

Pédogenèse actuelle comparée d'un sol ferrallitique remanié sur schiste sous forêt et sous une bananeraie fertilisée de basse Côte d'Ivoire Azaguié : 1968 à 1973

Eric J. ROOSE* et Jacques GODEFROY**

* Pédologue ORSTOM, Université Orléans,
Géol. Appl. 45045 Orléans Cedex,
Centre d'Adiopodoumé, BP V 51, Abidjan

** Agro-pédologue à l'IRFA, Centre d'Anguededou,
BP 1740 Abidjan (Côte d'Ivoire)

avec la collaboration technique de

MULLER (M.), ADA (M.) de l'IRFA,
HENRY DES TUREAUX (P.), SOUNSOUNA (H),
SAGOU (J.), KOUAME (M.) de l'ORSTOM

RÉSUMÉ

Les auteurs présentent la synthèse de huit années d'observations sur les précipitations, l'érosion et le drainage sous une forêt dense et une bananeraie fertilisée de basse Côte d'Ivoire. Dans ce climat subéquatorial, les pluies sont intenses et concentrées durant quelques semaines de l'année ; il en résulte une potentialité élevée d'érosion et de drainage. L'évolution actuelle du sol est donc dominée par la lixiviation des bases et de l'azote, ainsi que par l'appauvrissement en particules fines des horizons superficiels. Cet appauvrissement se développe sous l'action conjuguée de la faune et du travail du sol, du lessivage vertical ou oblique (limité par la charge colloïdale et le volume du drainage), et de l'érosion sélective laquelle prend une importance dominante en milieu cultivé mal couvert.

ABSTRACT

The authors present the syntheses of 8 years experiments about rainfall, erosion and leaching in a rainforest and a Lower Ivory Coast fertilized banana plantation. Under this subequatorial climate, rainfalls are very heavy and concentrated in a few weeks so that the erosion and drainage potentialities are high. The actual pedogenesis is thus dominated by the bases and nitrogen washing and by the impoverishment in fine particles of the upper horizon. This impoverishment is developing under the conjugated action of fauna or soil work, of vertical and oblique colloids leaching (limited by the colloid load and by the drainage volume) and of selective sheet erosion which is full dominating under crops.

INTRODUCTION

En 1964, l'ORSTOM a lancé en Côte d'Ivoire un programme de recherches sur la dynamique actuelle des sols tropicaux sous végétation naturelle ou cultivée, programme qui s'est étendu progressivement à huit

stations situées entre la forêt dense humide de la région d'Abidjan et la savane soudano-sahélienne près de Ouagadougou en Haute-Volta. Diverses techniques de terrain (Roose, 1968 ; Roose, des Tureaux, 1970) ont été mises au point qui permettent de mesurer sur petites parcelles les précipitations, le ruissellement, l'érosion, le drainage oblique et vertical, ainsi que les

remontées biologiques. Une attention particulière a été portée aux eaux naturelles et aux éléments solubles et solides qu'elles transportent en vue de fixer l'ordre de grandeur des vitesses d'action des principaux moteurs de la pédogenèse actuelle.

Parallèlement, les recherches agro-pédologiques de l'IRFA se sont heurtées à l'importance des phénomènes de lixiviation des éléments nutritifs dans les bananeraies des coteaux de basse Côte d'Ivoire. Dans ces terres pauvres en effet, il est indispensable d'avoir recours à une forte fertilisation (N-K-Ca-Mg-P) dont les éléments sont mal fixés par le sol et le système racinaire peu efficace du bananier. Un protocole d'accord a donc été signé entre les deux organismes en vue d'étudier les phénomènes d'érosion et de lixiviation parallèlement sous la bananeraie de la station IRFA d'Azaguié et sous la forêt classée du Téké toute proche.

Une partie des observations concernant la lixiviation des nutriments a déjà été publiée (Roose, Godefroy, 1967 et 68 ; Godefroy, Roose, Muller, 1970 et 75 ; Roose, 1976). Nous présentons ici le résumé des principaux résultats de huit années d'observations et en particulier les conclusions concernant la pédogenèse actuelle comparée de ce sol ferrallitique sous forêt secondarisée et sous bananeraie fertilisée et irriguée (Roose, Godefroy, 1977) (1).

1. LE MILIEU

La station de l'IRFA à Azaguié est située en bordure de la forêt du Téké à une quarantaine de kilomètres au nord d'Abidjan (alt. 80 m ; lat. 5°33' Nord ; long. 4°03' Ouest). La forêt dense humide recouvre cette région dont le climat est du type équatorial de transition. Celui-ci est caractérisé par de fortes précipitations (1 775 mm de moyenne à Azaguié) réparties en deux saisons humides : la plus intense présente un maximum en juin et la plus courte est centrée sur octobre. Elles sont séparées par la petite saison sèche (pluie inférieure à 100 mm) d'août, et par la grande saison sèche qui dure de décembre à mars. Près de 50 % des précipitations tombent du 15 mai au 15 juillet. A cette époque, les pluies de mousson peuvent durer des heures avec des intensités atteignant 50 à 80 mm/h ; durant le reste de l'année, les averses sont généralement plus brèves mais souvent plus intenses. Les variations de température sont faibles ($\pm 2^\circ\text{C}$) autour de la moyenne de 25,6 °C. L'humidité relative de l'air ne descend que rarement en-dessous de 70 %

(1) Les lecteurs qui seraient intéressés par le rapport détaillé, peuvent le demander soit à l'ORSTOM BP V 51 Abidjan, soit à l'IRFA BP 5035, 34032 Montpellier Cedex.

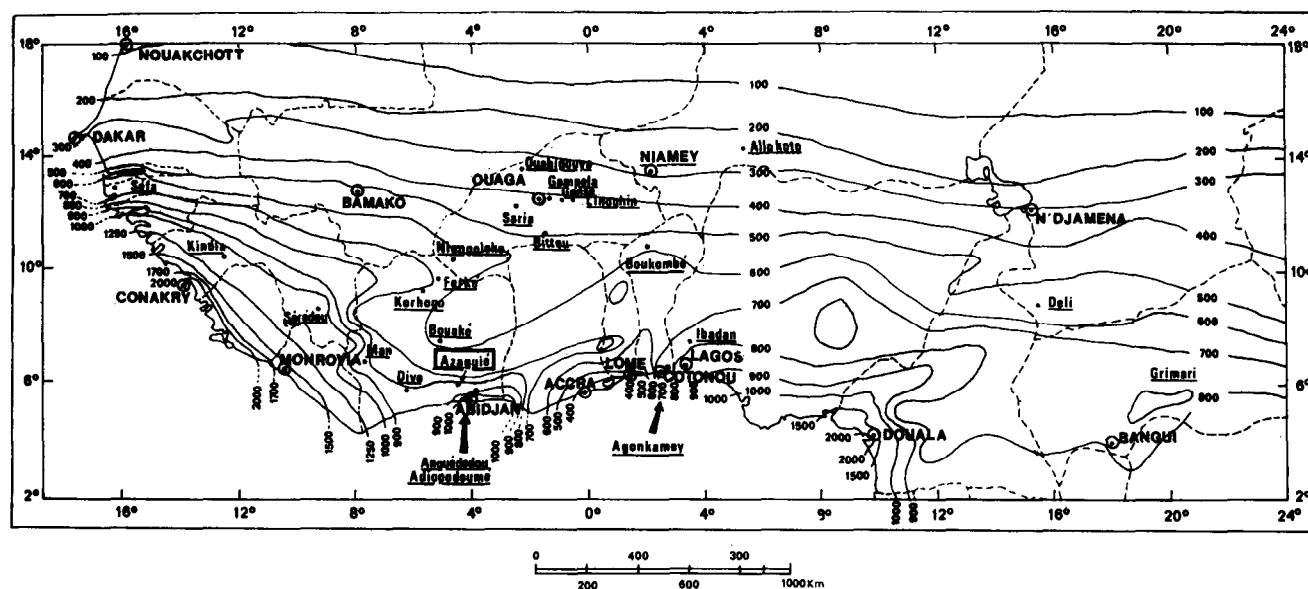


FIG. 1. — Esquisse de la répartition de l'indice d'agressivité climatique annuel moyen (Rusa de Wischmeier) en Afrique de l'Ouest et du Centre. Situation des parcelles d'érosion. D'après les données pluviométriques rassemblées par le Service Hydrologique de l'ORSTOM et arrêtées en 1975.

et l'évapotranspiration potentielle (ETP TURC) est de l'ordre de 1 330 mm : l'ETP dépasse la pluviosité pendant 4 à 5 mois par an, pendant lesquels il est nécessaire d'irriguer les plantations à raison de 20 mm tous les dix jours. Mangenot (1955) appelle pélohygrophile la forêt dense à *Diospiros* et *Mapania* qui s'individualise sur les sols argileux issus des schistes birrimiens de la région. La moitié du dispositif se trouve en bordure de la forêt du Téké (sous bois légèrement dégradé), tandis que l'autre est situé sous une parcelle (carré 4) de la bananeraie défrichée manuelle-

ment vers 1951, débardée au tracteur, drainée (fossé tous les 30 m), labourée au trident sur 30 cm, fertilisée et cultivée (15 cycles avant 1966).

Les toposéquences sur lesquelles ont été établis nos dispositifs ont été décrites par Monnier (1955), par les auteurs (1967, 1968, 1970, 1977) et par Moulo (1974). Nous renvoyons les lecteurs à ces documents pour les détails et nous nous contenterons de résumer la description du profil au niveau de la case Erlo sous forêt et d'indiquer les variantes importantes en fonction de la topographie et de la mise en culture (voir fig. 2 et 3).

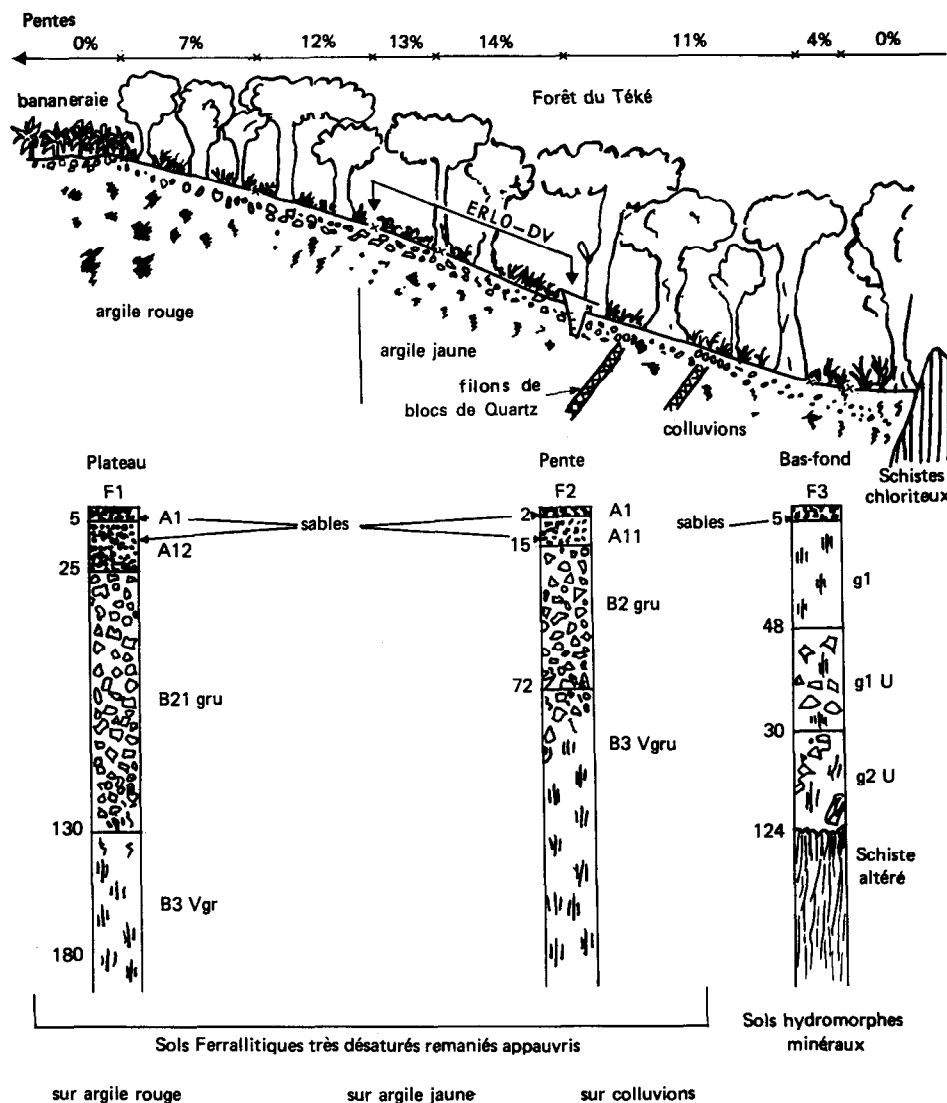


FIG. 2. — Toposéquence de la forêt du Téké.

Le paysage est vigoureusement ondulé. Les sommets des collines sont arrondis ; les pentes, d'abord convexes atteignent 15 % puis décroissent rapidement en une courte concavité. Les interfluves sont étroits et la toposéquence ne dépasse pas 200 m. La roche affleure localement dans les bas-fonds ; il s'agit d'un schiste chloriteux métamorphique sillonné de filonets de quartz d'où provient la nappe de gravat que l'on retrouve dans toute la toposéquence enfouie sous 10 à 40 cm d'un matériau jaune finement sableux. Dans cette région chaude et humide, les sols sont très évolués ; ce sont des sols ferrallitiques très désaturés remaniés, à argiles tachetées rouges sur les sommets, jaunes vers le bas des pentes et des sols hydromorphes minéraux colluvionnés dans les bas-fonds. Sous forêt, la surface est encombrée de nombreux turricules de vers de terre à demi enfouis sous une mince litière continue.

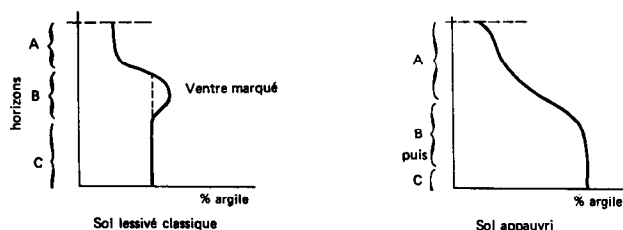


FIG. 3. — Courbes de répartition de l'argile.

Le sol présente d'abord un mince horizon gris (AI = 2 à 5 cm), humifère, riche en sables grossiers peu liés aux colloïdes, très poreux, très meuble, intensément colonisé par les racines et par la faune. Puis vient un horizon jaune (A II = 15 à 35 cm) maculé de taches brunes de pénétration des matières organiques, sablo-argileux, déjà plus cohérent, encore très poreux et dont la structure polyédrique moyenne est peu développée. Ensuite apparaît une nappe (B 2 gr. = 30 à 50 cm) de graviers de quartz de tailles diverses (0,5 à 15 cm de diamètre) mal calibrés, à arêtes vives ou émoussées, sains ou complètement ferruginisés, mélangés à quelques gravillons ferrugineux arrondis et patinés, le tout emballé dans une matrice argilo-sableuse ocre-jaune. Cet horizon est beaucoup plus compact ; seules quelques racines pivotantes arrivent à s'y frayer un passage tortueux. On y décèle déjà des indices d'engorgement temporaire (taches ferrugineuses ocrées et quelques pseudo-concrétions). Cette nappe riche en éléments grossiers (50 à 60 % de refus) repose

sur un horizon d'argile tachetée rouge sur fond ocre (B 3) puis de plus en plus blanchâtre et limoneux à partir de 150 cm de profondeur (BC). De nombreux amas concrétionnaires durcissent au sommet du niveau d'argile tachetée dès qu'on ouvre une fosse. La structure polyédrique moyenne est bien développée. Bien que l'ensemble du profil soit perméable en grand (mégapores de 5 à 10 mm de diamètre dans l'argile tachetée), l'absence de racines en profondeur et l'individualisation poussée du fer indiquent un engorgement temporaire (15 à 30 jours par an) à partir de 40 cm de profondeur et beaucoup plus long au-delà de 150 cm.

La succession des trois niveaux est constante dans toute la toposéquence, mais la nappe de gravat est plus épaisse sur le plateau qu'en bas de pente, et le niveau de terre fine s'épaissit dans la zone colluvionnaire du bas de pente concave ; l'hydromorphie remonte de plus en plus haut dans le profil, à mesure qu'on descend vers le bas-fond où elle envahit tout le profil. Sous bananeraie les vers de terre sont absents (nématocides et HCH), les deux premiers horizons sont mélangés avec quelques graviers de quartz par le labour au trident et les matières organiques (résidus de culture) sont incorporées au sol en une fois à la replantation.

Sous bananeraie les teneurs en bases échangeables (5 à 7 méq/100 gr) sont nettement améliorées par rapport à celles qu'on observe sous forêt (0,5 à 2 méq/100 gr) ; le taux de saturation atteint 70 % en surface (25 % sous forêt) mais baisse à moins de 25 % dès l'horizon gravillonnaire (moins de 10 % sous forêt). La capacité d'échange baisse de 8 méq/100 gr. dans la couche arable (4 sous forêt) à 5-7 méq/100 gr en profondeur ; même sous forêt, il reste une certaine réserve minérale surtout en potassium. Le pH est acide : 4 sous forêt et 5,5 sous bananeraie (apport de 1 tonne de dolomie à chaque cycle) en surface et 5 à 5,5 en profondeur. Les teneurs en phosphore total (0,3 à 0,9 ‰) et en azote total (0,3 à 1,4 ‰) sont moyennes en surface et médiocres en profondeur. Les teneurs en matières organiques sont peu élevées (2 à 3 % en surface et 0,6 à 0,8 % vers 50 cm) : l'activité microbiologique est bonne (C/N = 13 à 9).

La répartition des fractions granulométriques montre une accumulation d'argile sous la nappe de gravat dans le cas de la bananeraie mais pas pour la forêt. Cependant ce « ventre » s'efface si on considère la somme des fractions argile + limons fins (0 à 20 microns). S'agit-il d'un lessivage classique ou d'un appauvrissement favorisé par la faune ou par la culture ? L'horizon graveleux pose aussi quelques pro-

TABLEAU I

Fiche analytique. Profil Teké. Case Erlo 1967

		1	2	3	4	5	6	7	8
Granulométrie en 10 ⁻²	Horizon								
	Profondeur maximale (cm)	0-5	5-30	30-75	90-140	160-170	180-200	240-260	280-320
	Refus (%)	2	10	50	7	5	3	3	2
	Argile	9,5	13,3	36,3	41,9	45,3	46,9	47,4	25,1
	Limon fin 2 à 20 µ	4,1	6,7	9,2	13,2	18,4	19,3	25,9	29,4
	Limon grossier 50 à 200 µ	11,7	10,5	8,0	7,7	6,1	4,9	5,5	6,9
	Sable fin 50 à 200 µ	34,3	26,9	19,6	17,3	13,7	11,9	8,6	16,6
	Sable grossier	40,4	42,5	25,8	21,1	18,6	17,4	13,4	21,4
Matières organiques en 10 ⁻³	Carbone	11,36	4,94	3,28					
	Azote	0,92	0,52	0,31					
	Acides humiques	1,29	0,27	0,10					
	Acides fulviques	1,43	1,14	0,98					
Acidité	pH eau 1/2,5	4,5	5,0	5,0	5,1	4,9	5,2	5,2	
Cations échangeables en mé	Calcium Ca ⁺	0,58	0,12	0,11	0,20	0,07			
	Magnésium Mg ⁺⁺	0,50	0,18	0,21	0,30	0,40			
	Potassium K ⁺	0,11	0,03	0,03	0,03	0,03			
	Sodium Na ⁺	0,03	0,02	0,03	0,04	0,03			
Acide phosphorique en 10 ⁻³	Capacité d'échange	4,80	3,40	4,49	5,76	7,29			
	Phosphore total	0,45	0,65	0,85	0,69	0,18	0,09	0,50	0,08
Eléments totaux (triacide) en 10 ⁻²	Phosphore assimilé Olsen	0,04	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01		0,01
	Perte au feu	2,15	2,50	5,45	7,25	8,05	9,20	8,75	6,70
	Résidu	85,90	81,20	58,00	40,20	31,30	23,60	25,10	41,70
	Silice SiO ₂	8,60	10,90	20,50	26,10	29,60	31,50	34,90	27,20
	Alumine Al ₂ O ₃	2,44	3,98	8,51	11,93	14,91	17,59	18,64	12,70
	Fer Fe ₂ O ₃	1,90	1,85	5,85	11,95	12,80	14,45	9,35	7,95
en mé	Titane TiO ₂	0,43	0,47	0,63	0,73	0,70	0,80	0,87	0,77
	Calcium Ca ⁺⁺	1,30	0,54	0,70	0,45	0,10	3,35	4,88	
	Magnésium Mg ⁺⁺	1,10	2,90	7,80	4,30	1,50	3,70	3,60	
	Potassium K ⁺	1,18	1,75	2,65	2,15	1,95	2,06	1,80	
	Sodium Na ⁺	0,72	0,68	0,68	0,70	0,60	1,00	0,65	
Structure et caractéristiques hydriques	pF 2,5	13,36	14,53	30,59	35,73	39,43	40,85	41,37	36,90
	pF 2,7	11,16	13,54	30,38	32,90	38,83	40,97	40,90	35,81
	pF 3	8,04	11,39	26,98	31,94	37,06	40,31	40,57	34,78
	pF 4,2	5,53	6,06	14,75	20,62	23,11	23,58	22,70	12,45
	Instabilité structurale	0,49	2,98	4,78	2,90	3,02	3,56	5,04	7,30
	Perméabilité	6,52	2,05	0,14	1,77	0,79	0,49	0,34	0,50
		S. bases éch. (mé)	1,22	0,35	0,38	0,57	0,63		
	Taux de saturation (%)	25,4	10,3	8,4	9,8	7,3			
	Mat. organiques (en 10 ⁻³)	19,60	8,52	5,66					
	C/N	12,4	9,5	10,6					
	Taux c. humifié (%)	23,9	28,5	32,9					
	Ac. ful./acc hum.	1,1	4,2	10,0					

blèmes. S'agit-il simplement de la concentration sur place des éléments grossiers suite à la remontée sélective des particules fines par la faune ou faut-il faire intervenir une succession de phases géomorphologiques ?

L'objet de cette étude ne couvre pas l'héritage géomorphologique de ces sols probablement très anciens mais vise plutôt leur potentialité d'évolution actuelle en fonction du climat, de la végétation et des interventions humaines.

2. LE DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Les dispositifs permettant de mesurer sur le terrain l'érosion, le ruissellement et le lessivage oblique (case Erlo), ainsi que le drainage vertical (case DV) ont été décrits ailleurs (Roose, 1968 ; Roose et des Tureaux, 1970). Rappelons qu'il s'agit de lysimètres respectant le mieux possible l'architecture des porosités du sol en vue de l'étude des charges solubles et solides des eaux de ruissellement et de drainage.

Au bas d'une parcelle de 14 % de pente (100 m² sous bananeraie et 200 m² sous forêt) furent mesurés dans deux fosses, le ruissellement, l'érosion et les eaux circulant obliquement à l'intérieur du sol. Dans l'une des fosses, un canal de ruissellement dirige les eaux vers deux cuves de stockage reliées par un partiteur. Dans l'autre fosse, la face amont a été étançonée à l'aide de planches en Iroko enrobées de résine ; des fentes de 15 cm de profondeur ont été creusées

dans le sol à des niveaux intéressants (30-80-150 et 180 cm de profondeur) pour y fixer des gouttières plastifiées reliées à des jerrycans de 60 litres. Du sable grossier de quartz lavé et tassé maintient les gouttières et assure un bon contact avec le sol et les gouttières. L'ensemble est couvert d'un toit de tôles. Le mur amont étant protégé des eaux de pluie par le toit et des eaux de ruissellement par le canal, les eaux qui s'écoulent dans les gouttières proviennent nécessairement d'une nappe d'eau libre s'écoulant obliquement.

Un pluviographe à augets basculant (CERF) enregistre la hauteur cumulée des pluies en fonction du temps, ainsi que celles des irrigations.

Les cases de drainage vertical (voir figure) consistent en monolithes de terre non remaniée enfermés dans des cylindres de tôles galvanisées ($\varnothing = 63$ cm) enfouis progressivement jusqu'à un grand entonnoir rempli de sable grossier lavé ; celui-ci est muni d'un orifice de drainage relié par un tube plastique à un jerrycan

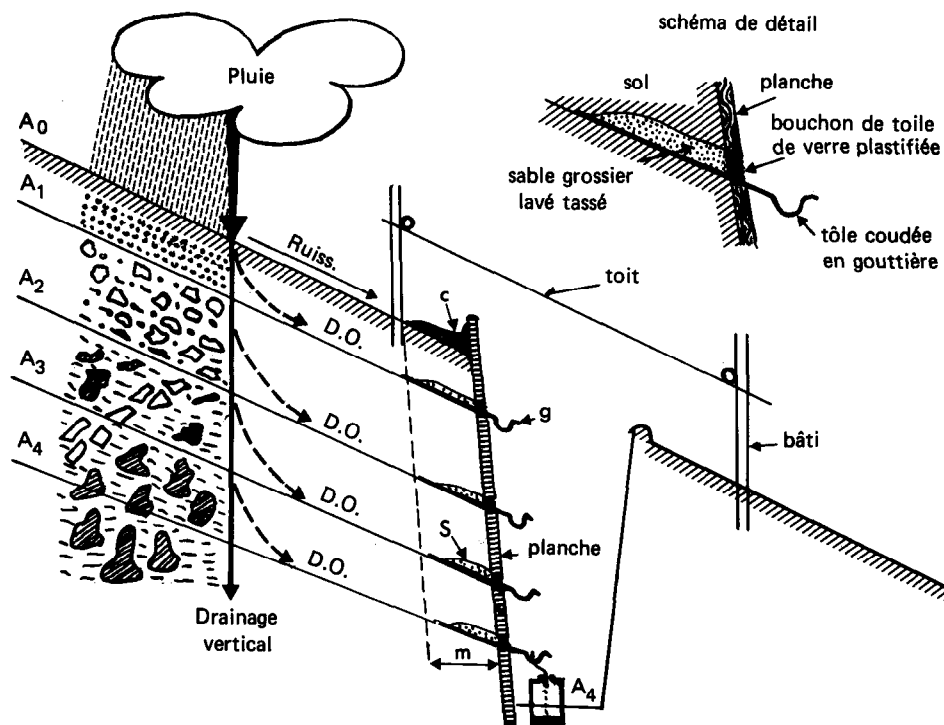


FIG. 4. — Schéma d'une case de lessivage oblique. Pluie, ruissellement, drainage oblique (D.O.) et vertical, toit de tôle, canal de ruissellement (c) vers cuves avec partiteur, fentes remplies de sable grossier lavé (S), gouttières plastifiées (g), mur du sol (m) protégé des pluies et du ruissellement par le canal c, planches de soutènement en IROKO plastifié.

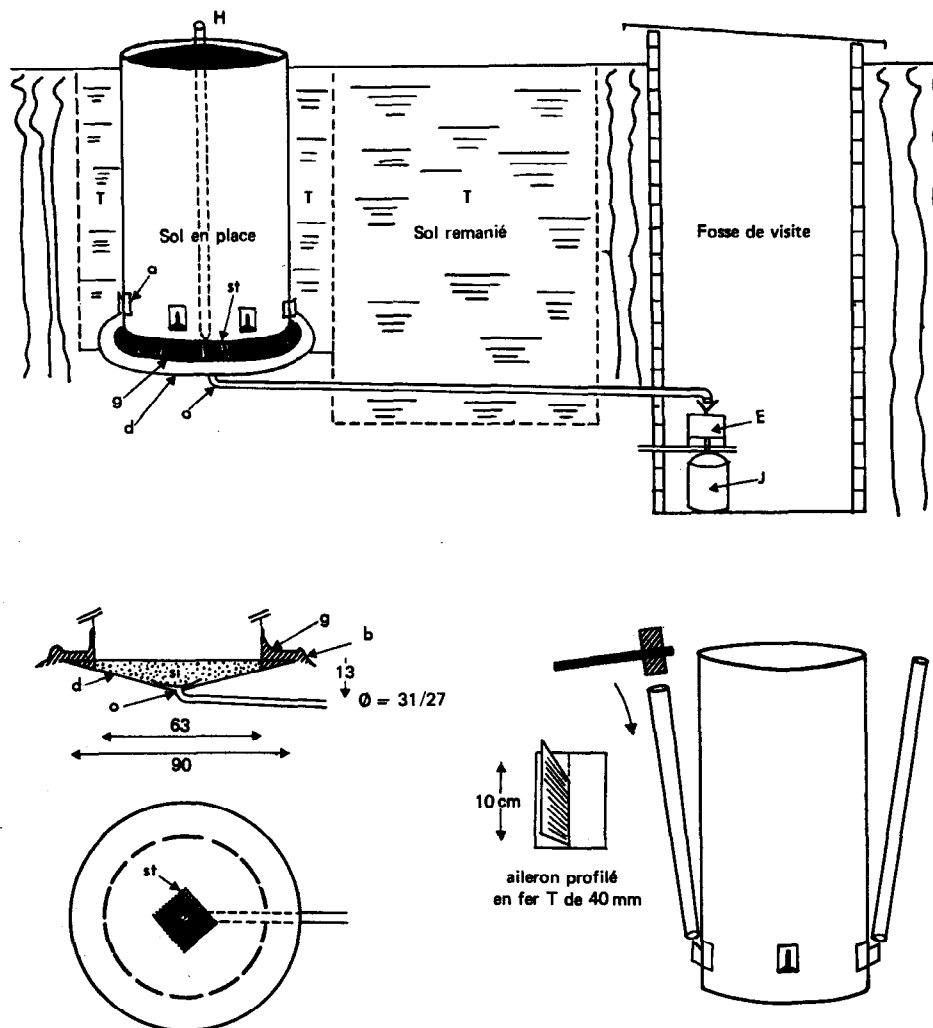


FIG. 5. — Schéma d'un lysimètre monolithique cylindrique. T : tranchée temporaire (sol remanié) ; g : joint de goudron ; d : drain en entonnoir ; st : sable et toile en nylon protégeant l'orifice de drainage o ; E : enregistreur à godet ; J : jerrycan 60 litres ; H : tube d'accès pour sonde à neutrons et à rayons gamma ; a : aileron ; b : bourrelet en argile pour couler le goudron.

en plastique situé dans une fosse permanente de visite. L'étanchéité du fond et le bon contact sol/tôle sont assurés par du goudron coulé à chaud. Pour des raisons pratiques la profondeur des cylindres est d'environ 50-100-150 et 200 centimètres.

Pour évaluer l'évolution du stock d'humidité du sol à l'aide d'une sonde à neutrons, un tube en aluminium de 250 cm a été implanté au bas de chaque parcelle et un 3^e à mi-pente sous forêt jusqu'à 6 mètres. Des mesures ont été effectuées périodiquement par le service des radioisotopes pendant deux années.

Ces dispositifs présentent un certain nombre d'inconvénients inévitables dont le manque de précision concernant la circulation des eaux (Erlo), la rupture de tension capillaire au niveau de la tôle réceptrice (Erlo et DV), l'isolement du réseau racinaire dans un faible volume (DV) et la difficulté de mesure des précipitations arrivant réellement dans les lysimètres sous la voûte forestière ou bananière (DV). Cependant, l'incidence de ces imperfections est relativement faible parce que les concentrations varient peu lors des averses principales et les flux liquides ont été calculés

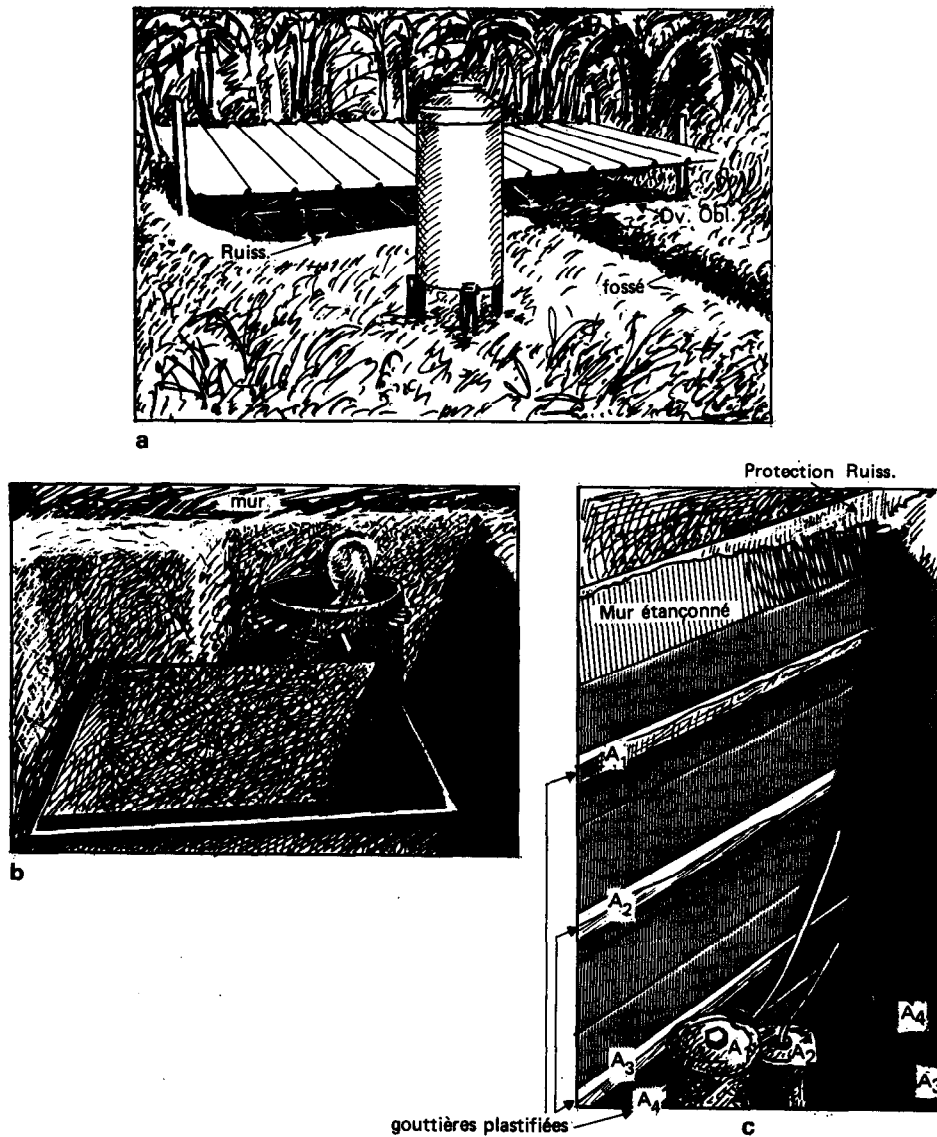


FIG. 6. — Vue de la case ERLO dans la bananeraie d'Azaguié.

a) pluviographe ; b) case d'érosion avec un fût piège à sédiment, partiteur et deuxième cuve de stockage ; c) dispositif de drainage oblique à quatre niveaux aboutissant à des bidons de 60 l.

par ailleurs ; il est donc raisonnable de tenter une évaluation des migrations des éléments en solution ou en suspension colloïdale.

Les remontées de terre par les vers ont été estimées dans 15 placettes de 1 m^2 délimitées par 2 piquets de

fer permanents et un cadre mobile (Roose, 1976). Les parcelles furent groupées par trois à cinq niveaux de la toposéquence sur le plateau, la pente et en bordure du bas-fond. Les prélèvements furent effectués à partir d'octobre 1970 pendant 3 ans, en moyenne 5 fois l'an, à des périodes saisonnières caractéristiques.

3. LES RÉSULTATS CONCERNANT L'ÉROSION

Nous examinerons les éléments relatifs aux précipitations et au ruissellement qui constituent les paramètres hydriques de l'érosion, puis nous présenterons les chiffres concernant l'érosion mécanique elle-même.

3.1. Les précipitations à Azaguié

Elles sont observées depuis plus de 35 ans au poste Asecna et depuis 1951 au poste météo de la station IRFA. De plus, nos parcelles dotées d'un pluviographe à augets et de deux pluviomètres de 1966 à 1973 (voir annexes de Roose, Godefroy, 1977).

3.1.1. HAUTEURS DES PRÉCIPITATIONS

Selon Girard et coll. (1971) les précipitations annuelles atteignent 1 770 mm en moyenne, et la médiane 1761 mm sur 31 ans

fréquence (ans)	1/5 ans	1/10 ans	1/20 ans	1/100 ans
année humide :				
hauteur (mm)	2 030	2 178	2 305	2 563
année sèche :				
hauteur (mm)	1 518	1 400	1 309	1 147

De 1966 à 73 à la bananeraie de l'IRFA, les précipitations ont varié de 1 450 mm à 2 041 mm, autour d'une moyenne de 1 670 mm. Les observations portent donc sur une année humide de retour 8 ans (1968),

sur 4 années moyennes et trois années sèches de retour 5 à 10 ans. Tous les mois, il peut pleuvoir plus de 100 mm, mais les périodes les plus humides ont lieu d'avril à juillet. En 1968, les précipitations furent assez exceptionnelles tant par leur hauteur (plus de 100 mm/mois de février à novembre) que par leur répartition (pas de petite saison sèche en août). Sur 118 jours pluvieux par an, plus de 70 ne dépassent pas 10 mm, moins de 10 pluies dépassent 40 mm : deux pluies en 8 ans ont atteint 153 mm et 166 mm. Girard et coll. (1971) ont calculé la hauteur des averses journalières pour diverses fréquences au poste Asecna d'Azaguié.

fréquence (an)	1	2	5	10	20	50	100
hauteur averse (mm)	78	91	107	120	132	150	163

Les averses observées semblent légèrement plus importantes que celles calculées par ces auteurs mais nettement plus modestes qu'à proximité de la mer (Roose et al., 1970).

3.1.2. INTENSITÉ DES AVERSES REMARQUABLES (voir tabl. II)

Elle dépasse fréquemment 120 à 160 mm/h pendant quelques minutes, 60 à 90 mm/h pendant 30 mn, et 40 à 70 mm/h pendant 1 heure. Les valeurs calculées par Brunet-Moret (1967), pour les intensités observées chaque année sont voisines des nôtres, mais celles des averses décennales sont largement plus élevées, ce qui n'est pas étonnant puisque nous n'avons que 6 années d'observations durant une période assez sèche et qu'il pleut moins à Azaguié qu'à Abidjan.

TABLEAU II

Hauteur et intensité des averses

	Hauteur (mm)	Intensité en mm/h pendant						
		5 mn	10 mn	20 mn	30 mn	45 mn	60 mn	180 mn
Bananeraie d'Azaguié								
chaque année	50 à 80	120 à 160	100 à 130	80 à 100	60 à 90	50 à 80	40 à 70	15 à 25
tous les 6 ans	114	196	148	126	114	81	76	31
Abidjan aéro								
(28 ans)*								
1 an	135	144	126	—	92	—	66	30
10 ans	230	228	204	—	130	—	102	42

* Brunet-Moret (1967) pour le poste Abidjan aéro (28 ans).

3.1.3. INDICE D'AGRESSIVITÉ CLIMATIQUE (R_{USA})

Il a été défini par Wischmeier (1962) comme la somme des produits de l'énergie cinétique des pluies d'une période par leur intensité maximale en trente minutes [$R_{USA} = \Sigma (Ec. I_{30})$] (*).

A Azaguié, nous avons dépouillé six années d'enregistrement pluviographique journalier. Il en découle qu'il y a deux types d'averses comme à l'Anguédédou (Roose 1970) ; les averses de Mousson survenant de juin à septembre pour lesquelles la fonction $R = f$ (hauteur) est rectilinéaire et les averses orageuses d'octobre à mai plus courtes mais plus violentes et dont cette fonction est curvilinéaire et beaucoup plus redressée.

Durant la période d'observation, l'indice d'agressivité climatique annuel (R_{USA}) varie de 655 à 1 308 autour d'une moyenne $R_{am} = 873$ pour des précipitations moyennes de Ham = 1 668 mm. Le rapport $R_{am}/Ham = 0,532$. Or, Roose (1975) a montré qu'en dehors des zones montagneuses, ce rapport varie en Afrique de l'Ouest autour de $0,50 \pm 0,05$, ce qui lui a permis de publier un schéma de répartition de cet indice pour l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest. En se basant sur la hauteur moyenne des précipitations à Azaguié (H moyen/40 ans = 1 770 mm) il peut être admis que l'indice annuel moyen ($R_{am} = 885$) est

très élevé (aux USA R varie de 50 à 650) mais moins qu'à Abidjan.

Notons que les variations de l'indice d'agressivité climatique sont fortes d'une année à l'autre (écart type = 210, coeff. var. = 0,24) et qu'il serait utile de compléter nos informations pour pouvoir baser la lutte antiérosive non plus sur des moyennes, mais sur l'agressivité de phénomènes pluvieux exceptionnels de récurrence décennale ou centennale.

3.2. Le ruissellement

Sous forêt, le ruissellement annuel diminue en fonction de la répartition des averses de 5,5 % en 1968 à 0,4 % en 1973 (médiane = 2 %) ; lors des averses unitaires, il atteint couramment 1 à 10 %, mais les coefficients maxima ne dépassent guère 30 à 40 %. Ces ruissellements mesurés au bas d'une parcelle de 200 m² sont nettement inférieurs aux coefficients d'écoulement observés dans trois bassins versants de 27 à 53 km² situés sur schistes dans la même région (tabl. III : Girard et coll., 1971). Les différences s'expliquent par la présence dans les bassins versants d'écoulements hypodermiques, de vidange de nappe, de cultures et de sols différents, en particulier les sols hydromorphes des bas-fonds constamment saturés d'eau.

TABLEAU III

Ruissellement	Surface (km ²)	Indice pente	Pluies annuelles (mm)	Coefficients écoulement annuel	Coefficients écou. max.		Seuil hauteur pluie min. (mm)	Végétation
					annuel	décennal		
Erlo Téké	0,0002	14 %	1 450-2 050	0,4- 5,5	4-20 %	40 %	25	Forêt dense 100 %
Erlo Azaguié	0,0001	14 %	—	5,5-12	25-60 %	70 %	17	Bananraie
B.V. Bafo*	26,8	6,5	1 671-1 885	31,5-31	45	65	—	Forêt dense 90 %
B.V. Sitou*	28,8	5,4	1 727-1 790	27,2-29,6	50	70	—	Forêt claire + café
B.V. Manso*	92,5	3,2	1 716-1 850	31,8-29,9	40	60	—	Forêt dense 70 %

* Selon Girard, Sircoulon et Touchebouf (1971).

Sous-bananeraie, le ruissellement est nettement plus élevé que sous forêt : il varie de 6 à 12 % en moyenne annuelle (médiane = 9 %), atteint souvent 30 % et même 70 % lors des averses exceptionnelles. De plus,

(*) Pour plus de détails les lecteurs voudront bien se reporter à Roose 1975 et 1977.

il se manifeste plus souvent sous bananeraie et après un seuil nettement moins élevé (17 mm au lieu de 25 mm) de hauteur de pluie que sous forêt. Les causes de ces différences sont multiples : tassement et détérioration des propriétés physiques du sol sous bananeraie (Godefroy, 1974) ; feuillage moins couvrant, humidité du sol relevée par les irrigations.

Le ruissellement sur les sols issus de schiste est nettement plus élevé que sur granite (Roose, 1970) et sur les sédiments argilo-sableux tertiaires de la région d'Abidjan dans des conditions semblables de couverture végétale et de climat (Roose, 1968 ; Roose *et al.* 1970) ; les mesures sur bassins versants confirment nos observations sur petites parcelles.

3.3. L'érosion mécanique

Sous-forêt, l'érosion moyenne (terre de fond + suspension) est de l'ordre de 150 kg/ha/an comme sous la forêt secondaire d'Adiopodoumé (pente 23 %) et sous les hévéas de l'Anguédédou (Roose, 1971 et 76), deux stations sur sables tertiaires. La turbidité des eaux de ruissellement par contre (700 mgr/l) n'est pas loin du triple des valeurs observées sur le bassin sédimentaire, ce qui s'expliquerait par la masse des turricules qui dominent la litière protectrice (remontée : 50 t/ha/an : Roose, 1976).

Sous bananeraie, l'érosion oscille entre 0,7 et 4,5 t/ha/an autour d'une moyenne de 1,8 t/ha/an. Elle est donc 10 à 20 fois plus élevée que sous forêt, mais elle reste encore modérée par rapport aux valeurs observées sous d'autres cultures (maïs Adiopodoumé $E = 15$ à 80 t/ha/an sur pente de 7 %) grâce au paillage à la plantation et aux nombreux résidus de culture qui jonchent le sol toute l'année. Il faut cependant signaler que « les cailloux poussent », du fait de l'érosion sélective des particules fines et des labours au trident. Les analyses de l'horizon labouré (25 cm) effectuées par Godefroy montrent que les teneurs en éléments grossiers (plus de 2 mm de \varnothing) sont passés de 0-2 % sous forêt à 10-15 % sous bananeraie en 1964 et à 20-25 % dix ans plus tard : il serait donc prudent de prévoir un léger paillage lorsque le sol est dénudé et à l'époque des pluies violentes, tout au moins sur les parcelles dont l'horizon meuble est le moins épais.

L'érosion potentielle à laquelle il faut s'attendre au cas où le sol serait dénudé est très élevée. Elle peut être estimée de 800 à 1 800 t/ha/an à partir de l'équation « USLE » de Wischmeier (voir Roose 1973, 75 et 76) $E = R.K.SL.C.P.$ où l'érosion E (t/ha/an) est une fonction multiplicative de cinq facteurs :

R : l'indice d'agressivité climatique = 885 en moyenne à Azaguié ;

K : indice de résistance du sol = 0,18 à 0,22 en fonction des teneurs en matières organiques ;

SL : indice topographique = 2,28 à 4,18 pour une pente de 14 % dont la longueur augmente de 30 à 100 mètres ;

C : couverture végétale = 1 si sol nu et voisin de 0,01 sous bananeraie et 0,001 sous forêt ;

P : pratiques antiérosives = 1 si aucun aménagement.

L'érosion est donc faible tant que le sol reste couvert, mais en cas de dénudation inconsidérée en période de fortes pluies, on peut s'attendre au décapage des dix premiers centimètres du sol en 1 an : l'érosion potentielle est très élevée.

4. ESSAIS DE BILAN HYDRIQUE

Il ne nous est pas possible d'établir un bilan hydrique précis, car il manque les données d'évapotranspiration réelle. Nous passerons donc en revue les données d'observations, puis nous tenterons de schématiser le bilan hydrique pour les deux couvertures végétales étudiées en année moyenne, sèche et humide à partir des données mensuelles et d'une estimation par excès de l'ETR.

4.1. Mesure des divers éléments du bilan hydrique

4.1.1. LES PRÉCIPITATIONS

Nous disposons des observations journalières à la bananeraie d'Azaguié de 1966 à 73 (voir tabl. 2.1 à 2.8, Roose et Godefroy, 1977), et des moyennes mensuelles au poste Asecna (Girard et coll., 1971). Les précipitations annuelles retenues s'élèvent à 1 767 mm pour la moyenne, 2 052 mm pour l'année humide (observée en 1968) et 1 468 mm pour l'année sèche (observée en 1972).

4.1.2. LE RUISSÈLEMENT

Nous retiendrons une valeur moyenne de 2 % sous forêt et 7 % sous bananeraie et les valeurs observées en 1972 et 1968 respectivement pour les années sèches et humides.

4.1.3. LE DRAINAGE OBLIQUE

Des eaux qui se sont infiltrées dans le sol, une partie recharge la réserve hydrique et l'excédent draine verti-

TABLEAU IV

Drainage oblique (DO)	Drainage oblique		Précipitations (P en mm)	Coefficient de drainage oblique sur 2 m DO/P	
	(l)	(mm)		moyen annuel	max. pour 1 averse
Forêt :					
médiane	225	3	1 535	0,2 %	2 %
maximum	581	7,3	1 450	0,5 %	4 %
Bananaïe :					
médiane	> 1 615	26	1 478	1,8 %	12 %
maximum	> 3 700	111	2 051	5,4 %	23 %

calement. Mais lorsque l'intensité de l'infiltration est supérieure à la perméabilité d'un horizon, il se forme au-dessus de celui-ci une nappe temporaire d'eau libre susceptible de s'écouler à l'intérieur du sol vers les points bas de la toposéquence : c'est le drainage oblique que nous avons essayé d'intercepter dans deux cases Erlo.

Sous la *forêt du Téké*, à 85 m du sommet de la coline, nous avons recueilli sur une tranche de 180 cm de profondeur et 2 m de largeur de 53 à 581 litres, soit en moyenne 225 litres ou 3 mm, ou 0,2 % des pluies annuelles ; pour une averse unitaire, il nous est arrivé de recueillir 2 à 4 % des précipitations. Ces valeurs très modestes sont voisines de celles qui ont été observées sur les sables tertiaires (Roose *et al.*, 1970).

Sous *bananaïe irriguée*, à 20 m d'un drain profond de 2 m, le drainage oblique a atteint plus de 1 600 l en moyenne, soit 1,8 % des précipitations moyennes annuelles (*Kobl.* max. = 5,4 %) et 12 à 23 % des averses unitaires : c'est la station du réseau de l'ORSTOM en Afrique de l'Ouest où le drainage oblique fut le plus abondant et c'est également la seule où l'irrigation a maintenu l'humidité du sol près de la capacité au champ tout au long de la saison sèche.

Notons que c'est dans les argiles tachetées que les eaux circulent le plus obliquement et non dans la nappe de gravat comme on pourrait s'y attendre. Sous forêt les premiers écoulements obliques se manifestent dans les horizons superficiels ; ce n'est que lorsque tout le profil est réhumecté que les écoulements se manifestent dans l'ensemble du profil et plus particulièrement dans les argiles tachetées. Par contre, sous *bananaïe irriguée*, le sol est humide toute l'année et on peut observer des écoulements dans l'ensemble du profil dès que survient une averse importante.

Deux phénomènes sont donc superposés : le drainage oblique dans les horizons superficiels les plus perméables et des mouvements obliques au sommet d'une nappe dont le toit remonte temporairement au-dessus de l'argile tachetée une vingtaine de fois dans l'année et une dizaine de fois jusqu'à 30-40 cm de profondeur. L'irrigation joue donc un rôle majeur en remontant le toit de la nappe et en supprimant les phénomènes d'hydrophobie des horizons superficiels du sol (faible mouillabilité des matières organiques et bulles d'air emprisonnées dans les macropores en fin de saison sèche).

4.1.4. LE DRAINAGE VERTICAL

Il a été mesuré pendant 3 ans dans deux séries de lysimètres monolithiques non remaniés, profonds de 50 à 180 cm, à ruissellement forcé par les bordures débordant au-dessus de la surface du sol, placés sous le dôme forestier et/ou au pied de deux touffes de bananiers.

Sous *forêt*, le drainage observé dans les lysimètres est très abondant puisqu'il dépasse 78 % des précipitations la 1^{re} année et ne cesse de croître ensuite. Ces résultats s'expliquent par la limitation de l'ETR à celle du sous-bois et par l'interception de plus en plus large des pluies lors de la croissance du feuillage en dehors des lysimètres. Contrairement à ce que nous avons observé ailleurs, le drainage fut systématiquement plus fort dans les lysimètres les moins profonds (TDV1 > 2 > 3 = 4).

Sous *bananaïe irriguée*, le drainage vertical (36 %) est beaucoup moins abondant que sous forêt car l'irrigation en saison sèche favorise surtout l'ETR. Remarquons que les fortes variations des volumes drainés sont aléatoires et dépendent plus de l'interception

des pluies par les larges feuilles des bananiers que de la profondeur des lysimètres. Le drainage est concentré sur une courte période de l'année (mai-juin-juillet et

parfois octobre-novembre) durant laquelle les pertes par lixiviation peuvent être très élevées : il faudra en tenir compte lors du planning de fertilisation.

TABLEAU V

Drainage lysimètres	Forêt secondaire					Bananeraie irriguée				
	Pluie mm	Ruiss. mm	Drain. brut mm	Drain.-Ruiss.		Pluies + Irri. mm	Ruiss. mm	Drainage		
				mm	% des pluies			brut mm	Corrigé mm	%
1971	1 469	19	1 163	1 144	78 %	1 669	96	762	666	43 %
1972	1 450	8	1 362	1 354	93 %	1 564	146	864	678	43 %
1973	1 784	7	2 005	1 998	112 %	1 872	114	591	477	25 %
Moyennes ..	1 568	11	1 510	1 499	95,6 %	1 702	119	725	606	35,6 %

Telle quelle, la méthode des petits lysimètres n'est pas adaptée à la mesure du drainage sous forêt et sous bananeraie à cause de l'hétérogénéité des pluies traversant le dôme feuillu, de la répartition des racines et de la limitation de l'ETR. Les résultats peuvent être améliorés en adoptant une seule profondeur (150 cm), quatre répétitions minimum et en laissant ouvert les 50 premiers centimètres du sol où se développent 75 % du réseau racinaire. Ces lysimètres nous ont cependant été utiles pour disposer de quantités d'eau de drainage suffisantes pour suivre l'évolution chimique de ces eaux.

4.1.5. EVOLUTION DU STOCK D'EAU DU SOL (HUMIDIMÈTRE A NEUTRONS)

Des mesures hebdomadaires d'humidité du sol (2 tubes de 250 cm et un de 6 m) ont été effectuées du 10 décembre 1969 au 16 août 1972, à l'aide d'un humidimètre à neutrons (HP 110 associé à une IP 110 jusqu'en décembre 1970, puis Hp 310 avec une échelle de comptage EC 310), par le laboratoire des Radio-isotopes d'Adiopodoumé (*). Les résultats montrent que :

— 70 % des variations d'humidité ont lieu sur 40 cm sous bananeraie et 120 cm sous forêt.

(*) Laboratoire des Radio-isotopes installé par le CEA au Centre ORSTOM d'Adiopodoumé. Nous remercions vivement MM. Lespinat, Marini, Bois pour leur active collaboration, ainsi que MM. Guyon et Blanc qui ont assuré l'entretien du matériel.

— l'eau utile (profils ressuyés moins profils secs moyens) s'élève à 40 mm sous bananeraie et 200 mm sous forêt.

— l'ETR sous forêt varie de 2,6 mm/jour en saison sèche (4-11-70 à 24-2-71) à 4-5 mm, en avril-mai puis baisse à 0,5-1 mm en juin-juillet pour remonter à 2-4 mm/jour d'août à décembre.

Huttel (1975) a trouvé des chiffres voisins d'évapotranspiration réelle sous forêt : 2,5 mm/jour en moyenne annuelle au Banco et 3,2 mm/jour à Yapo. Cependant dans cette zone tropicale humide, les profils ne se recoupent pas parfaitement en profondeur ; on a constaté par exemple sous forêt des différences d'humidité de 2 à 5 % jusqu'à 6 m de profondeur. Ceci peut s'interpréter de diverses façons :

- erreurs de manipulation (lecture de profondeur), de l'appareil, défaillance de l'alimentation électrique ou de l'électronique, évolution du point de repère ;
- eau de drainage en transit plus ou moins rapide vers la nappe profonde ;
- existence de deux capacités au champ l'une en saison sèche (présence de bulles d'air) et l'autre en fin de saison des pluies, 10 à 20 % plus élevée que la 1^{re}.

4.1.6. L'ÉVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE (ETP)

L'évapotranspiration d'un couvert végétal est dite potentielle quand l'énergie disponible pour la vaporisation est le seul facteur limitant. Les valeurs men-

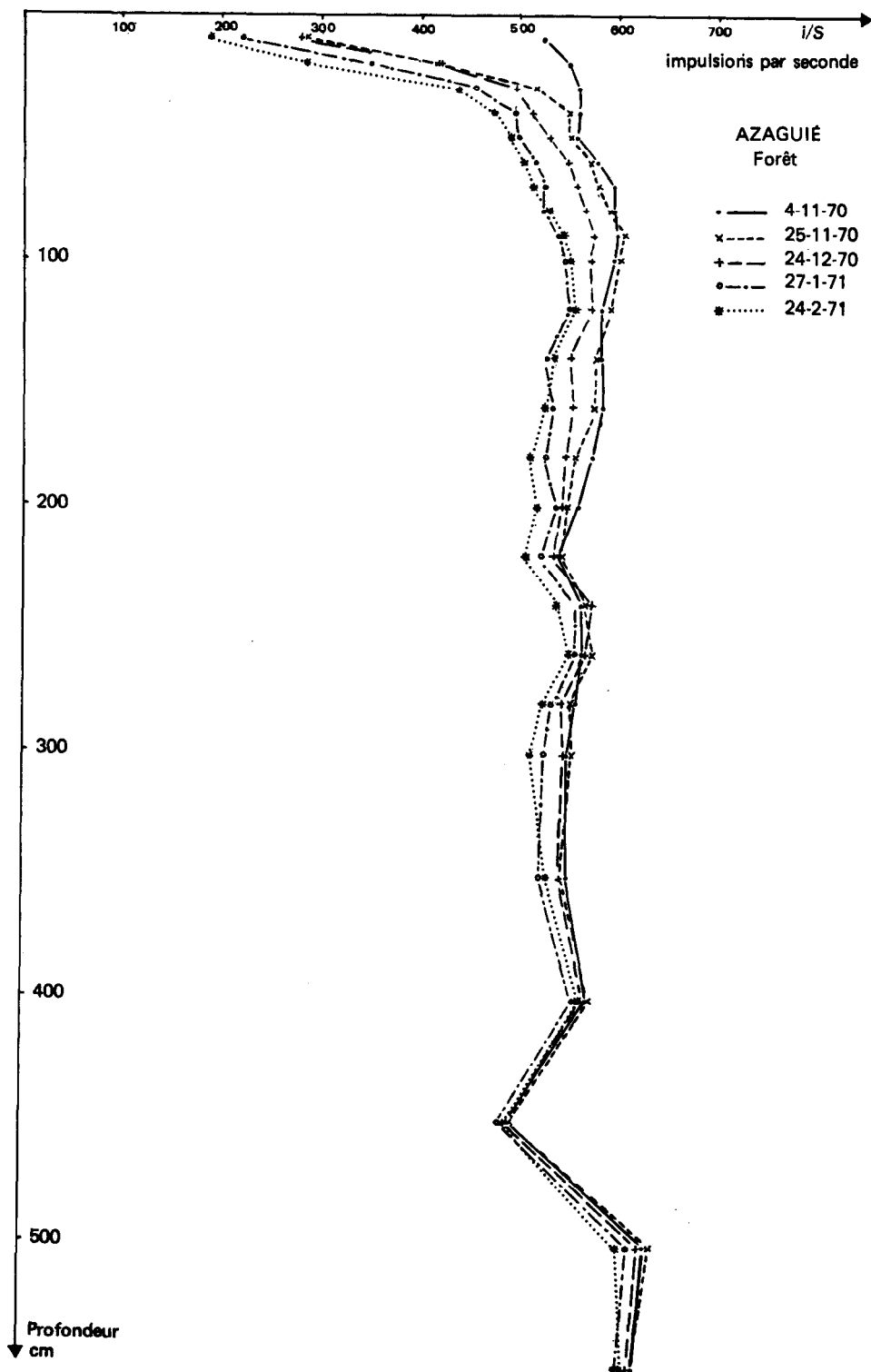


FIG. 7. — Evolution du stock d'eau du sol sous forêt Téké, selon Bois-Roose, 1976.

suelles moyennes de l'ETP calculées selon la formule de Turc (Eldin, 1971) passent de 120-125 mm/mois d'octobre à mars à 140-145 mm en avril-mai, puis redescendent à 80-95 mm/mois de juin à septembre. L'ETP moyenne annuelle varie autour de 1 300 mm (soit 75 % des précipitations) en fonction des auteurs et des périodes d'étude.

4.2. Schémas de bilans hydriques annuels calculés et discussion

Ils ont été calculés mensuellement à partir de la formule générale [Pluie + Irrigation = Ruiss. + Drain. + ETR ± var. stock du sol], dans laquelle

pluie, irrigation et ruissellement ont été mesurés tandis que ETR et drainage sont estimés à partir de ETP Turc mensuellement. Le drainage est considéré comme la différence de (pluie + irrigation) moins (ruissellement + ETP). En saison sèche, ETP est supérieure à pluie + irrigation et il n'y a pas de drainage. Par contre, en saison humide, ETR tend vers ETP et le drainage = (pluie + irrigation) - (ETP + ruiss.) aux variations d'humidité du sol près. A l'ETR brute annuelle ainsi évaluée, il faut ajouter la réserve hydrique du sol (200 mm sous forêt et 40 mm sous bananeraie) qui s'épuise en saison sèche du fait de l'évapotranspiration des plantes (ETR et Drain corrigés).

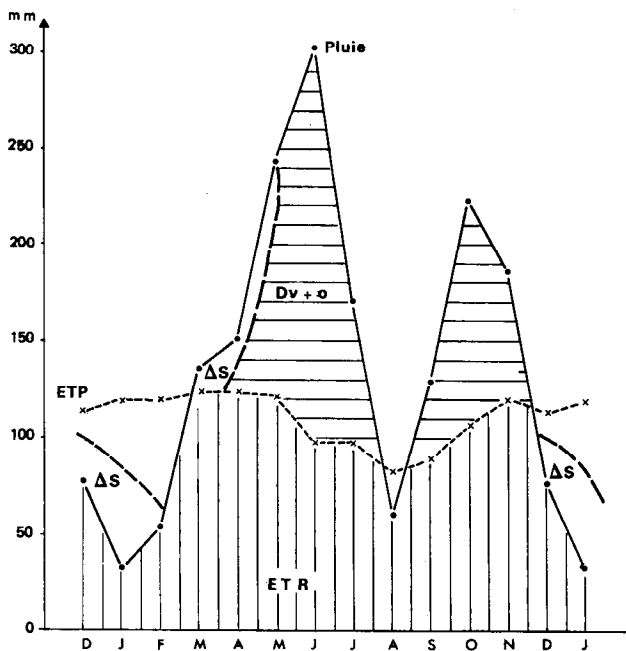


FIG. 8. — Schéma du bilan hydrique moyen sous forêt du Téké.

P : pluie ; ETR : évapotranspiration réelle calculée ; ETP : évapotranspiration potentielle calculée ; DV+o : drainage vertical et oblique ; Δs : variations du stock d'eau du sol.

Pluies (mm)	33	54	136	151	245	302	170	61	128	223	186	78	1 767	100 %
Ruiss. (mm)	0	0	2	3	5	9	3	0	3	5	4	1	35	2
ETP Turc (mm)	119	119	123	123	121	98	98	83	90	107	120	113	1 314	74
ETR estimé	33	54	123	123	121	98	98	61	90	107	120	77	1 105+200	73,9
DV estimé	0	0	11	25	119	195	69	0	35	111	62	0	627-200	24,2
DV corrigé	0	0	0	0	0	150	69	0	35	111	62	0	427	24,2

var. stock humidité du sol : 200 mm

La moyenne des bilans de 1968 à 73 s'établit comme suit :

Bilans observés	Pluie + Irrig. mm	Ruiss. %	ETR corrigé %	Drainage corrigé %	Réserve hydrique %	ETP mm
Forêt	1 648	2,7 %	71 %	26,3 %	12,1 %	1 215
Bananaeraie	1 648 + 209	7,3 %	61,8 %	30,9 %	2,1 %	1 215

Nous avons tenté de généraliser ces observations à des conditions climatiques moyennes et extrêmes pour cette région en partant des pluies moyennes observées au poste Asecna d'Azaguié sur 30 ans (Girard et coll, 1971) et des observations à la bananaeraie de 1972 pour l'année sèche et 1968 pour l'année humide de fréquence décennale. Il apparaît au tableau VI que,

lorsque les pluies annuelles augmentent de 600 mm sous forêt, l'ETP augmente de 200 mm, le ruissellement d'une centaine et le drainage de 300 millimètres.

En effet, les augmentations des précipitations ont lieu en majorité en saison humide, période où l'ETR est déjà très voisine de l'ETP.

TABLEAU VI

Bilans moyens et décennaux	Forêt dense			Bananaeraie irriguée		
	1972	Année moyenne	1968	1972	Année moyenne	1968
Pluie	1 468	1 767	2 052	1 468	1 767	2 052
Irrig.	0	0	0	+ 199	+ 210	+ 89
ETP (Turc) (mm)	1 196*	1 316*	1 375*	1 196	1 316	1 375
%	81 %	74 %	67 %	72 %	66 %	64 %
Ruiss. (mm)	19	35	108	96	138	114
%	1,3 %	2 %	5,3 %	5,7 %	7 %	5,3 %
ETR (mm)	1 175	1 305	1 370	1 130	1 316	1 275
%	80 %	74 %	69 %	68 %	66 %	60 %
Drainage (mm)	274	427	574	441	523	752
%	19 %	24 %	28 %	27 %	27 %	35 %

Notons que le ruissellement et le drainage sont plus élevés sous bananaeraie irriguée que sous forêt. Puisque le drainage se manifeste en pleine saison sèche après irrigation (20 mm tous les 10 jours en principe) il devrait y avoir moyen de réduire la dose d'irrigation en tenant compte des pluies tombées sur chaque parcelle les 4 derniers jours ; par contre, il serait profitable de déclencher l'irrigation après 4 à 6 jours sans pluie puisque les racines s'arrêtent de croître après cette période.

(*) La croissance de l'ETP en année humide est fortuite ; il s'agit de données mesurées en 1968 et 1972 tandis que la moyenne a été calculée sur 15 ans.

Le drainage moyen est supérieur aux estimations, où ETR = ETP et inférieur aux valeurs observées dans les cases lysimétriques. En définitive, nous estimons le drainage moyen

- à 515 mm soit 29 % des pluies sous forêt,
- à 630 mm soit 32 % des précipitations sous bananaeraie irriguée.

Huttel (1975) en forêt de Yapo a trouvé un drainage de 27 % des pluies pour les années 1972 et 1973 déficitaires ; il estime que le drainage moyen ne devrait pas dépasser 550 mm. L'ensemble des résultats concorde donc étroitement.

5. SCHÉMA DE BILAN GÉOCHIMIQUE

Dans ce chapitre nous tenterons de chiffrer l'importance des différents postes intervenant dans le bilan des migrations, afin d'en tirer des conclusions sur l'orientation actuelle de la pédogenèse. Pour ce schéma de bilan, nous aborderons successivement les apports par les engrais et les pluies, les pertes par ruissellement, érosion, drainage et exportations, et enfin les immobilisations dans le sol et les végétaux. Nous serons forcément très brefs en particulier sur les charges solubles dans les eaux (voir Roose, Godefroy, 1977).

5.1. Eléments du bilan

5.1.1. APPORTS PAR LES ENGRAIS

L'azote (urée puis sulfate d'ammonium) et le potassium (chlorures et sulfate) ont été épandus en 7 à 10 fractions à raison de 300 à 500 kg/ha/an d'azote et

de 400 à 800 kg/ha de potassium (K₂O) sur une couronne de 2 m de diamètre autour des pieds de bananier. Le phosphore a été fourni sous forme d'engrais complexes divers, à concurrence de 0 à 80 kg/ha/an. Pour le détail des doses et des dates d'épandage (voir Godefroy, Roose, Muller, 1970 et 75).

5.1.2. APPORTS PAR LES PLUIES ET LES EAUX D'IRRIGATION

En tenant compte des précipitations moyennes (1 770 mm), de l'irrigation moyenne (210 mm) ainsi que des teneurs moyennes pondérées observées dans des pluies par Roose à Adiopodoumé (1973), on peut constater que les apports en Ca-Mg et surtout N total (organique et minéral) se sont pas tout à fait négligeables. En traversant le feuillage d'une forêt ou d'une bananeraie, les eaux de pluie s'enrichissent surtout en K, Ca et Mg ; cependant le pluviolessivage n'est qu'une manifestation de recyclage rapide des éléments nutritifs en milieu tropical forestier.

TABLEAU VII

Pluies	Ca	Mg	K	N total	P	Mat. Org.	Sources
Adiopodoumé (1970-72) teneur en ppm							
— à découvert	1,90	0,45	0,35	1,34	0,15	1,5	Roose (1974)
— sous forêt	3,84	2,3	3,93	2,20	0,31	8,6	
Azaguié (1975) teneur en ppm							
— pluie sous bananier	3	2,4	0,13	2,5	0,07	—	Godefroy <i>et al.</i> (1975)
— irrigation	5	5	2,6	2,7	0,01	—	
Azaguié							
— apport sous forêt (kg/ha/an)	33,6	8,0	6,2	23,7	1,8	27	Roose, Godefroy (1977)
— apport sous ban. irrigué (kg/ha/an)	44,1	18,5	11,7	29,4	1,8	—	

5.1.3. COMPOSITION DES SOLUTIONS (RUISSÈLEMENT, DRAINAGE OBLIQUE ET VERTICAL)

Plus de 1 200 échantillons d'eau de ruissellement, de drainage oblique et vertical ont été analysés de 1966 à 73 dans les laboratoires ORSTOM d'Adiopodoumé et IRFA d'Azaguié (*). Au tableau VIII sont réunis les

(*) Nous tenons à remercier ici MM. Nalovic et Gouzy, chefs successifs du laboratoire d'Adiopodoumé et leurs adjoints, Mme Perraud, Gavinelli, Didier de Saint-Amand, M. Petard, ainsi qu'une nombreuse équipe de techniciens africains.

A Azaguié, le laboratoire était dirigé par M. Godefroy, très efficacement secondé de Mme Muller.

teneurs moyennes pondérées par les volumes observés, les variations totales et les valeurs les plus fréquemment rencontrées. Médianes et moyennes arithmétiques n'ont guère de sens car les teneurs diminuent presque toutes en pleine saison des pluies lorsque les volumes des écoulements sont importants.

La température des eaux est très stable ($24\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$) mais régulièrement plus faible ($1\text{ }^{\circ}\text{C}$) sous forêt que sous bananeraie. La température des eaux de pluie est plus basse que celle du ruissellement et surtout du drainage. Au cœur de la saison pluvieuse, les eaux sont plus froides qu'en saison intermédiaire.

L'acidité des eaux est très faible en général (pH = $6,5 \pm 1$) mais un peu plus forte sous bananeraie à cause des fortes doses d'engrais acidifiants employés (pH : 5 à 7,5).

La résistivité est nettement plus élevée dans les échantillons originaires de la forêt (20 000 à 43 000 ohms/cm) que dans ceux qui proviennent de la bananeraie (1 000 à 16 000 ohms/cm) : de plus, les eaux de drainage sont plus chargées que les eaux de surface et les eaux de saison intermédiaire, plus que celles recueillies au cœur de la saison des pluies.

Comparativement aux stations forestières sur sables tertiaires (Adiopodoumé et Anguédedou) et sur granite (Divo), les eaux recueillies à Azaguié sont peu minéralisées sous forêt mais beaucoup plus chargées sous bananeraie fertilisée (Roose, 1968 et 70).

Les teneurs en bases varient beaucoup en fonction des volumes écoulés, de la saison, de la profondeur des écoulements et surtout de l'usage des engrais.

Les teneurs en calcium sont faibles sous forêt (mp = 4 ppm) mais s'élèvent à 13 et 35 ppm dans les eaux de ruissellement et de drainage sous bananeraie : les risques de lixiviation du calcium sont très élevés car les plantes en consomment peu.

Les teneurs en magnésium des eaux sont toujours plus discrètes : sous forêt (mp = 0,3 et 1,5 ppm), elles restent voisines de 1 ppm tandis que sous bananeraie elles augmentent nettement en profondeur (Mg mp = 7,8-12 et 17 ppm) (*).

Le potassium est un élément très mobile en zone tropicale dans les sols riches en argile kaolinique. Sous forêt, il est rapidement absorbé par le chevelu racinaire des horizons superficiel mais sous bananeraie fertilisée, malgré un fractionnement très poussé des apports, les risques de lixiviation sont énormes (Kmp = 29-45-42 ppm).

Les teneurs en sodium sont modestes mais augmentent avec la profondeur des écoulements (forêt Na mp = 1-1,8-2,4 ppm) et avec l'usage d'engrais (bananeraie Na mp = 2,2-3,1-3,8 ppm). Ceci montre le faible rôle joué par ce cation dans le monde végétal et l'évacuation rapide du sodium dans les niveaux profonds de l'altération de la roche.

Les matières organiques dissoutes dans les eaux sont dosées par leur pouvoir réducteurs représenté en

majorité par le carbone mais aussi par les chlorures, etc. Les teneurs en oxygène nécessaire pour compenser le pouvoir réducteur sont plus élevées sous bananeraie (M.O. mp = 14-24-13 ppm) que sous forêt (mp = 9-15-10 ppm) ainsi que dans les eaux drainant dans l'horizon humifère.

L'azote présent dans les eaux a été dosé sous trois formes : N-NH₃, N-NO₂+NO₃ et N total. Sous forêt l'azote total en solution est peu important (N forêt mp = 5,4-2,3-2,2 ppm) et diminue en profondeur. La fraction ammoniacale est négligeable : les nitrates représentent 40 % et l'azote organique plus de 50 % des migrations observées. Sous bananeraie par contre l'azote est beaucoup plus abondant. Les teneurs en azote total sont élevées dans le drainage et très variables (N total ban. mp = 8,7-25-24, 5 ppm). L'N-NH₃ est peu représenté (0,5 ppm) et les nitrates représentent plus de 60 à 90 % de la totalité ; les dangers de lixiviation en azote nitrique et organique sont donc importants car ils sont peu retenus par le sol. Signalons aussi les risques de pollution des nappes qui sont reconnues impropres à la consommation humaine dès que les teneurs en nitrates dépassent 10 ppm ce qui est fréquemment le cas sous bananeraie fertilisée (Roose, 1974).

Les teneurs en phosphore sont faibles et du même ordre de grandeur sous forêt (PO₄ mp = 1,1-0,8-1 ppm) que sous bananeraie (PO₄ mp = 1,9-1,2-0,9 ppm) relativement peu fertilisée en cet élément, il est vrai. Les dangers de lixiviation du phosphore sont donc très réduits, par contre les risques de pertes par érosion sont plus sérieux car il migre essentiellement complexé avec les matières colloïdales organiques ou minérales.

Les teneurs en fer sont peu élevées et peu différentes (Fe₂O₃ mp = 0,4 à 0,3 sous forêt, 0,6 à 0,9 ppm sous bananier) en fonction du couvert végétal. Les variations saisonnières sont peu marquées.

L'aluminium est encore moins abondant (Al₂O₃ mp = 0,2 à 0,6 ppm) et moins variable dans les eaux observées.

La silice en revanche varie considérablement (0,1 à 19 ppm). Sous bananeraie (SiO₂ ban. mp = 4,7-9,6-9,4 ppm) les eaux sont significativement plus riches en silice que sous forêt (SiO₂ - forêt mp = 4-5,4-5,6) et les eaux de drainage plus chargées que les eaux de ruissellement. Par contre, les teneurs en silice ne baissent pas forcément au cours de la saison des pluies. Les teneurs élevées de silice en solution dans les eaux (dix fois plus que de fer ou d'alumine) montrent que les processus de ferrallitisation ne sont pas seulement

(*) On donne successivement les moyennes pondérées observées dans les eaux de ruissellement, de drainage dans les horizons superficiels (60 cm) et dans les horizons profonds (150 et 180 cm).

TABLEAU VIII

Caractéristiques des eaux de ruissellement de drainage recueillies sous une forêt et une bananeraie fertilisée sur schiste de la région d'Azaguié (basse Côte-d'Ivoire)

	Teneur pondérée (mg/l)			Valeurs fréquentes (mg/l)			Variation totale (mg/l)
	Ruiss.	Drainage h. supérieur	Drainage h. inférieur	Ruiss.	Drainage h. supérieur	Drainage h. inférieur	
T°							22 à 25
pH	{ forêt.....		6,8	5,7 à 7,5	6,0 à 7,0	5,8 à 6,8	23 à 26
	{ banane.....	6,6	6,3	6,0	5,5 à 7,2	5,5 à 6,2	5,2 à 7,8
R	{ forêt.....	34 000	23 000	22 500	3 000 à 43 000	8 000 à 31 000	8 000 à 29 000
	{ banane.....	7 000	3 700	3 200	3 000 à 12 000	2 000 à 4 000	1 400 à 3 500
Ca	{ forêt.....	3,6	4,3	4,1	2 à 6	2 à 9	4 à 10
	{ banane.....	13	34	35	9 à 22	22 à 51	30 à 55
Mg	{ forêt.....	0,9	1,6	1,4	0,5 à 2	1 à 3	1 à 3
	{ banane.....	7,8	1,2	17	2 à 12	6 à 20	10 à 24
K	{ forêt.....	1,4	1,3	0,9	1 à 10	0,5 à 3	0,3 à 2
	{ banane.....	29	45	42	13 à 60	20 à 60	27 à 65
Na	{ forêt.....	1	1,8	2,4	0,6 à 6	1 à 3	1,8 à 4,6
	{ banane.....	2,2	3,1	3,8	1 à 6	2 à 9	2,5 à 10
M.O.	{ forêt.....	9	15	9,7	6 à 20	5 à 20	5 à 18
	{ banane.....	14	24	13	6 à 27	14 à 35	10 à 25
N total	{ forêt.....	5,4	2,3	2,2	13, à 9	1 à 16	1 à 5
	{ banane.....	8,7	25,2	24,5	3 à 26	8 à 30	10 à 41
N-NO ₃	{ forêt.....	0,4	0,9	0,9	0,1 à 4	0,2 à 4	0,2 à 2,3
	{ banane.....	4,8	14,7	17,8	1 à 10	3 à 27	4 à 33
N-NH ₄	{ forêt.....	0,6	0,25	0,2	0,1 à 1,1	0,1 à 0,7	0,05 à 0,7
	{ banane.....	0,5	0,5	0,5	0,05 à 1,5	0,1 à 1,0	0,1 à 0,8
Po ₄	{ forêt.....	1,13	0,8	1	0,3 à 3,2	0,1 à 2,3	0,1 à 2,2
	{ banane.....	1,85	1,2	0,9	0,3 à 3,6	0,4 à 2,4	0,2 à 2,5
Fe ₂ O ₃	{ forêt.....	0,4	0,35	0,27	0,01 à 1,5	0,1 à 1	0,05 à 0,8
	{ banane.....	0,6	0,9	0,6	0,01 à 3,3	0,1 à 1,8	0,01 à 1,3
Al ₂ O ₃	{ forêt.....	0,23	0,24	0,27	0,01 à 0,4	0,03 à 0,6	0,01 à 0,60
	{ banane.....	0,2	0,6	0,4	0,01 à 1,2	0,03 à 1,1	0,03 à 0,90
SiO ₂	{ forêt.....	4	5,4	5,6	0,8 à 7,4	1,8 à 7	3 à 7
	{ banane.....	4,7	9,6	9,4	0,1 à 13	4,5 à 15	5 à 13
SO ₄	{ forêt.....	3,5	5	3,6	0,5 à 4	2,5 à 13	1,5 à 5
	{ banane.....	25	37	40	2 à 40	10 à 72	10 à 86
Cl	{ forêt.....	1,2	2,8	3,7	1 à 5,5	2,4 à 6	2,5 à 4,5
	{ banane.....	20	51	67	10 à 42	10 à 125	42 à 140

Note. Les teneurs sont exprimées en mg/l. sauf la température (degrés centigrades), le pH et la résistivité (Ω -cm).

actifs aux niveaux profonds de l'altération de la roche, mais aussi dans les horizons superficiels et dans des conditions de bonne aération et de légère acidité. Peut-être faut-il faire intervenir l'action de la microflore sur l'altération des rares minéraux altérables restant, sur la minéralisation de la litière (40 % de

SiO₂ dans les cendres) ou la solubilisation du quartz extrêmement abondant dans toute la gamme de texture. Les teneurs en fer et alumine des eaux sont très voisines sur schiste, granite et sables tertiaires ; par contre la silice est plus abondante sur granite que sur schiste et sables tertiaires (Roosc, 1968, 70 et 70).

Les carbonates n'ont pas été dosés, puisqu'ils sont théoriquement absents pour des pH inférieurs à 8,3.

Les bicarbonates, peu étudiés, varient de 10 à 30 ppm.

Les teneurs en chlorures sont sensibles aux apports d'engrais et beaucoup plus élevées sous bananeraie (Cl^- mp = 20-51-67 ppm) que sous forêt (Cl^- mp = 1,2-2,8-3,7 ppm).

De même les sulfates sont d'excellents indicateurs de l'usage d'engrais : avec les chlorures, les nitrates et les autres engrais acidifiants très mobiles, ils entraînent le calcium et le magnésium du complexe échangeable dans les eaux de drainage et provoquent une acidification du sol qui peut atteindre 1 unité pH en 2 à 4 ans en fonction des doses et des types d'engrais utilisés. Les teneurs en sulfates sont évidemment bien plus élevées sous bananeraie (SO_4 mp = 25-37-40 ppm) que sous forêt (SO_4 mp = 3,5-5-3,6 ppm).

Les teneurs en silice, fer, alumine et phosphates ne baissent pas forcément lorsque les écoulements sont les plus abondants. A part ces exceptions, les charges

solubles baissent considérablement depuis la fin de la saison sèche jusqu'à la fin de la saison humide où les écoulements sont les plus abondants.

Notons enfin que les eaux de drainage recueillies au bas des lysimètres diffèrent légèrement des eaux de drainage oblique (Erlo). Elles sont plus pauvres en fer, alumine, potassium et matières organiques mais plus riches en calcium, magnésium et azote : ceci est probablement dû à la faible surface de ces lysimètres (donc variabilité plus forte) et aux perturbations du système racinaire moins dense.

5.1.4. LES PERTES EN SOLUBLES DANS LE RUISSELLEMENT ET LE DRAINAGE (colonnes 6+7 des tabl. IX et X)

Nous ne tiendrons compte que des pertes moyennes pour des précipitations moyennes de 1 767 mm (plus de 210 mm d'irrigation sous bananeraie) entraînant un ruissellement de 2 % et 7 % des pluies et un drainage de 29 et 32 % respectivement sous forêt et sous bananeraie.

TABLEAU IX
Schéma de bilan chimique d'une parcelle forestière dans la région d'Azaguié (kg/ha/an)

N° colonne	APPORTS		PERTES					STOCKS (kg/ha)		CYCLES INTERNES	
	Pluies	Remontée biologique	Erosion (solide) (150 kg/ha)	Ruissellement soluble (35 mm)	Drainage (soluble) (515 mm)	Total kg/ha	Soluble % du total	Végétation forêt * Yapo	Sol (30 cm) TEKE	Litière Yapo	Pluviolessivage Yapo
Carbone **	26,6	P.M.	11,9	3,2	63,9	79,0	85%	-	26.250	-	-
Azote	23,7	-	0,9	1,9	11,6	14,4	94%	800	2.405	113	10
Phosphore	1,8	-	0,1	0,1	1,5	1,7	94%	70	Ass= 22,7 Tot= 278	4	4,2
Calcium	33,6	-	0,1	1,3	21,6	23,0	99%	1900	échangeable 104	105	2
Magnésium	8,0	-	0,1	0,3	7,7	8,1	99%	180	27	23	15
Potassium	6,2	-	0,4	0,5	6,7	7,6	95%	350	74	26	82
SiO_2	17	-	30,2	1,4	28,3	59,9	50%	-	404.350	-	-
Al_2O_3	1,7	-	24,8	0,08	1,3	26,2	5%	-	325.650	-	-
Fe_2O_3	2,4	-	8,0	0,14	1,6	9,7	18%	-	81.900	-	-
SO_4	-	-	-	1,2	22,1	-	-	-	-	-	-
Cl	-	-	-	0,4	15,5	-	-	-	-	-	-
CO_3H	-	-	-	+ 7	+103	-	-	-	-	-	-
Quartz	-	-	(74)	-	-	-	-	-	-	-	-
TOTAL ...			150 kg	17,5 kg	284,8						

* Extraits de Bernhard-Reversat, 1975

** Evalués indirectement par le partage de l'oxygène consommé (bichromate)

P.M. Pour Mémoire

Erratum. ** : lire dosage au lieu de partage.

Sous forêt les pertes en solubles dans les eaux de ruissellement et même de drainage sont très réduites même pour les éléments les plus mobiles (67 kg/ha/an de matière organique, 14 kg de N, 8 kg de Mg et K, 23 kg de calcium, 23 de sulfate, 17 kg de chlorure et 30 kg de silice). Sous bananeraie fertilisée les pertes sont malheureusement 10 à 30 fois supérieures pour la Mg-K-N-SO₄-Cl et 2 à 3 fois plus fortes pour Na, PO₄, silice, fer, alumines et matières organiques. L'utilisation intensive des engrais et l'irrigation ont accéléré considérablement la lixiviation par les eaux de drainage.

5.1.5. LES PERTES PAR ÉROSION (tabl. IX et X, colonnes 5+6)

Il s'agit de migration sous forme soluble dans les eaux de ruissellement et d'éléments solides ou adsorbés

à des particules solides de tailles variées (suspensions fines ou éléments plus grossiers tractés le long de la pente) déplacés par érosion en année moyenne (érosion/forêt = 150 kg/ha/an dont 90 % de suspension ; érosion/bananeraie = 2 tonnes/ha/an dont 80 % de suspension). Sous forêt les pertes sont extrêmement réduites ; la majeure partie vient du ruissellement sauf pour le fer, l'alumine et la silice et le carbone. Sous bananeraie, les pertes par érosion ne sont plus négligeables et pourraient devenir dangereuses si l'on abandonne la pratique du paillage sur les coteaux. Dans les conditions de la bananeraie d'Azaguié fertilisée, paillée et irriguée, les pertes par érosion ont atteint 10 kg de P₂O₅, 20 kg/ha/an d'azote, 14 kg de magnésium, 22 kg de calcium, 50 kg de potassium, 134 kg de matières organiques, 100 kg d'oxyde de fer, 241 kg d'alumine et 310 kg de silice combinée (triacide).

TABLEAU X

Schéma de bilan chimique d'une culture bananière fertilisée et irriguée dans la région d'Azaguié (kg/ha/an)

	APPORTS			PERTES						STOCKS		CYCLES INTERNES
	Pluie + Irrigation	Fertilisation	Paillis	Erosion (solide)	Ruissellement	Drainage	Exportation 35 t. fruits	Total 5+6+7	Soluble % total	Végétation	Sol (30 cm)	Litière plus violésivage minéralisation
N° colonne	1	2	3	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Carbone	(33) 29,4	-	-	114,4	19,3	117	-	250,7	54%	-	70.000	P.M.
Azote	29,4	380	95	8,2	12,0	156,9	62,5	177,1	95%	250	5.180	-
Phosphore	1,8	20	12	1,4	0,8	2,2	3,4	4,4	68%	70	Ass = 706 Tot = 896	-
Calcium	44,1	271	24	4,1	17,9	217,4	7,1	239,4	98%	200	3.990	-
Magnésium	18,5	115	28	3,2	10,8	94,5	7,6	108,5	97%	100	610	-
Potassium	11,7	517	64	10,0	40,0	274,1	155	324,1	97%	1000	574	-
SiO ₂	-	-	-	304	6,5	60	-	371	18%	-	476.700	-
Al ₂ O ₃	-	-	-	240	0,3	3,2	-	243	1%	-	383.600	-
Fe ₂ O ₃	-	-	-	100	0,8	5,0	-	106	6%	4 à 8	96.600	-
SO ₄	-	-	-	-	34,5	242,6	-	-	-	-	-	-
Cl	-	-	-	-	27,6	378,0	-	-	-	-	-	-
CO ₃ H	-	-	-	-	(27,6)	(126)	-	-	-	-	-	-
Quartz	-	-	-	(1045)	-	-	-	-	-	-	-	-
TOTAL ...				1800	198,1	1676,9						

P.M. Pour Mémoire

5.1.6. IMMOBILISATION DANS LES VÉGÉTAUX (tabl. IX et X)

Si on adopte les résultats des travaux de Bernhard-Reversat à la forêt du Yapo très semblable à celle du Téké, on constate que la forêt stocke une quantité considérable d'éléments minéraux dans sa végétation, et en particulier du calcium (1 900/ha/an), de l'azote (800 kg), du potassium (350 kg), du magnésium (180 kg) et du phosphore (70 kg/ha). Mais chaque année, près de 1/10 à 1/20 retourne au sol sous forme de litière et après minéralisation, est provisoirement stocké dans les horizons superficiels du sol puis récupéré presque intégralement par le réseau racinaire très dense.

La bananeraie quant à elle produit près de 17 tonnes de matière sèche par cycle (10 mois) et immobilise 250 kg d'azote, 70 kg de P_2O_5 , 1 000 kg de K_2O , 200 kg de CaO, 100 kg de MgO, 14 kg de soufre et 4 à 8 kg de fer et manganèse ; à peine 20 à 35 % des éléments sont exportés (35 tonnes/ha de fruits) (voir Martin Prével et coll., 1962-70-71, etc.).

5.1.7. STOCKAGE DANS LE SOL (tabl. IX et X)

Le sol contient également en réserve quantité d'éléments plus ou moins mobilisables. Dans les 30 premiers centimètres du sol sous forêt, les réserves en azote (2 400 kg/ha) sont considérables et l'on observe rarement de carence en N après défriche forestière. Par contre, les réserves en phosphore assimilable (52 kg de P_2O_5 Olsen), en potassium échangeable (74 kg) et en magnésium (27 kg/ha) sont très réduites. Après 15 années de culture et de fertilisation intensive, le sol sous bananeraie s'avère nettement plus riche. Notons qu'à côté de ces éléments facilement assimilables par la plante, les analyses révèlent la présence d'un stock considérable (2 à 15 fois plus grand) d'éléments extraits à l'aide de réactifs très puissants. Dans la nature, des échanges continus ont lieu entre chacun de ces compartiments : les cas de phosphore et du potassium sont les plus connus.

5.2. Schéma de bilan géochimique

Les données disponibles concernant les apports, les pertes, les stocks et certains flux internes ont été réunis aux tableaux IX et X.

Sous forêt, les apports et les pertes sont très faibles par rapport aux stocks : le bilan étant légèrement

positifs, c'est d'abord dans la végétation que s'accroissent les éléments minéraux, puis dans le sol. Aux apports par les pluies et les aérosols, il faut ajouter l'action des végétaux et des animaux qui remontent en surface les éléments puisés dans la zone d'altération. D'après Bernhard-Reversat (1975), le pluviollessivage (= égouttement à travers le dôme forestier) pourrait apporter en plus des pluies libres 10 kg/ha/an d'azote, 4 kg de P, 2 kg de Ca, 15 kg de Mg et 82 kg de potassium. A ces flux internes il faut encore ajouter la libération d'éléments minéraux par les matières organiques du sol. Notons enfin que les phénomènes d'érosion et de drainage mobilisent extrêmement peu de matières organiques (79 kg/ha/an de carbone) en regard des chutes annuelles de litière (8 à 12 t/ha/an) et du stock de carbone du sol (26 250 kg/ha/an sur 30 cm). Plus de 99 % de la litière minéralise donc complètement et le turn over est très rapide puisque le taux de matières organiques du sol est sensiblement constant sous forêt.

Sous bananeraie, après 15 années de culture fertilisée intensive, le sol est nettement plus riche qu'au départ. Cependant les pertes par lixiviation ont tellement augmenté qu'on a abouti à un nouvel équilibre tel que les propriétés chimiques n'ont plus guère progressé durant les 8 années qu'ont duré nos expériences. En effet les pertes par lixiviation ont atteint en moyenne 95 % du calcium et magnésium apportés, 57 à 66 % de l'azote et du potassium et 9 % de phosphore. A part le phosphore, tous les autres éléments doivent être distribués parcimonieusement en fonction des risques de drainage, des besoins de la plante et de la capacité des racines de les fixer. Par ailleurs, étant donné le coût des engrais minéraux et les dangers d'acidification des sols, il nous semblerait judicieux de mieux récupérer les matières organiques (résidus de culture et paillage modéré) et de reconsidérer la tendance à n'utiliser que des engrais concentrés très acidifiants. Pour éviter ces pertes inutiles d'engrais et d'amendements, il nous semblerait prudent de forcer la croissance des bananiers en saison sèche ou intermédiaire, grâce à une politique de paillage léger et d'irrigation modérée mais répétée et de diminuer les apports d'engrais durant les périodes de pluie surabondantes (15 mai-15 juillet).

Enfin, l'analyse des colonnes 10 des tableaux IX et X montre que l'azote et les bases migrent presque exclusivement sous forme soluble, tandis que le fer et surtout l'alumine circulent sous forme solide. La circulation du carbone, du phosphore et de la silice s'effectue surtout sous forme soluble si l'érosion est faible et plutôt sous forme solide si l'érosion est forte.

6. MIGRATIONS SOLIDES

Dans les chapitres précédents nous avons montré que, du fait des pluies très concentrées durant 2 mois, cette région subissait un niveau potentiel élevé d'érosion et de lixiviation. Tant que le sol est couvert, l'érosion reste limitée, mais la lixiviation des engrais peut être très onéreuse pour certaines cultures exigeantes comme les bananiers. Il convient d'étudier maintenant l'impact de cette agressivité climatique sur la texture du sol.

Bon nombre de sols tropicaux présentent en surface un horizon appauvri en particules fines sans qu'il soit possible de mettre en évidence une accumulation correspondante dans l'horizon B par rapport au matériau originel C ; le ventre de la courbe texturale des sols lessivés classiques est peu développé ou même inexistant (fig. 3). Ainsi dans le profil des cases Erlo d'Azaguié, le taux d'argile passe de 10-15 % dans les horizons meubles, à 35 % dans la matrice de la nappe graveleuse, puis à 45-47 % dans l'argile tachetée avant de redescendre à 25 % vers 3 m dans la roche altérée ; mais ce ventre disparaît si on considère la courbe cumulative de la fraction 0 à 20 microns (argiles + limons fins).

Cinq hypothèses peuvent être envisagées pour expliquer ce phénomène si répandu en région tropicale :

a. Sédimentations successives au cours de cycles géomorphologiques comportant plusieurs phases : altération profonde de la roche, érosion des fines et concentration des graviers résiduels en un pavage, sédimentation ultérieure de plus en plus fine à mesure que le versant recule avec reprise par la faune. Cette hypothèse de l'origine allochtone des niveaux meubles échappe à nos études car elle fait intervenir de longues périodes géologiques.

b. Destruction de l'argile en milieu acide au contact des acides humiques provenant de la litière. L'expérience montre que l'on trouve bien 4 à 9 ppm de silice dans les eaux de drainage mais quasi pas d'alumine. L'alumine libre devrait donc s'accumuler dans les horizons superficiels du sol, ce qui n'est pas le cas (le rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ est largement supérieur à 2). De plus, les eaux de drainage en milieu naturel sont beaucoup moins acides que certains ont voulu le dire (Rougerie, 1960). La silice dissoute semble donc provenir essentiellement de la solubilisation des phytolithes et du matériel quartzueux très abondant.

c. Erosion en nappe sélective vis-à-vis des particules fines de la surface du sol. Des agents d'homogénéisation (termite, vers de terre, etc.) transmettent en profondeur l'appauvrissement en fines des horizons superficiels du sol.

d. Lessivage oblique des colloïdes minéraux de l'horizon A d'un sol situé en haut d'une toposéquence, transport à l'intérieur du sol dans les eaux de drainage et colmatage des sols en bas de toposéquence ou bien évacuation définitive par le réseau hydrographique.

e. Lessivage vertical jusqu'à la nappe avec dépôts diffus. Les conditions physico-chimiques favorables à la floculation n'étant pas réunies à un niveau précis du sol (sauf aux résurgences de nappe en bas de pente), les colloïdes mis en suspension (relativement peu stable) par la battance des pluies à la surface du sol (même sous forêt) se déposent progressivement dès la surface. Ces dépôts sont plus ou moins temporaires et peuvent être repris lors d'une averse violente qui nettoie les voies de circulation rapide.

Nous nous proposons de passer en revue les résultats concernant l'érosion sélective, l'activité des vers de terre et la migration des colloïdes dans les eaux de drainage.

6.1. Erosion sélective en nappe

La texture et les teneurs moyennes de divers éléments chimiques des terres érodées et du sol en place sous forêt et sous bananeraie sont rapportés au tableau XI. Il apparaît aux colonnes 5 et 10 que tous les éléments sont plus concentrés dans les terres érodées (terre de fond + suspensions) que dans le sol en place. En ce qui concerne la texture, argile et limons fins sont 2 à 3 fois plus importants dans les terres érodées alors que les sables s'accumulent à la surface du sol ; la limite de la sélectivité se trouve entre 20 et 50 microns. L'érosion sous forêt est très réduite mais plus sélective que sous bananeraie.

Ces résultats confirment ceux que Roose a trouvés sur sables tertiaires (Roose, 1968 et 1973). Du point de vue pédogenèse, ils signifient que l'érosion en nappe ne décape pas seulement une mince couche de sol mais qu'elle évacue sélectivement des éléments liés à la fertilité, laissant sur place un mulch de sables et cailloux stériles. L'appauvrissement du sol s'arrêterait là si des agents d'homogénéisation du sol ne mélangeaient constamment les horizons superficiels et ne rapportait en surface des particules fines.

TABLEAU XI

Parcelles Erlo d'Azaguié - coefficients et sélectivité de l'érosion sous forêt et sous bananeraie
 Forêt E moyen = 150 kg dont 80 % de suspensions fines
 Bananeraie E moyen = 2 000 kg dont 80 % de suspensions fines

N° colonne	TENEURS MOYENNES				Coefficients de sélectivité 3/4	TENEURS MOYENNES				Coefficients de sélectivité 8/9
	Terre de fonds	Suspension	Erosion totale	Sol * en place 0 - 5 cm		Terre de fonds	Suspension	Erosion totale	Sol ** en place 0 - 25 cm	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ca échang.	3,64	0,68	0,97	0,39	2,49	8,6	4,3	5,2	5,0	1,04
Mg "	1,4	0,80	0,86	0,13	6,62	2,7	1,8	1,98	1,4	1,41
K "	0,20	0,31	0,30	0,07	4,27	0,7	1,2	1,10	0,7	1,57
Ca total	5,2	1,5	1,87	0,95	1,97	19,1	8,1	10,3	7,9	1,30
Mg	3,7	7,6	7,21	2,35	3,07	9,4	13,9	13,0	2,7	4,81
K	2,8	7,4	6,94	2,49	2,79	4,3	15,0	12,9	1,4	9,19
C %	29,2	84,7	79,15	15,2	5,21	29,6	64,1	57,2	19,1	2,99
N %	1,74	6,53	5,05	1,1	5,50	2,2	4,56	4,09	1,38	2,96
P ₂ O ₅ tot. %	0,23	1,08	1,0	0,23	4,35	1,5	3,7	3,26	0,93	3,51
SiO ₂ %	4,4	21,9	20,15	8,1	2,49	5,9	17,5	15,2	(10)	1,52
Fe ₂ O ₃ %	1,3	5,8	5,35	1,8	2,97	2,1	5,7	4,93	2,4	2,08
Al ₂ O ₃ %	3,2	18,0	16,52	6,3	2,62	0,1	14,0	12,02	(8)	1,50
Argile (0-2)	10,1	53,0	48,7	13,2	3,69	17,9	42,1	37,3	14,6	2,55
L.F. 2.20	6,4	21,0	19,5	6,2	3,15	12,2	28,7	25,4	7,8	3,26
L.G. 2.50	22,9	10,0	11,3	13,5	0,84	17,4	15,1	15,5	14,3	1,09
S.F.50-200	31,2	2,3	5,2	29,7	0,17	20,4	6,2	9,0	33,3	0,27
SG 200-2000	26,4	0,03	2,9	34,5	0,08	29,2	1,1	6,7	27,8	0,24

* voir Roose, 1976, p. 12. Comparaison turricules - sol en place le 5.11.70
 ** Analyse 1966 horizon 0-25 cm - tiré de Roose-Godefroy, 1967

6.2. Activité des vers de terre sous forêt

L'un des auteurs a effectué une quinzaine de prélèvements de turricules entre octobre 1970 et 1973 sur 15 placettes de 1 m² réparties à cinq niveaux de la toposéquence (Roose, 1976). Suivant les stations et les années, la production de turricules à la surface du sol a varié de 10 à 50 t/ha/an autour d'une moyenne de 32 t/ha/an. Mais en tenant compte que durant ces années les pluies furent déficitaires et d'autre part qu'entre deux comptages, l'érosion emporte une partie des terres rejetées en surface par les vers, la production moyenne de turricules peut être estimée à 50 t/ha/an. Or, l'érosion moyenne à la parcelle Erlo est de l'ordre de 150 kg/ha/an ; la différence vient s'accumuler et former l'horizon de terre meuble dépourvu de gravier. Les observations de terrain (couleurs des turricules, tranchées, etc.) et l'analyse comparée du profil et des turricules montre que ceux-ci proviennent du mélange de la litière et des 10 ou 20 premiers centimètres du sol, mais jamais des argiles tachetées rouges

situées au-dessous de la stone line. Le rôle de ces vers de terre est donc triple : ils augmentent la macroporosité et l'infiltration dans les horizons parcourus, ils mélangent la litière à la matière minérale du sol et permettent l'approfondissement de l'appauvrissement. La plupart des auteurs soulignent d'ailleurs cette action de brassage. Lavelle (1974), travaillant dans la savane de Lamto (Centre Côte d'Ivoire) montre que les turricules (20 à 30 t/ha/an) ne représentent qu'une faible partie des terres remuées par les vers. Ses comptages de vers sur le terrain couplés à la mesure de leur activité en laboratoire, l'amènent à conclure que plus de 800 tonnes de terre sèche et 100 kg de litière sèche passent par le tube digestif de ces animaux qui minéralisent près d'une tonne de matières organiques à l'hectare par an.

Cet énorme travail de brassage fait bien comprendre la discontinuité qui ressort des analyses aussi bien que des lames minces entre cet horizon homogénéisé par la faune et les argiles tachetées sous jacentes étroitement liées aux produits de l'altération de la roche.

6.3. Lessivage oblique et vertical

Les cases de lessivage oblique et les cases de drainage vertical ont été conçues en vue de l'étude des charges solubles et solides des eaux de drainage observées à différents niveaux du sol. Pour mesurer la charge solide nous avons prélevé selon nos possibilités de gros volumes d'eau (1 à 50 litres) qui ont subi successivement en laboratoire une filtration rapide pour écarter les pollutions, une floculation accélérée à l'aide de $2 \text{ cm}^3/\text{l}$ d'une solution à 5 % de sulfate d'alumine, un repos de 2 à 6 semaines pour faire tomber les floculats au fond du récipient, un ou plusieurs siphonages du surnageant jusqu'à concentration dans un bécher de 250 cc, évaporation à $105 \text{ }^\circ\text{C}$ et pesée à 0,1 mgr près. Nous disposons d'un grand nombre d'échantillons (193 sous forêt et 227 sous bananeraie) représentant 3 385 litres de drainage. Les résultats peuvent être résumés comme suit :

a) La charge colloïdale des eaux varie généralement entre 20 et 300 mg/l. Au niveau de l'échelle de variation, il n'est pas possible de distinguer des populations différentes d'après l'origine des eaux (forêt ou bananeraie, case DV ou Erlo, profondeur d'écoulement).

b) Les médianes des charges colloïdales s'étalent de 70 à 130 mg/l mais c'est une mauvaise caractéristique de cette population car la charge diminue systématiquement lorsque les volumes écoulés augmentent, au cœur de la saison humide par exemple.

c) Nous ne disposons malheureusement pas de résultats pour chaque averse importante si bien que la moyenne pondérée par les volumes risque d'être supérieure à la réalité : elle diminue de 60 à 45 mg/l sous forêt et de 80 à 20 mg/l sous bananeraie entre 0 et 180 cm de profondeur.

d) La charge colloïdale moyenne tend donc à diminuer légèrement depuis les horizons de surface jusque dans l'argile bariolée (180 cm) et cette baisse des teneurs est plus marquée sous bananeraie que sous forêt.

e) A partir de la seconde année d'observation, les teneurs en colloïdes des eaux de drainage récoltées en case DV sont du même ordre qu'en case Erlo.

f) Les observations sur la couleur des colloïdes floculés ont montré que les échantillons sombres (brun gris, brun, brun jaune) proviennent en majorité des horizons humifères tandis que les couleurs claires (blanc, crème, jaune et jaune brun) caractérisent généralement les floculats récoltés en profondeur. Cependant nous avons noté quelques échantillons sombres dans les eaux de drainage profond, en début de saison

des pluies et un éclaircissement général des couleurs lorsque le drainage est abondant vers la fin de la saison humide.

Malgré la dispersion des résultats due à la délicatesse de la méthode et à l'irrégularité des prises, les observations montrent une tendance générale à la diminution de la charge colloïdale, à mesure que les eaux s'infiltrent dans le sol : cependant, il n'est pas possible d'indiquer un niveau où l'accumulation est systématique et définitive. Ce mode de variation n'est pas en accord avec la théorie classique du lessivage selon laquelle les eaux de drainage se chargent dans l'horizon A éluvial et se déchargent dans un horizon B illuvial, les conditions physico-chimiques (pH, EH) variant brutalement à un niveau précis.

En 1972, Roose a proposé un schéma d'appauvrissement en particules fines des horizons superficiels du sol avec dépôts diffus tout au long du profil, sans ventre apparent de la courbe texturale. Dans ce schéma, les colloïdes seraient mis en suspension par l'énergie des gouttes de pluie tombant sur les agrégats de la surface du sol. De cette masse de boue liquide une partie ruisselle (turbidité moyenne = 900 mg/l sous bananeraie et 700 mg/l sous forêt) tandis qu'une autre s'infiltrerait. Les eaux d'infiltration ont au départ la même charge que les eaux de ruissellement, ensuite leur charge colloïdale diminue à mesure qu'elles pénètrent dans le sol. Dès la surface se dépose une forte proportion des plus grosses particules (sables et limons dans la pellicule de battance), ensuite vient le tour de particules de plus en plus fines et de moins en moins colorées (fer et matières organiques). A partir de 150 cm de profondeur les eaux sont opalescentes, laiteuses et les colloïdes de plus en plus difficiles à floculer. Lors des premiers orages, le drainage est peu abondant en profondeur mais sa charge soluble et colloïdale est très forte tandis que sa couleur est foncée comme le thé. Ce front d'eau chasse les poussières et dépôts divers qui encombrer les grandes voies de circulation. Plus tard, les colloïdes détachés en surface par l'énergie des gouttes de pluie se déposent tout au long des couloirs de circulation (tension capillaire) puis peuvent être repris au cours des pluies successives et évacués dans la rivière ou piégés dans le bas-fond.

Bocquier, Ruellan, Boulet, Rieu et d'autres auteurs ont montré comment les colloïdes peuvent être piégés dans les parties basses des toposéquences et remonter ensuite colmater des horizons plus hauts placés dans le paysage. Mais peu de chercheurs ont étudié les mécanismes de mise en suspension de ces colloïdes à part des conservationnistes comme Free et Hudson

qui ont montré les liens qui existent entre la couverture du sol et la charge colloïdale des eaux de ruissellement et de percolation.

Il n'est pas dans notre intention de nier l'éventualité de variations climatiques importantes et de phases géomorphologiques successives intervenant dans la mise en place des horizons de terre meuble sur la nappe de gravat. Cependant il nous semble utile de quantifier l'efficacité actuelle des moteurs actuels de ce type de sol ferrallitique désaturé, appauvri et remanié.

Pour ce faire nous avons évalué :

— d'une part, la quantité de particules fines (jusqu'à 20 microns) qui manquent dans les horizons appauvris pour ressembler sur le plan textural aux niveaux d'argile tachetée : soit 1 260 t/ha sous forêt et 1 594 t/ha sous bananeraie.

— d'autre part, la perte annuelle moyenne de fines par érosion sélective (75 kg/ha/an sous forêt et 820 kg/ha/an sous bananeraie) et par lessivage oblique et vertical (283 kg/ha/an sous forêt et 378 kg/ha/an sous bananeraie irriguée). Il faudrait donc 1 330 ans pour reproduire un tel appauvrissement sous bananier et 3 520 ans sous forêt à condition que se maintiennent climat et végétation. Or, dans le cadre traditionnel de l'agriculture nomade pratiquée dans cette région, une forte proportion de la forêt a été cultivée plusieurs fois par siècle. Défrichage et culture accélèrent l'appauvrissement : on peut donc estimer entre 1 et 3 millénaires le temps nécessaire à reproduire cet appauvrissement au rythme actuel. Par ailleurs, le travail des termites et vers de terre suffit largement à expliquer la concentration des cailloux par remontée sélective des fines emballant les quartz résiduels. Mais il faut bien admettre que, ce qui est possible en Côte d'Ivoire où la couche meuble varie de 10 à 100 cm au-dessus de la stone line, devient assez peu vraisemblable dans certaines zones du Cameroun, du Gabon ou du Congo où la stone line est enfouie à plus de 5 à 10 m de profondeur !

7. CONCLUSIONS

Grâce aux bilans hydriques, chimiques et colloïdaux qui se précisent après huit années d'observation sur le terrain en milieu naturel et cultivé, se dégagent un certain nombre de conclusions concernant la pédogenèse actuelle de ce sol ferrallitique très désaturé, remanié et appauvri.

Les précipitations en régions subéquatoriales sont abondantes, intenses et concentrées en quelques semaines, si bien qu'elles ont un haut potentiel d'agressivité érosive ($R_{usa} = 885$ en moyenne mais peut atteindre 1 300) et de lessivage ou d'appauvrissement en particules fines. Le ruissellement semble plus élevé sur schiste que sur d'autres roches. L'érosion mécanique est négligeable sous forêt (150 kg/ha) et reste modérée sous bananeraie (1 à 5 t/ha) ; par contre la turbidité des eaux est très élevée, de même que l'érosion potentielle sur sol nu (800 à 1 800 t/ha/an). Si « les cailloux poussent » sous bananeraie, c'est que le labour les remontent en surface et que l'érosion en nappe les dégage de leur gangue.

Le drainage oblique est discret sous forêt mais peut atteindre 12 à 23 % de certaines averses sous bananeraie. Il s'agit principalement d'une remontée rapide du toit de la nappe temporaire mais aussi du drainage oblique dans les horizons humifères très poreux. Le drainage vertical reste cependant le phénomène dominant du bilan hydrique en ce qui concerne la dynamique du sol. Tels quels, les petits lysimètres se sont avérés mal adaptés à l'estimation du drainage sous ce genre de couvert végétal mais en tenant compte des variations du stock d'humidité des profils (200 mm sous forêt et 40 mm sous bananeraie), nous avons estimé le drainage moyen (vertical + oblique) à 515 mm sous forêt et 630 mm sous bananeraie irriguée. Cependant, lors des années humides, près de 70 % de l'excédent des pluies se retrouve dans le ruissellement et surtout le drainage.

Le schéma de bilan chimique montre que *le milieu forestier est en équilibre* : les apports par les pluies, les aérosols et les remontées biologiques dépassent légèrement les faibles pertes par érosion et drainage. Les stocks minéraux se constituent d'abord dans les végétaux puis dans les matières organiques du sol qui reste pauvre en bases échangeables et phosphore assimilable. Le sol de la bananeraie s'est indiscutablement enrichi, mais les pertes par érosion et surtout par lixiviation sont énormes. A part le phosphore, le sol retient très mal les engrais et de plus il s'acidifie. Si l'érosion est facile à maîtriser en couvrant le sol (aménagement des résidus de culture) nos moyens sont limités pour réduire la lixiviation. Il s'agit d'intensifier la culture en période sèche ou transitoire et d'adapter le rythme de fertilisation aux besoins physiologiques de la culture et à l'abondance des averses.

Le caractère ferrallitique de la pédogenèse est bien marqué encore aujourd'hui jusque dans les horizons superficiels, comme en témoigne l'abondance de la silice dans les eaux de percolation (5 à 10 fois plus

de SiO₂ que de fer et d'alumine). L'évolution actuelle du sol sous forêt et surtout sous culture est dominée par deux phénomènes principaux : la *lixiviation des bases, de l'azote et de la silice* et l'*appauvrissement en particules fines des horizons superficiels par lessivage* avec floculation diffuse et surtout *par érosion sélective*. Celle-ci a été nettement mise en évidence à Azaguié où elle est favorisée par l'activité des vers de terre (50 t/ha/an) et par le labour sous culture. L'appauvrissement des horizons superficiels est accélérée par la culture d'un couvert végétal peu protecteur (l'érosion sélective varie de 1 à 100), tandis que le lessivage (var. 1 à 4) est limité par le volume du drainage (515 mm et par la charge colloïdale (moyenne de 50 mg/l).

Au rythme actuel, il faudrait 1 à 3 millénaires pour obtenir un appauvrissement en fines semblables à celui qu'on observe aujourd'hui, à partir d'un matériau tel que le niveau d'argile tachetée.

REMERCIEMENTS

Nous sommes très reconnaissants à nos responsables scientifiques, MM. Aubert, Fournier et Rodier, ainsi qu'aux directions de l'ORSTOM et de l'IRFA, de nous avoir confié la réalisation de ce programme de recherche fondamentale sur la pédogenèse en milieu tropical et sur ses applications pratiques en agro-pédologie. Nous remercions très vivement ceux très nombreux qui nous ont aidé à le réaliser et en particulier le personnel des laboratoires d'analyse d'Adiopodoumé et d'Azaguié, le laboratoire des radioisotopes d'Adiopodoumé, le personnel des stations d'Azaguié et d'Adiopodoumé, et nos collègues qui ont pris part à nos débats et discussions sur nos résultats.

Enfin, nous adressons tous nos remerciements à MM. Aubert, Combeau, Fauck, Pedro, Lelong et Trichet qui ont assuré la critique, la révision et la production de ce document en collaboration avec le Service Central de Publication de l'ORSTOM.

Manuscrit reçu au Service des Publications de l'ORSTOM le 23 décembre 1977

BIBLIOGRAPHIE

- AUBERT (G.), SEGALIN (P.), 1966. — Projet de classification des sols ferrallitiques. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. IV, n° 4 : 97-112.
- BERNHARD-REVERSAT (F.), 1975. — Recherches sur l'écosystème de la forêt subéquatoriale de basse Côte d'Ivoire. VI. Les cycles des macro-éléments. *Revue Ecol. Appl.*, 29 : 229-254.
- BRUNET-MORET (Y.), 1967. — Etudes générales des averses exceptionnelles en Afrique Occidentale, République de Côte d'Ivoire. Rapport ORSTOM CIEH, 20 p. *multigr.*
- ELDIN (M.), 1971. — Le climat *in* : Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. *Mém. ORSTOM*, n° 50, Paris, 391 p. : p. 77 à 108.
- GIRARD (G.), SIRCLOULON (J.), TOUCHÉBEUF (P.), 1971. — Le réseau hydrographique. *in* : le milieu naturel de Côte d'Ivoire *Mém. ORSTOM*, n° 50, Paris, 391 p.
- GODEFROY (J.), MULLER (M.), ROOSE (E.J.), 1970. — Estimation des pertes par lixiviation des éléments fertilisants dans un sol de bananeraie de basse Côte d'Ivoire. *Fruits*, 25, 6 : 403-420.
- GODEFROY (J.), 1974. — Evolution de la matière organique sous culture de bananier et de l'ananas. Relation avec la structure du sol. Thèse Doct. Ing. Nancy I, n° CNRS A.O. 9296, 166 p.
- GODEFROY (J.), ROOSE (E.J.), MULLER (M.), 1975. — Estimation des pertes par les eaux de ruissellements et de drainage des éléments fertilisants dans un sol de bananeraie du Sud de la Côte d'Ivoire. *Fruits*, 30, 4 : 223-235.
- HUDSON (N.W.), 1973. — Soil conservation. B.T. Batsford limited, London, 320 p.
- HUTTEL (Ch.), 1975. — Recherches sur l'écosystème de la forêt subéquatoriale de basse Côte d'Ivoire. IV. Estimation du bilan hydrique. *Rev. Ecol. Appl.* 29 : 192-202.
- HUTTEL (Ch.), BERNHARD-REVERSAT (F.), 1975. — Recherches sur l'écosystème de la forêt subéquatoriale de basse Côte d'Ivoire. V. Biomasse végétale et productivité primaire. Cycle de la matière organique. *Rev. Ecol. Appl.* 29 : 203-228.
- LAVELLE (P.), 1974. — Les vers de terre de la savane de Lamto *in* : Analyse d'un écosystème tropical humide de la savane de Lamto (Côte d'Ivoire).
- LAVELLE (P.), 1975. — Consommation annuelle de terre par une population naturelle de vers de terre (*Millsonia anomala* Omodro) dans la savane de Lamto (Côte d'Ivoire). *Rev. Ecol. Biol. Sol.*, 12, 1 : 11 à 24.
- MARCHAL (J.), MARTIN-PREVEL (P.), 1971. — Les oligo-éléments Cu-Fe-Mn-Zn dans le bananier. *Fruits*, 26, 7 : 483-500.
- MARTIN-PREVEL (P.), TISSEAU (R.), 1962. — Les éléments minéraux dans le bananier et dans son régime. *Fruits*, 17, 3 : 123-128
- MONNIER (G.), 1955. — Etude pédologique à la station IFAC à Azaguié. *Ann. IFAC* n° 10, 34 p.
- MONTAGUT (G.), MARTIN-PREVEL (P.), 1965. — Essais sol-plante sur bananiers. Besoins en engrais des bananiers antillais. *Fruits*, 20, 6 : 265-273.
- MOULO (N.), 1974. — Etude comparative des sols sous forêt et sous bananier sur schistes à Azaguié d'après deux toposéquences (Basse Côte d'Ivoire). Rapport de stage. ORSTOM, Abidjan, 99 p. *multigr.*
- ROOSE (E.J.), GODEFROY (J.), 1967 a. — Erosion, ruissellement et drainage oblique sous une bananeraie de basse Côte d'Ivoire. Rapport ORSTOM-IFAC, Abidjan, 72 p. *multigr.*
- ROOSE (E.J.), GODEFROY (J.), 1967 b. — Lessivage des éléments fertilisants sous bananeraie. Tananarive, coll. Fertilité des sols tropicaux. Comm. 114, pp. 1405-1409.
- ROOSE (E.J.), 1968. — Un dispositif de mesure du lessivage oblique dans les sols en place. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. VI, n° 2 : 235-249.
- ROOSE (E.J.), 1968 b. — Erosion en nappe et lessivage oblique dans quelques sols ferrallitiques de Côte d'Ivoire. Comm. 6° conf. WASA, Abidjan, 15 p.
- ROOSE (E.J.), HENRY des TUREAUX (P.), 1970. — Deux méthodes de mesure du drainage vertical dans les sols en place. *Agron. Trop.*, 25, 12 : 1029-1087.

- ROOSE (E.J.) et coll., 1970. — Erosion, ruissellement et lessivage oblique sous une plantation d'hévéa en basse Côte d'Ivoire. III. Résultats des campagnes 1967-68 et 69. Rapport ORSTOM IRCA, Abidjan, 115 p.
- ROOSE (E.J.), 1970. — Importance relative de l'érosion, du drainage oblique et vertical dans la pédogenèse actuelle d'un sol ferrallitique de moyenne Côte d'Ivoire. Deux années de mesure sur parcelle expérimentale. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. VIII, n° 4 : 469-482.
- 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, Paris, Bull. liaison Pédologues thème A n° 1 : 19 à 41.
- ROOSE (E.J.), 1973. — Dix sept années de mesures expérimentales de l'érosion hydrique et du ruissellement sur un sol ferrallitique sableux de basse Côte d'Ivoire. Thèse Doc. ing. univ. Fac. Sci. Abidjan, 1973, n° 20, ORSTOM, Abidjan, 125 p. *multigr.*
- ROOSE (E.J.), 1974. — Influence du type de plante et du niveau de fertilisation sur la composition des eaux de drainage en climat tropical humide. In : XIII Journées de l'Hydraulique, Paris, question 3, rapport 13, 7 p.
- 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.* IITA, Ibadan, coll. Conservation et aménagement du sol dans les tropiques humides (sous presse).
- ROOSE (E.J.), 1976. — Contribution à l'étude de l'influence de la mésofaune sur la pédogenèse actuelle en milieu tropical. Rapport ORSTOM, Abidjan, 56 p. *multigr.*
- ROOSE (E.J.), GODEFROY (J.), 1977. — Pédogenèse actuelle d'un sol ferrallitique remanié sur schiste sous forêt et sous bananeraie fertilisée de basse Côte d'Ivoire. Synthèse de huit années d'observation de l'érosion, du drainage et de l'activité des vers de terre à la station IRFA d'Azaguié et la forêt du Téké. Rapport ORSTOM-IRFA, Abidjan, 116 p. *multigr.*
- ROUGERIE (G.), 1960. — Dynamique actuelle des versants en Côte d'Ivoire forestière. *Mém. IFAN*, n° 40.
- WISCHMEIER (W.H.), SMITH (D.D.), 1958. — Rainfall energy and its relationship to soil loss. *Trans. Amer. Geophys. Union* n° 39 : 285-291.
- WISCHMEIER (W.H.), 1962. — Rainfall erosion potential. Geographic and location differences of distribution. *Agric. Eng.* 43 : 212-215.