiss. %	ETP (mm)	ETR brut %	Var. stock (mm)	ETR rectifié %	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 diminue) 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'infiltré 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 méq/100 gr 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 dans ces zones chaudes et la lixiviation des éléments nutritifs en saison des pluies est compensée par les remontées par évaporation en saison sèche.

La figure 8 montre bien qu'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 trouve que, là encore, les variations des précipitations portent surtout sur le drainage (710 à 1877 mm) et relativement peu sur l'ETR car l'excédent de pluie survient généralement en saison humide.

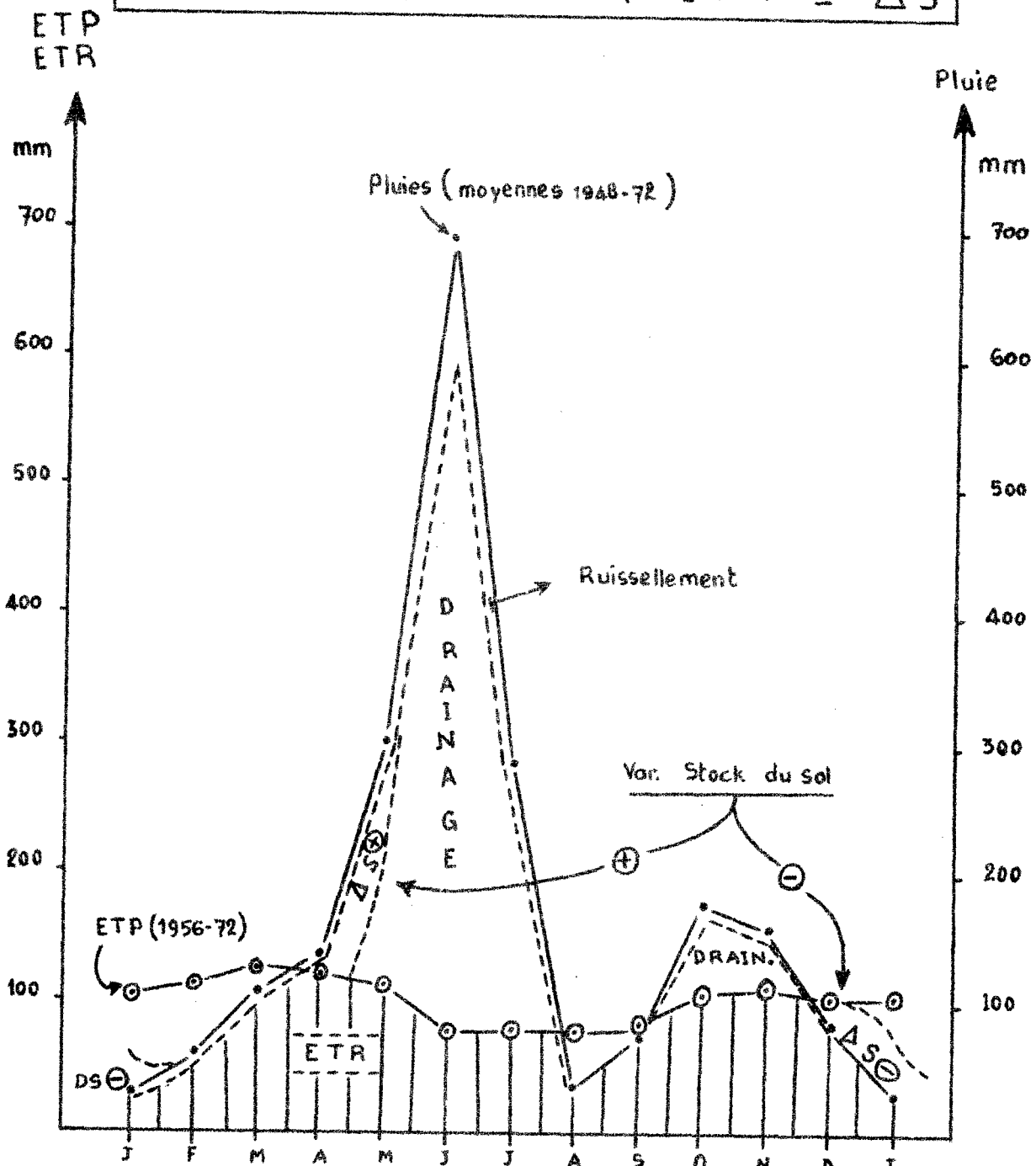
Tableau 31 - Schéma de bilan hydrique en année exceptionnellement sèche (1967) ou humide (1962) sous forêt dense près d'Abidjan.

	Pluie (mm)	Ruiss. %	ETP (mm)	ETR brut (mm) %	Var. stock (mm)	ETR rect. (mm)	Drainage % : mm
Sèche	1619	1%	1320	773 : 47,7	120	893	43,9 : 710
Humide	2776	1%	1107	751 : 27,0	120	871	67,6 : 1877

Fig. 8. Schéma de bilan hydrique pour la région d'Abidjan.

- Moyennes mensuelles d'Adiopodoumé d'après Gosse et Eldin(1972) -

$$\text{Pluie} = \text{Ruiss.} + \text{Drain.} + \text{ETR} \pm \Delta S$$



	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	Total	%
Pluie mm	31	60	109	139	302	695	287	38	75	178	160	86		2158 mm	100
ETP mm	105	113	128	121	113	77	79	77	81	108	112	105		1219 mm	56,5
Ruiss.	0	0	1	1	3	7	3	0	0	2	2	0		19 mm	0,8
ETR brut	31	60	108	121	113	77	79	38	75	108	112	86		1008 mm	46,7
Drain. brut	0	0	0	17	186	609	205	0	0	68	46	0		1134 mm	52,4
Bilan annuel moyen															
Sous forêt				Ruiss.	Drain. brut			Var. Stock du sol			Drainage rectifié				
Sous culture				19 mm	1131 mm			200 mm			931 mm			43,1 %	
				459 mm	730 mm			120 mm			610 mm			28,3 %	

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.

5.3. Pertes chimiques et colloïdales dues aux phénomènes d'érosion superficielle.

Cette approche consiste à comptabiliser tout ce qui sort 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 exigeante sur le terrain et au laboratoire mais beaucoup plus précise et rapide car elle permet de déceler en 2 ou 3 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 68) 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.

53.1. 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 mais pas sous forêt. En effet on constate que les produits érodés sous forêt sont généralement plus riches en carbone, azote et particules fines mais on peut trouver un enrichissement en bases et en phosphore dans les terres érodées sur parcelles cultivées.

Au tableau 32 sont résumés 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 %.

	Erosion totale	Suspensions	Mat. organ.	Ruissellement
	t/ha	t/ha	t/ha	%
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.

	" Erosion 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
Erosion totale t/ha	0,11	32	138			
Ruissellement m ³ /ha	210	5250	6300			

- Notons d'abord que la somme des produits érodés est inférieure à l'érosion annoncée au bas du tableau puisqu'on n'a pas affiché les valeurs de Fe₂O₃, Al₂O₃ et SiO₂ (argiles) ni surtout celle du résidu insoluble au triacide (sables quartzeux).

- La croissance des pertes chimiques est presque parallèle à celle des pertes en terre : elle est donc fonction inverse du couvert végétal. Les teneurs en éléments nutritifs dans les substances érodées baissent quelque peu lorsque l'érosion croît, mais cette baisse est sans proportion avec l'augmentation des pertes en eau et en terre.

- L'érosion ayant des répercussions à court et moyen terme, nous avons distingué les éléments nutritifs directement assimilables (échangeables) des 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 kg 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 que l'on peut trouver 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.

53.2. 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 surnoisement 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 (voir 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 sousestimé. On peut cependant retenir que les terres de fond sont riches en carbone et phosphore. Il 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'instabilité 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 69) des études semblables ont donné 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 Sarria (Haute-Volta) (ARRIVETS, ROOSE, 1972 et 74) les résultats vont dans le même sens.

5.4. Conclusions sur l'évolution du sol soumis à l'érosion.

L'analyse répétée de l'horizon superficiel du sol, les bilans hydriques et l'analyse systématique de tout ce qui sort des parcelles expérimentales concourent à formuler plusieurs conclusions sur l'évolution actuelle du sol.

1. Comme d'autres auteurs, 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 fonction du nouvel équilibre écologique. Cependant ces phénomènes sont réversibles dans une certaine mesure grâce à 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 du fait de l'importance du drainage (600 à 1000mm) dans la zone tropicale humide 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 entrainement 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 migrations diffèrent : le carbone et le phosphore (de même que le fer et l'alumine) sont liés aux terres érodées tandis que l'azote et les bases échangeables s'échappent principalement en solution. Pour avoir un reflet 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 faible que le sol est bien couvert et la pente faible.

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

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	"2/73: parcelle d'érosion pente 7 %"				2/1973	1/1958 (DABIN)
Cases d'érosion: horizon 0 - 10 cm	" Forêt en place "	P5 culture protégée	P1 culture érodée	P3 Sol nu	" pente 7 % moyenne 3 parcelles "	" pente 7 % moyenne 3 parcelles "
argile 0-2 microns	9,7	9,5	11,3	13,2	11,4 x	10,3 x
limons 2-50 "	3,9	4,5	5,6	4,6	5,0	2,3
sables fins 50-200	25,9	28,3	28,5	30,5	29,5	34,3
sables grossiers 200-2000	58,2	56,4	52,9	50,9	54,1	53,1
Carbone %	18,7	12,1	12,6	7,6	10,8	8,7
Azote	1,43	0,90	1,03	0,60	0,84	0,76
Acides humiques	2,59	1,43	2,00	0,92	1,45	-
Acides fulviques	2,72	1,36	1,51	1,52	1,46	-
Taux C humifié	28,4	23,1	28,0	32,0	27,7	-
A.Fulv./A. hum.	1,05	0,95	0,75	1,65	1	-
Matières organiques C / N	32,3	20,8	21,6	13,1	18,5	15,0
	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 assim. Olsen	0,05	0,22	0,44	0,09	0,25	0,05
Ca échang. mé/100 gr.	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	0,56	2,16	1,64	0,51	1,43	1,14
Capacité échange bases	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 gr	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 206	Panicum 157	Cynodon 107	Sol nu 96	Moyenne ± 120	-

x Valeurs ramenées à 100 % de matière minérale.

VI. CONCLUSIONS GENERALES.

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 Etats-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 1 à 1000) qui domine largement tous les autres facteurs. Ensuite interviennent l'inclinaison de la pente (var. 1 à 25), le sol (1 à 12) les techniques culturales (1 à 10) et les pratiques antiérosives (1 à 10) lorsque le couvert végétal n'est pas suffisant.

Les graves dégâts d'érosion constatés en Afrique proviennent avant tout de l'agressivité particulière des pluies tropicales (2 à 6 fois plus énergétiques qu'en région tempérée) plutôt que de la fragilité légendaire 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 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 hydro-dynamiques de la couche superficielle du sol et piège les matériaux solides en voie de migration.

On voit qu'un esprit nouveau vient féconder les recherches dans le domaine de la lutte contre l'érosion. La défense et la restauration des sols a été trop longtemps réduite 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 sa concentration le long de certains axes et l'extension des cultures d'exportation nous pousse désormais à envisager les problèmes d'érosion sous l'angle agronomique de l'exploitation rationnelle et continue du milieu sans dégradation du capital "sol et eau".

Les techniques de conservation du sol et de l'eau sont donc à ranger aux côtés de la fertilisation, l'irrigation, la sélection et 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 la fertilité (assez réduite en réalité) concentrée dans un mince horizon de surface il faut faire intervenir les notions d'érosion qualitativement sélective. Or la méthode qui consiste à mesurer tout ce qui sort d'une parcelle expérimentale comme les 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 sont maintenant complétées par des tests au simulateur de pluie, qui, étant mobile, permet d'étendre à des conditions très variées de sol, couverture végétale et techniques culturales les observations jusqu'ici effectuées en quelques points d'Afrique.

BIBLIOGRAPHIE

1. 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 juin 4 juillet 1975, Ibadan).
2. AUBERT (G.) et SEGALEN (P.) - 1966 -. Projet de classification des sols ferrallitiques. Cah. ORSTOM. Sér. Pédol. 4, 4, p. 97-112.
3. 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).
4. 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, p. 369-376.
5. 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, p. 1296-1301. 4 réf.
6. BERTRAND (R.) - 1967 -. "Etude 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, p. 1281-1295, 9 réf.
7. 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.
8. 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.
9. BRUNET-MORET (Y.) - 1963 -. Etude générale des averses exceptionnelles en Afrique Occidentale : République de Haute-Volta.
Rapport multigr., ORSTOM, Comité Inter-Etats d'Etudes Hydrauliques ; 23 p.
10. BRUNET-MORET (Y.) - 1967 -. "Etude générale des averses exceptionnelles en Afrique Occidentale. République de Côte d'Ivoire".
Rapport ORSTOM - Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques, multigr., juin 1967, 20 p., 11 graph.

11. BRYAN (R.B.) -1968-. The development, use and efficiency of indices of soil erodibility. Geoderma, 2, pp. 5-26.
12. CHARREAU (C.) -1969-. "Influence des techniques culturales sur le développement du ruissellement et de l'érosion en Casamance". VII. Congrès International du Génie Rural CNRA, Bambey, 13 p.
13. CHARREAU (C.), NICOU (R.) -1971-. L'amélioration du profil culturel 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.
14. C. T. F. T. -1971-. Défense et restauration des sols. Station de Gampela. Rapport annuel 1971.- Haute-Volta, Ministère de l'Agriculture, de l'Elevage et des Eaux et Forêts, C.T.F.T., 1971.- 18 p. multigr.
15. C. T. F. T./H.V. -1973-. Rapport de synthèse 1972. C.T.F.T./Minist. Agric. de Haute-Volta. Ouagadougou 46p., multigr.
16. DABIN (B.) et LENEUF (N.) -1958-. "Etude de l'érosion et du ruissellement en basse Côte d'Ivoire". Mai 1956-1958. Rapport ORSTOM, Abidjan, 20 p. multigr.
17. DELWAULLE (J.C.) -1973-. Résultats de six années d'observations sur l'érosion au Niger. Bois et Forêts des Tropiques, 150, pp. 15-37.
18. DULEY (F.L.), MILLER (M.F.) -1923-. Erosion and surface runoff under different soil conditions. Res. Bul. 63. Missouri Agric. Exp. Station, Columbia 50p.
19. DULEY (F.L.) and HAYS (O.E.) -1932-. "The effect of the degree of slope on runoff and soil erosion". J. Agr. Res. 45, p. 349-360.
20. DUMAS (J.) -1965-. Relation entre l'érodibilité des sols et leurs caractéristiques analytiques. Cah. ORSTOM, Sér. Pédol., 3, 4, pp. 307-333.
21. ELLISON (W.D.) -1944-. "Studies of raindrop erosion". Ag. Eng. 25, p. 131-181.
22. ELLISON (W.D.) -1945-. Some effects of raindrops and surface flow on soil erosion and infiltration. Trans. Am. Geophys. Un., 26, p. 415.

23. 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).
24. EPSTEIN (E.), GRANT (W.J.), STRUCHTEMEYER (R.A.) -1966-.
"Effects of stones on runoff, erosion and soil moisture".
Soil Sci. Soc. Amer. Proc. (Madison) 30, 5, p. 638-640.
25. 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. "Etude des sols".
Aux Etats-Unis (T.A. 38-63) ORSTOM, Bondy.
26. FOURNIER (F.) -1960-. "Climat et érosion".
Presses Universitaires de France, Paris, 201 p.
27. FOURNIER (F.) -1962-. Carte du danger d'érosion en Afrique au Sud du Sahara fondées sur l'agressivité climatique et la topographie.
- Notice explicative - CEE-CCTA, Paris avril 1962, 11 p.
28. FOURNIER (F.) -1967-. "La recherche en érosion et conservation des sols sur le continent africain".
Sols africains, 12, 1, p. 5-53;
29. FREE (G.R.) -1952-. Soil movement by raindrops.
Agricultural Engineering. Vol. 33, n° 8, p. 491-494.
30. 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.
31. GALABERT (J.), MILLOGO (E.) -1973-. Indice d'érosion de la pluie en Haute-Volta.
CTFT, Ouagadougou, 34p. + annexes.
32. 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 juin-4 juillet 75).
33. 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.
34. HEUSCH (B.) -1969-. "L'érosion dans le bassin du SEBOU : une approche quantitative".
Revue Géogr. du Maroc n° 15, p. 109-128.

35. HEUSCH (B.) -1970-. L'érosion hydraulique au Maroc : son calcul et son contrôle.
Rapport multigr. Dir. Eaux et Forêts du Maroc. 16 p.
36. 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, Etudes sur l'érosion, 1970, t. 12, Rabat, pp. 9-176.
37. HEUSCH (R.) -1971-. Estimation et contrôle de l'érosion hydraulique.
Soc. Sci. nat. phys. Maroc. C.R., 37, p. 41-54.
38. HUDSON (N.W.) -1957-. Soil erosion and tobacco growing.
Rhodesia Agric. Journ. Vol. 54, n° 6, nov-déc. 1957, p. 547-555.
39. HUDSON (N.W.) -1957-. Erosion control research.
Progress Report on Experiments at Henderson Research Station : 1953-56.
Rhodesia Agric. Journ., 54, p. 297-323.
40. 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.
41. 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, p. 15-25.
42. HUDSON (N.W.) -1963-. Rainfall intensity and erosivity.
Advisory Notes, Dept. of Cons. & Ext. Rhodesia, 5 p.
43. HUDSON (N.W.) -1973-. Soil conservation.
B.T. Bastsford limited, London, 320p.
44. KALMAN (R.) -1967-. Le facteur climatique de l'érosion dans le bassin du SEBOU (Maroc).
Projet SEBOU, 32 p. multigr.
45. KALMS (J.M.) -1975-. Influence des techniques culturales sur l'érosion et le ruissellement en région centre de Côte d'Ivoire.
I.R.A.T., Bouaké. - 9 p. multigr.,
(Colloque sur la conservation et l'aménagement du sol dans les tropiques humides, Ibadan, 30 juin-4 juillet 1975).
46. LAL (R.) -1975-. Role of mulching techniques in tropical soil and water. management.
Technical Bull. n° 1 I.I.T.A., Ibadan 38p.

47. LAL (R.) -1975-. Soil management systems and erosion control. I.I.T.A., Ibadan, 7p. multigr.
(Colloque sur la conservation et l'aménagement du sol dans les tropiques humides : IITA - Ibadan 30/6 -4/7/75).
48. LE BUANEC (B.) -1972-. Dix ans de culture motorisée sur un bassin versant du Centre Côte d'Ivoire. Evolution de la fertilité et de la production. Agron. Trop., 27, 11, pp. 1191 à 1211.
49. LISON (L.) -1968-. Statistique appliquée à la biologie expérimentale. La planification de l'expérience et l'analyse des résultats. Gauthier-Villars, Paris, 346p.
(Collection science et techniques d'aujourd'hui, sous la dir. de M.P. Lepine).
50. 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, 213p.
51. 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.
52. 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.
53. 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. Comm. n° 1, pp. 51-68.
54. RODIER (J.), AUVRAY (C.) -1965-. Estimation des débits de crues décennales pour les bassins versants de superficie inférieure à 200 km² en Afrique Occidentale. Rapport ORSTOM-CIEH 30p. multigr.
55. ROOSE (E.J.) -1967-. Dix années de mesure de l'érosion et du ruissellement au Sénégal. Agron. Trop. 22, 2, pp. 123-152.
56. 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.
57. ROOSE (E.J.) -1968-. "Erosion 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, 15p.

58. 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., C.T.F.T., O.R.S.T.O.M., Abidjan, 148 p.
59. ROOSE (E.) -1971-. Note technique concernant l'érosion hydrique au Maroc.
Bull. de liaison des Ing. forestiers du Maroc, 6, pp. 47-52.
60. 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.
Communic. au Séminaire des sols tropicaux, Ibadan, mai 1972. - 22 p. multigr.
61. 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.
62. 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.
Communic. à la journée des pédologues de l'ORSTOM, 28 sept. 1971.
63. ROOSE (E.J.) -1972-. "Comparaison des causes de l'érosion et des principes de lutte antiérosive en région tropicale humide, tropicale sèche et méditerranéenne".
Communication aux Journées d'Etude du Génie Rural à Florence du 12-16/9/72, pp. 417-441.
64. ROOSE (E.) -1972-. Contribution à l'étude de la résistance à l'érosion de quelques sols tropicaux.
Rapport multigr., ORSTOM, Abidjan, 11 p.
Communication au Congrès de Science du Sol de Moscou 1974.
65. 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.
in C.R. du 10e Coll. de l'Inst. Intern. de la Potasse Abidjan, décembre 1973, pp. 305-320.
66. 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. Sci. Abidjan, 1973, n° 20.

67. 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
 - in Soil Conditioners SSSA, Special Publication 1975 n° 4, Chap. 12,
68. ROOSE (E.J.) -1974-. Conséquences hydrologiques des aménagements antiérosifs.
 In XIII Journées de l'Hydraulique, question 3 rapport 10, 6 p.
69. ROOSE (E.J.), ARRIVETS (J.) et POULAIN (J.F.) -1974-. Etude 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.
70. ROOSE (E.J.) -1975-. Compte rendu technique de la mission Roose en Tunisie du 8 au 15/12/74.
 ORSTOM, Abidjan, 4 p., multigr.
71. 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 juin-4 juillet 1975).
72. 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 Juin-4 Juillet 75).
73. SEGNER (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.
74. SMITH (D.D.) and WISCHMEIER (N.H.) -1957-. "Factors affecting sheet and rill erosion".
 American Geophysical Union Transactions, 38 (6), pp.889-896.
75. 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.
76. STALLING (J.H.) -1953-. "Continuous plant cover - the key to soil and water conservation".
 J. Soil and Water Cons., 8, pp. 63-68.
77. STALTENBERG (N.L.) and WHITE (J.L.) -1953-. "Selective loss of plant nutrients by erosion".
 Proc. Soil Sci. Soc. Amer., 17, p. 406-410.

78. 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 - 1965 Columbus Ohio, 10 p.
79. VERNEY (R.), VOLKOFF (B.), WILLAIME (P.) -1967-. "Etude de l'érosion sur "Terres de Barre" Comparaison sol nu - jachère arbustive - Année 1965 - Rapport multigr., ORSTOM, 14 p.
80. VUILLAUME (G.) -1968-. Premiers résultats d'une étude analytique du ruissellement et de l'érosion en zone sahélienne. Bassin représentatif de Kount Kouzout (Niger). Cah. ORSTOM, sér. Hydrol. V n° 2, p. 33-56.
81. WILLAIME (P.) -1965-. Erosion "normale" sur terres de barre. Rapport ORSTOM, multigr. 7 p. + annexe. 9 p.
82. WISCHMEIER (W.H.), SMITH (D.D.), UHLAND (R.E.) -1958-. Evaluation of factors in the soil loss equation. Agr. Eng. 39, 8, pp. 458-462 et 474.
83. WISCHMEIER (W.H.) -1959-. A rainfall erosion index for a universal soil-loss equation. Soil Sc. Soc. Amer. Proceedings, 23, pp. 246-249.
84. WISCHMEIER (W.H.) - 1960-. Cropping management factor evaluations for a universal soil loss equation. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 24, 4, p. 322-326.
85. 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, p. 418-425.
86. WISCHMEIER (W.H.) -1962-. Rainfall erosion potential. Geographic and location differences of distribution. Agricultural Engineering n° 43, p. 212-215.
87. WISCHMEIER (W.H.) -1966-. "Surface runoff in relation to physical and management factors". Proceeding, First Pan American Soil Conservation Congress, Sao Paulo, Brazil, p. 237-244.
88. WISCHMEIER (W.H.), JOHNSON (C.B.), CROSS (B.V.) -1971-. A soil erodibility monograph for farmland and construction sites. J. of Soil and Water Conservation, 26, 5, p. 189-192.
89. 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.

90. WOODRUFF (C.M.) -1948-. Erosion in relation to rainfall, crop cover, and slope on a greenhouse plot.
Soil Sci. Proc. n^o 12, p. 475.
91. ZINGG (A.W.) -1940-. "Degree and length of land slope as it affect soil loss and runoff".
Ag. Eng., 21, pp. 59-64.