

**Dynamique actuelle d'un sol ferrallitique très désaturé
sur sédiments sablo-argileux sous culture
et sous forêt dense humide subéquatoriale
du sud de la Côte d'Ivoire
Adiopodoumé : 1964-1976
2^e partie — Les transferts de matières**

Eric J. ROOSE

*Pédologue O.R.S.T.O.M.,
Laboratoire de Géologie appliquée, Université d'Orléans, 45045 Orléans Cedex*

Introduction

La note résume (1) la synthèse de 12 années d'expérimentation au Centre O.R.S.T.O.M. d'Adiopodoumé sur les transferts de matières par les pluies, l'érosion, le drainage et les activités biologiques sous forêt et sous culture d'un type de sol ferrallitique très désaturé.

Dans une première partie, l'auteur a montré combien les pluies sont agressives et font courir des risques élevés d'érosion et de lessivage dans les eaux de drainage. En réalité, sous forêt, l'érosion et le ruissellement restent très modestes quelle que soit la pente ; par contre, le drainage au-delà de deux mètres de profondeur est très important. Sous une culture couvrant aussi mal le sol qu'un maïs extensif, l'érosion prend de telles proportions qu'elle masque un peu l'importance du drainage (ROOSE, 1979b).

Dans cette seconde partie, sont précisées les charges solubles et solides des divers types d'eau qui touchent le système étudié. Des schémas de bilans géochimiques seront présentés ainsi que leurs conséquences sur l'évolution de la texture du sol et sur les précautions auxquelles il faut veiller lors de la mise en valeur.

5. SCHÉMA DE BILAN GÉOCHIMIQUE

L'un des buts de cette étude est de préciser la dynamique actuelle des horizons superficiels d'un type de sol ferrallitique très désaturé en fonction des traitements auxquels il est soumis. Pour éviter tout a priori, on considère le sol (ou tout au moins les deux premiers mètres) comme une « boîte noire » et on tente de chiffrer, ne fût-ce que grossièrement, l'importance des flux qui entrent ou sortent de cette boîte, d'établir des bilans géochimiques sous conditions naturelles ou cultivées et de comparer les flux aux stocks contenus dans le système « sol-plante ». Mais auparavant, il faut encore préciser les charges solubles et solides des divers types d'eau qui traversent le système.

5.1. Composition chimique des solutions et des solides migrants

5.1.1. LA CHARGE SOLUBLE DES EAUX

En 12 ans, plus de 1 500 échantillons d'eau provenant de cette station ont été analysés au Labora-

(1) Un rapport de synthèse plus détaillé peut être obtenu près de l'auteur ou du Service des Publications de l'O.R.S.T.O.M. à Bondy.

La première partie de cet article (paragr. 1 à 4) a paru *in Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, vol. XVII, n° 4, 1979 : 259-281.

TABLEAU X

Caractéristiques des eaux sous forêt. — Adiopodoumé : 1966-75

	Teneurs moyennes pondérées (en ppm) : <i>mpv</i>						
	Pluie { ciel ouv. sous forêt	Ruissell. forêt	Case ERLO		Lysimètres		Source Jardin botanique (<i>ma</i>)**
			Drain sup.	Drain inf.	Drain sup. haut bas*	Drain inf. haut bas*	
Nombre.....	{ 43 à 53 44 à 54	99 à 104	50 à 152	32 à 99	44 à 54	47 à 56	64 à 83
pH.....	{ 6,7 6,7	6,7	6,3	6,8	{ 6,6 6,3	{ 6,6 6,5	5,3
Résist. Ω/cm	{ 48 800 25 000	28 700	27 200	17 900	{ 7 000 3 900	{ 5 400 3 000	38 100
Ca.....	{ 1,8 3,8	5,6	3,7	6,9	{ 10,3 36,0	{ 17,4 33,8	2,4
Mg.....	{ 0,4 2,2	2,7	1,8	5,1	{ 3,8 10,9	{ 6,3 10,3	0,5
K.....	{ 0,3 3,9	4,8	2,6	13,1	{ 2,0 3,0	{ 1,0 1,5	0,1
Na.....	{ 0,82 1,75	1,91	2,64	3,12	{ 3,64 2,82	{ 4,88 3,93	2,43
C.....	{ 1,3 7,4	11,2	8,7	8,1	{ 1,5 3,9	{ 1,4 1,9	1,0
N tot.....	{ 1,4 2,5	4,5	3,3	3,4	{ 13,3 36,7	{ 21,8 40,7	1,6
N-NO ₃	{ 0,26 0,74	1,17	0,77	1,61	{ 11,9 33,0	{ 21,3 39,1	0,17
N-NH ₄	{ 0,24 0,27	0,73	0,30	0,42	{ 0,13 0,37	{ 0,39 0,43	0,16
PO ₄	{ 0,32 0,87	2,23	0,67	0,77	{ 0,25 0,25	{ 0,22 0,21	1,25
Fe ₂ O ₃	{ 0,04 0,12	0,75	0,26	0,30	{ 0,03 0,05	{ 0,06 0,03	0,06
Al ₂ O ₃	{ 0,08 0,11	0,28	0,28	0,35	{ 0,11 0,47	{ 0,31 0,10	0,07
SiO ₂	{ 0,7 1,3	3,5	7,2	8,3	{ 5,7 8,4	{ 5,8 7,0	8,4
SO ₄	{ 1,2 2,5	3,1	5,1	6,2	{ 3,0 6,8	{ 2,1 2,7	1,4
Cl.....	{ 2,1 4,9	2,8	4,4	6,6	{ 7,1 7,9	{ 7,7 9,5	3,9
CO ₃ H.....	{ 5,15 18,01	28,2*	13,9	30,2	—	—	12,6

* Aucune végétation ne pousse dans les lysimètres situés à mi-pente (= bas). Par contre un léger sous-bois se développe dans les lysimètres de haut de pente.

** Ne disposant d'aucun débit, on a reporté dans cette colonne les moyennes arithmétiques (*ma*) des teneurs en solubles dans les eaux de source.

toire Central de l'O.R.S.T.O.M. à Adiopodoumé, dont la moitié provient des études sous forêt et l'autre sous diverses cultures (fourrages, maïs, ananas). Grâce à la Banque de Données Pédologiques de l'O.R.S.T.O.M. à Bondy, tous les résultats provenant du milieu forestier (18 variables) ont été consignés sur fiches perforées et traités statistiquement. Nous ne présentons ici qu'un bref commentaire sur les teneurs moyennes pondérées par les volumes des écoulements ($mpv = \frac{S(x \cdot v)}{Sv}$) des eaux de pluie, ruissellement, drainage oblique et vertical sous forêt et sous culture, ainsi que des eaux de source. Le lecteur pourra trouver dans le rapport de synthèse un résumé des méthodes analytiques (NALOVIC, 1969 ; GOUZY, 1973), une étude sur l'évolution du pH des eaux, en fonction du temps de prélèvement des échantillons et les résultats de l'analyse statistique. Les délais d'analyse sont assez variables (0,5 à 3 mois pour les échantillons composites), mais, d'après nos essais, ceci n'entraîne pas d'évolution notable des caractéristiques des eaux (à part les formes de l'azote, CO_3H et les gaz dissous non dosés) à condition de respecter certaines règles (transport en flacons plastiques parfaitement pleins et bouchés, conservation à l'abri de la lumière et des fortes chaleurs).

1° Variations interannuelles des teneurs moyennes

Les teneurs observées dans les eaux d'une même provenance et leurs moyennes pondérées annuelles peuvent varier substantiellement d'une année à l'autre : le rapport entre les teneurs maximales et minimales est généralement inférieur à 4, mais peut atteindre 7 à 30 pour Mg, K, N total, N, NO_3 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , PO_4 et SO_4 . Les teneurs n'évoluent pas toujours systématiquement au cours des années, mais, pour les eaux de ruissellement, de drainage oblique et de source d'Adiopodoumé, les teneurs les plus élevées apparaissent les premières années (1966 à 1968) et les plus faibles vers la fin des observations (1971-1975). Ce fait que nous avons déjà relevé pour la station de Korhogo (ROOSE, 1979) peut s'expliquer partiellement par le changement de méthodes analytiques à l'occasion de l'automatisation progressive du Laboratoire. Cette hypothèse, valable pour le fer, l'alumine et la silice (nécessité de flocculer les colloïdes avant colorimétrie des solutions), ne l'est pas pour l'ensemble des résultats, en particulier pour la résistivité dont la méthode de mesure n'a pas changé. Ces variations sont peut-être aussi imputables au mode de prélèvement non systématique et aux aléas climatiques qui provoquent des écoulements (donc des prélèvements) à des époques plus ou moins différentes de l'année où les éléments chimiques ne sont pas également disponibles pour les migrations (voir variations saisonnières).

Nous avons aussi pensé que les équilibres « eau-sol-plante » pouvaient être perturbés les premières années qui suivent l'installation des cases ERLO (tranchée drainée) ; cependant, on retrouve le même phénomène dans les eaux de source sans qu'il soit touché au milieu. Par contre, les teneurs maximales des eaux de pluie et de drainage vertical ne sont pas liées à la première année d'observation qui eut lieu, il est vrai, en 1970.

Quelles que soient les explications, les variations de teneurs sont importantes, et il n'est pas possible d'évaluer des flux avec précision sans une longue période d'observation comprenant plusieurs cycles saisonniers. BELOUSOVA, spécialiste russe des études de dynamique des podzols de la taïga, insistait récemment sur la nécessité de s'appuyer sur des séries d'observations en lysimètres d'au moins dix ans (Nancy, 1979). Il faut donc être très prudent lorsqu'il s'agit de comparer des résultats provenant de divers auteurs ayant procédé de diverses façons pendant des périodes souvent très brèves.

2° Influence des saisons et des volumes sur la charge soluble

Lorsque les écoulements sont forts (en fin de saison des pluies) la résistivité des eaux augmente, donc la charge soluble ionisée diminue. Les éléments les plus sensibles à cet effet de dilution sont K, Na, Mg, SO_4 , CO_3H et les matières organiques. Par contre, la silice, le fer et surtout l'alumine ont tendance à être aussi abondants, sinon plus, dans les forts écoulements de fin de saison des pluies, ce qui indiquerait leur plus grande disponibilité dans le sol.

Si on considère les premiers écoulements de l'année, il n'est pas rare de trouver des teneurs 10 à 50 fois plus élevées qu'en fin de saison des pluies. Aux phénomènes de dilution se superposent donc des variations saisonnières observées dans chaque station (voir Korhogo : ROOSE, 1979).

3° Évolution de la charge soluble en fonction du type d'eau

Il apparaît au tableau X que les eaux recueillies sous forêt dense sont peu minéralisées (résistivité = 50 000 à 17 000 $\Omega.cm$), qu'elles se chargent rapidement au contact de la voûte foliaire et des horizons humifères du sol, puis qu'elles se purifient en traversant l'épaisse couche de sédiments sablo-argileux tertiaires : les eaux de source sont en effet moins chargées que les eaux de drainage sauf en sodium et silice.

Les eaux de drainage oblique (case ERLO) sont moins chargées que les eaux de percolation recueillies au fond des lysimètres (ne contenant pas de végétation). La différence souligne l'importance du rôle de récupération des éléments en solution joué par le réseau racinaire en milieu forestier.

TABLEAU XI

Caractéristiques des eaux de drainage à plus de 150 cm de profondeur.
Adiopodoumé : Influence du couvert végétal et de la fertilisation

	Teneurs moyennes pondérées (en ppm)						Variation totale des moyennes
	Forêt secondaire	Ananas 1975	<i>Panicum</i> non irr. fert { 1 2 3	<i>Stylos.</i> non irr. fert { 1 2 3	Maïs fertilisé doses { 0 doses { 1 0,5 doses { 2 4		
Nombre échantillons.....	155	50	80	80	54 × 2	54 × 3	
Ca.....	7-17	23,3	6,6 13,2 31,6	10,4 28,6 30,4	9,1 12,2	19,5 39,8 40,4	6-40
Mg.....	5-6,3	11,1	1,18 2,83 5,57	1,32 5,40 6,32	2,1 2,5	4,0 4,1 5,8	1-11
K.....	13-1	0,10	0,65 0,84 0,31	0,33 0,71 0,71	5,80 3,41	0,48 0,45 3,49	0,1-13
C.....	8-2	3,5	2,49 2,73 2,88	4,23 4,88 3,58	1,4 1,5	1,1 1,3 1,8	1-8
N tot.....	3-22	21,4	1,4 1,2 2,5	5,2 13,1 16,2	8,0 7,9	7,9 12,6 23,0	1-23
PO ₄	0,7-0,2	traces	0,19 0,22 0,25	0,30 0,24 0,19	0,06 0,05	0,05 0,07 0,13	0,01-0,7
SiO ₂	8,3-5,8				7,30 7,35	5,4 5,9 6,4	5-8
CO ₃ H.....	15-30				22,3 19,3	15,7 17,9 0,1	15-30
SO ₄	6,2-2		8,9 32,4 85,3	8,1 23,0 36,5	10,2 14,9	37,3 58,0 98,6	2-99
Cl.....	6-9				2,4 3,9	5,3 9,4 14,8	2-15

Les eaux sont légèrement acides (pH = 5 à 7) et s'échauffent de quelques dixièmes de degré à mesure qu'elles pénètrent en profondeur (23-24° C). Les teneurs en bases sont faibles et augmentent progressivement en profondeur. Les teneurs en phosphate, fer et alumine des eaux naturelles augmentent légèrement au contact du feuillage (surtout léger) et davantage dans l'horizon humifère : elles diminuent en profondeur et sont très faibles dans les eaux de source. Dans les sols ferrallitiques, les eaux de percolation sont généralement bien oxygénées ; la solubilisation de ces éléments dans les conditions de pH des eaux est réduite et leur migration est liée à celle des matières organiques et des argiles, du moins dans les horizons superficiels. La charge en silice des eaux de pluie ($\text{SiO}_2 = 0,7$ ppm) augmente à mesure qu'elles traversent la strate arborée (1,3 ppm), entrent en contact avec le sol (3,5 ppm) et percolent à travers le profil (8 ppm) pour sortir au niveau des sources (8,4 ppm). Chlorures et sulfates sont peu abondants dans le milieu naturel (1 à 6 ppm) : les apports par les embruns marins sont nets et les teneurs en Cl et Na diminuent à mesure qu'on s'éloigne de l'océan. Les bicarbonates forment plus du quart de la charge soluble, malheureusement nous n'avons pu en faire beaucoup de détermination à cause des délais d'analyse.

4° Influence du type de couvert végétal et de la fertilisation

Au tableau XI sont réunies les caractéristiques chimiques des eaux de drainage collectées vers 150 cm de profondeur à Adiopodoumé, sous forêt dense, ananas, cultures fourragères et maïs, soumis à diverses doses de fertilisation. Nous ne relèverons ici que les conclusions générales qui s'en dégagent.

Le sol étant très désaturé, on aurait pu penser que les cations apportés par la fumure ou libérés par la minéralisation de la litière ou des matières organiques seraient énergiquement fixés par le complexe absorbant. Or, il s'en perd énormément dans les eaux de drainage profond. Ce sol ferrallitique se comporte comme un filtre imparfait, car il est très perméable et sa capacité d'échange de cations est réduite (kaolinite et matières organiques vite décomposées). Par contre, le réseau racinaire intervient très efficacement pour prélever les éléments dont les végétaux ont besoin. La charge soluble des eaux de percolation va donc dépendre du volume des écoulements (dilution), mais aussi de l'équilibre qui s'établit progressivement entre l'offre d'éléments solubles (fertilisation, minéralisation des matières organiques, cations échangeables) et la demande des végétaux : la capacité de stockage du sol n'intervient que secondairement.

Nous avons montré qu'à Azaguié les eaux de drainage recueillies sous bananeraie (forte fertilisation et faible capacité d'absorption des racines) sont nette-

ment plus chargées que sous la forêt voisine, au point de provoquer la pollution des eaux de surface (plus de 40 ppm de nitrates) (ROOSE, GODEFROY, 1977).

A Adiopodoumé, la lixiviation est très variable en fonction du type de production végétale et du niveau de fertilisation. Sous culture peu fertilisée, les eaux sont souvent moins chargées que sous forêt (c'est le cas pour Mg, K, C organique, PO_4 , $\text{SiO}_2\text{-CO}_3\text{H-Cl}$). Mais si les doses d'engrais dépassent certains seuils, l'excédent est rapidement lixivié. Le seuil diffère pour chaque plante en fonction du niveau d'exportation pour les récoltes. Ainsi, sous *Panicum* et *Stylosanthes*, des quantités considérables de tiges et de feuilles sont exportées à chaque fauche (15 à 35 t/ha/an de matières sèches) ; ceci représente une énorme exportation de potasse à peine équilibrée par des apports de l'ordre de 500 kg/ha/an de K pour la graminée et 300 unités pour la légumineuse. Les teneurs en K des eaux de drainage sont restées très basses malgré l'importance des apports (ROOSE, TALINEAU, 1973). Sous maïs peu ou pas fertilisé (doses 0 et 0,5), la production est si faible que les eaux sont dix fois plus riches en K que sous culture fourragère. Les teneurs en K sont faibles lorsque la fumure est équilibrée par les exportations (doses 1 et 2) et augmentent à nouveau lorsque les apports dépassent les exportations (dose 4). Sous ananas fertilisé, les teneurs en K des eaux de drainage restent très faibles sauf durant une courte période qui suit la maturité des fruits (ROOSE, LACOEUILHE, 1975).

Le magnésium n'atteint des teneurs élevées que sous ananas et bananeraie, par contre, les teneurs en calcium varient énormément dans les eaux de percolation, suite à un apport de chaux ou d'engrais acides (azote, chlorure, sulfate). Ainsi, sous culture non fertilisée, les teneurs en calcium sont du même ordre que sous forêt (5 à 10 ppm) mais dès que les doses d'engrais augmentent, le calcium est chassé du complexe absorbant et atteint 30 à 100 ppm dans le drainage.

Quant à l'azote qui n'est pas retenu par le sol (sauf combiné aux matières organiques et aux micro-organismes), il est extrêmement mobile mais bien capté par les plantes.

Dans le milieu naturel forestier ou savannicole, la lixiviation de l'azote est limitée. Le *Panicum*, graminée très productive, en consomme énormément (600 à 1 000 kg/ha/an selon les disponibilités). Le *Stylosanthes* exporte autant d'azote que le *Panicum*, mais fixe jusqu'à 300 kg/ha/an d'azote atmosphérique grâce au *Rhizobium* vivant en symbiose dans ses racines : une partie de l'azote libéré par le sol est lixivié. Quant à l'ananas et au maïs qui exigent des fumures importantes pour atteindre des productions élevées, ces plantes n'arrivent plus à fixer tout l'azote disponible et il s'en perd 30 à 60 % dans les eaux de drainage. Des études à l'azote 15 sur des lysimètres du même type installés par l'IRAT au Centre de Recherches

TABLEAU XII

Comparaison entre la terre érodée et le sol superficiel en place
 — sous maïs (E = 90 t/ha dont 11 % de suspension)
 — sous forêt pente 11 % (E = 50 kg/ha dont 80 % de suspension)
 — sous forêt pente 69 % (E = 450 kg/ha, 33,3 % de suspension)

	Culture			Forêt (R3)			Forêt (R2)			Turricules R3
	<i>p</i> = 7 %			<i>p</i> = 11 %			<i>p</i> = 65 %			
	Érosion	Sol en 0-10 cm	Indice sélect. 1/3	Érosion	Sol 0-7 cm	Indice sélect. 4/5	Érosion	Sol 0-5 cm	Indice sélect. 7/8	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
GRANULOMÉTRIE										
Argile (%).....	14,1	11,4	1,24	43,4	11,7	3,71	28,4	12,3	2,31	15,2
Limon fin.....	3,7	2,8	1,32	26,3	2,6	10,1	12,5	1,9	6,58	2,7
Limon grossier.....	2,1	2,2	0,95	4,5	2,0	2,25	4,7	3,2	1,47	3,2
Sable fin.....	16,6	29,5	0,56	12,0	23,5	0,51	15,8	24,1	0,66	39,7
Sable grossier.....	63,5	54,1	1,17	13,8	60,2	0,23	38,6	58,5	0,66	39,2
MATIÈRES ORG. (%)..										
Carbone.....		18,5								52,56
Azote.....	20,01	10,8	1,85	260,6	23,8	10,9	92,87	36,34	2,56	30,49
C/N.....	1,59	0,84	1,89	21,56	1,51	14,2	6,46	2,60	2,48	2,75
Acides humiques.....		2,9					14,4	14,0		11,1
— fulviques.....		1,45		23,98	2,87	8,36	14,6	1,90	7,7	4,87
Taux carbone humifié (%).....		1,46		25,30	2,28	11,1	6,17	1,94	3,2	8,47
		27,7								43,8
CATIONS										
ÉCHANGEABLES (mé)										
Ca (mé/100 g).....	1,92	0,82	2,34	10,5	0,45	23,4	11,4	6,40	1,78	1,23
Mg.....	0,57	0,46	1,25	5,38	0,90	6,0	5,57	3,90	1,43	1,54
K.....	0,31	0,14	2,22	0,61	0,11	5,5	0,50	0,17	2,94	0,13
Na.....	0,14	0,01	14	0,44	0,03	14,5	0,11	0,06	1,89	0,05
C.E.C.....		3,63					23,2	14,7	1,58	
pH eau.....										4,2
ÉLÉMENTS TOTAUX										
(triacide)										
Perte au feu (%)....					5,1					7,5
Résidus insolubles....					82,1					78,9
Silice combinée.....				7,0	6,2	1,13	8,8	5,70	1,54	5,8
Al ₂ O ₃ combinée.....				3,8	4,1	0,9	7,47	3,58	2,08	4,5
Fe ₂ O ₃ } total.....				3,1	2,4	1,3	3,07	1,85	1,66	2,52
} libre.....				—	1,3					1,52
TiO ₂				0,55	0,8	0,7	0,60	0,43	1,40	0,38
P ₂ O ₄ { total (%)....	0,76	0,64	1,19	1,59	0,710	2,24	2,423	1,839	1,32	0,600
{ Olsen.....		0,15	—	0,39	0,070	5,60	0,6	0,1	6,0	0,120
Ca en mé/100 g.....	2,63	2,08	1,26	12,26	0,68	18,0	16,57	8,90	1,86	1,65
Mg.....	1,86	1,70	1,09	5,3	1,56	3,4	5,77	4,50	1,28	2,85
K.....	1,25	1,20	1,03	1,3	0,54	2,4	1,90	0,55	3,45	0,50
Na.....	0,51	0,50	1,02	0,58	0,42	1,4	0,80	0,70	1,14	0,26

* Analyse 3 × 15 prises en 2/73 (voir tableau 51.3, Roose 1973 = Thèse). Toutes les granulométries ont été ajustées à 100 % de matière minérale.

** Les indices de sélectivité sont inférieurs à la réalité puisqu'on a négligé les pertes en solubles dans les eaux de ruissellement.

Les teneurs en fines, matières organiques et éléments nutritifs échangeables et totaux sont nettement plus élevées dans les terres érodées que dans le sol en place d'autant plus que l'érosion est faible (sélectivité forêt 11 % > forêt 65 % > culture maïs).

Agronomiques de Bouaké ont montré que, sous cultures annuelles, l'azote lixivié provient de la minéralisation des matières organiques du sol plutôt que des engrais (CHABALIER, 1976).

Le phosphore ne migre qu'en petite quantité, complexé par les matières organiques : lorsque les micro-organismes en libèrent, il est aussitôt capté par les plantes ou insolubilisé au contact du fer et de l'alumine libres.

En résumé, l'azote, le calcium et le magnésium (ainsi que le sodium peu étudié ici) sont extrêmement mobiles, tant en milieu tropical que tempéré. Il en découle des risques élevés de lixiviation et d'acidification rapide du sol si on utilise des doses importantes et répétées d'engrais concentrés.

Le phosphore, par contre, est le seul élément qui puisse dans une certaine mesure être stocké dans les sols en région tropicale humide. Quant au potassium qui est rapidement rétrogradé dans le réseau des argiles 2/1 en région tempérée, il est particulièrement mobile dans les sols tropicaux où la kaolinite domine.

Si les sols ferrallitiques sont des filtres imparfaits pour retenir les éléments en solution, les plantes interviennent de façon sélective et très efficace en captant les éléments nutritifs qui sont indispensables à leur croissance : la comparaison des charges solubles contenues dans les eaux de percolation sous forêt en présence (ERLO) ou en absence de végétation (DV) en est un exemple frappant.

5° Évolution de la charge soluble en fonction du climat

La charge soluble des eaux superficielles observée depuis la forêt subéquatoriale (Abidjan) jusqu'à la savane présaharienne (Ouagadougou) n'est pas fondamentalement différente : tout au plus peut-on constater que les eaux provenant des zones de savane sont d'autant plus pauvres qu'elles circulent dans un milieu produisant moins de matières organiques. Ces différences sont un peu plus accentuées dans les eaux de ruissellement (résistivité = 17 à 75 000 Ω .cm) que dans les eaux de drainage (résistivité = 16 à 32 000 Ω .cm). A mesure qu'on s'éloigne de la mer et que le climat devient plus sec, Na, Cl, C, N et Fe_2O_3 diminuent. Par contre, la silice des eaux de nappe augmente avec l'aridité du climat ($SiO_2 = 8,4$ ppm à la source d'Adiopodoumé, 19,2 ppm à la source de Korhogo, 36 ppm dans les eaux de nappe de Saria).

Des résultats publiés par COLLINET (1971) au Gabon, par BLANCANEUX (1979) en Guyane et par NORTCLIFF et THORNES (1977 et 1979) en Amazonie (Brésil) sur les caractéristiques des eaux de surface en milieu forestier équatorial, encore plus humide qu'Adiopodoumé (pluie $\approx 3\ 500$ mm/an), on pourrait tirer des conclusions analogues : les charges solubles sont du même ordre de grandeur quoique encore un peu plus

faibles qu'en basse Côte d'Ivoire (résistivité du ruissellement = 40 à 50 000 Ω .cm, résistivité drainage $\approx 35\ 000$ Ω .cm). L'ordre de classement des stations diffère d'un élément à l'autre en fonction de la roche mère et de l'épaisseur du sol. Tous ces sols sont extrêmement désaturés et pauvres en éléments altérables ou mobilisables. Tout se passe comme si la végétation forestière qui forme une biomasse imposante vivait pratiquement en circuit fermé grâce à l'efficacité remarquable des racines pour capter les éléments dissous dans les eaux de percolation.

Il semble que la charge soluble des eaux superficielles des sols tropicaux soit liée à l'évolution des matières organiques (production de litière, humification, minéralisation et prélèvement par les racines) ainsi qu'aux apports marins ou continentaux (embruns ou poussières du désert) (ROOSE, 1979) tandis que les eaux profondes seraient en équilibre thermodynamique avec le monde minéral qui les entoure (altération et néoformation) (TARDY, 1969 ; GARDNER, 1970).

5.1.2. LA CHARGE SOLIDE DES EAUX

Les colloïdes lessivés dans les eaux de drainage étant peu abondants (10 à 300 mg/l) nous n'avons que quelques indications sur leur composition. En comparant les analyses d'une série d'eaux de drainage oblique (R2) avant et après floculation, il apparaît que les floculats comprennent des phosphates, du calcium, de la silice, des matières organiques (C et N) et probablement du fer et de l'alumine.

L'analyse de 5 échantillons de floculats (cumulés pendant 5 ans), par le Centre de Pédologie Biologique de Nancy, montre que les teneurs en carbone organique diminuent progressivement de 15,2 % dans les floculats des eaux de ruissellement, à 7-5 % dans les floculats de drainage oblique et à 4 % dans la charge solide des eaux de source. Le rapport C/N décroît dans le même sens, de C/N = 13-15 en surface à 10 dans les eaux de source : ces matières organiques associées aux argiles sont bien évoluées, riches en fractions aminées — donc probablement d'origine microbienne — ce qui leur permettrait de stabiliser les fractions argileuses à l'état dispersé (communication personnelle écrite de B. SOUCHIER). Quant aux minéraux décelés aux rayons X, il s'agit en majorité de kaolinite et secondairement de quartz et goethite.

Les terres érodées migrent sous forme de particules fines en suspension plus ou moins stables et de matériaux plus grossiers (sables et agrégats incomplètement désagrégés par la battance des pluies ou le travail de sape du ruissellement) qui rampent à la surface du sol. La texture et la composition chimique de l'horizon superficiel sont généralement intermédiaires entre ces deux matériaux. Cependant, si on calcule la composition moyenne des terres érodées, on constate

que celles-ci sont plus riches en particules fines (jusqu'à 20 ou 50 μ), en matières organiques et en nutriments (N-P-K, bases totales et échangeables). De plus, l'érosion est d'autant plus sélective qu'elle est moins brutale, soit que le sol soit mieux couvert, soit que le relief soit moins accentué (sélectivité forêt sur pente 11 % > forêt, pente 65 % > maïs, pente 7 % > sol nu pente 7 %).

Enfin (voir tabl. XII), les terres érodées sous forêt très pentue (65 % en R2) contiennent plus de matières organiques et moins d'argile que les terres érodées sous forêt poussant sur des versants moins raides (11 % en R3). Sous maïs, l'érosion est beaucoup moins sélective que sous forêt : elle entraîne relativement plus de sables (billons dans le sens de la pente), moins de matières organiques et de cations (sols plus pauvres) que sous forêt. Cependant, il est probable que l'usage répété d'engrais augmente légèrement les pertes en nutriments (N-P-K, mais aussi Ca et Mg chassés du complexe absorbant par les engrais acides), comme l'ont montré une série de tests au simulateur de pluie (ROOSE, ASSELINE, 1978).

5.2. Les flux positifs

Il s'agit de chiffrer les apports entrant dans la tranche de sol considéré (2 m) en milieu forestier (pente moyenne) et sous une culture de maïs (moyennement fertilisé).

5.2.1. LES APPORTS PAR LES PLUIES

Des échantillons d'eau de pluie ont été recueillis régulièrement pendant 5 ans (1970-74) dans des flacons en plastique (surmontés d'un entonnoir en plastique dont la tige est obstruée d'un bouchon de coton destiné à filtrer l'eau aussitôt captée) à ciel ouvert (PDV) et sous le couvert d'une forêt secondarisée (PR2) (107 échantillons simples ou composites analysés). Les récipients ont été changés après chaque pluie et les échantillons refiltrés le même jour. Des essais de stabilisation au bactéricide (P.H.B.M. à 5 ‰) n'ont fait apparaître aucune différence significative de teneurs en cations et azote par rapport aux échantillons naturels. Les teneurs pondérées par les hauteurs de pluie (voir tabl. XIII) reflètent les apports en éléments solubles de la pluie elle-même et en éléments solubilisés des poussières qui ont pu couvrir les capteurs et éventuellement le couvert végétal entre deux averses. D'après CROIZAT, cité par BERNAHRD-REVERSAT (1975) il y aurait peu de dépôts de poussières atmosphériques dans la région d'Abidjan. Les teneurs observées au Banco, distant de 15 km du Centre O.R.S.T.O.M., sont très voisines des nôtres (BERNAHRD-REVERSAT, 1975).

Les apports par les précipitations abondantes (voir tabl. XIII) ne sont pas négligeables dans le bilan du milieu naturel : près de 30 kg/ha/an de calcium, carbone organique, azote total (organique + minéral), de chlorures et de sulfates, plus de 10 kg d'azote minéral (nitrique + ammonium), de sodium et de silice. Si la plupart des auteurs admettent des apports de 5 à 10 kg/ha/an d'azote minéral par les pluies, bien peu ont étudié les apports d'azote organique (acides aminés des pollens, spores et poussières) à la faveur des pluies ; or, ceux-ci sont deux fois plus importants que les apports minéraux à Abidjan comme à Lamto (VILLECOURT, ROOSE, 1977). La proximité de la mer se manifeste par une haute teneur en Na et Cl ainsi qu'en N total dans les eaux de pluie. D'une station à l'autre, les teneurs sont assez voisines et les apports dépendent surtout du volume des pluies.

5.2.2. LES APPORTS PAR LES ENGRAIS

Les cultures de maïs ont reçu à chaque cycle (2 par an) une fumure minérale correspondant à l'exportation théorique de 30 q d'épis soit

30	+	30	kg/ha/an d'azote sous forme de sulfate
			d'ammoniaque
10			kg/ha/an de phosphore sous forme de super simple
9	+	9	kg/ha/an de potassium sous forme de chlorure
6			kg/ha/an de calcium } sous forme de
3			kg/ha/an de magnésium } dolomie

Les résidus de culture sont laissés à la surface du sol et les engrais légèrement enfouis sur la ligne de plantation (voir protocole essais DVM : ROOSE, 1974).

5.3.3. LES APPORTS PAR LES REMONTÉES BIOLOGIQUES

Pour expliquer la richesse relative de sols sous couvert forestier par rapport à ceux qui sont sous savane, on fait souvent appel aux remontées de particules fines et de nutriments par certains animaux fouisseurs et surtout par le réseau racinaire puisant dans les zones d'altération profondes et les concentrant à la surface du sol. Il existe effectivement sous forêt un gradient négatif très prononcé de concentration en nutriments depuis la surface jusqu'aux horizons profonds du sol, mais celui-ci provient essentiellement de l'apport massif de litière (8 à 12 t/ha/an) et du pluviolessivage. Une fraction des minéraux de cette litière provient probablement de ces remontées profondes à contre-courant des pertes par lixiviation ; malheureusement, nous ne connaissons aucun moyen de l'évaluer.

TABLEAU XIII

Teneurs moyennes (en ppm) et apports (en kg/ha/an) par les eaux de pluie au-dessus et en dessous du couvert forestier

	Ca	Mg	K	Na	C org.	N tot.	N NH ₄	N NO ₃
(1) PDV ciel ouvert.....	1,8	0,4	0,3	0,82	1,3	1,4	0,24	0,26
(1) PR ₂ /forêt.....	3,8	2,2	3,9	1,75	7,4	2,5	0,27	0,74
(2) BANCO/forêt.....	2 à 3,3	1,2 à 3,6	4 à 12	—	—	3 à 6	—	—
(2) BANCO ciel ouvert.....	0,90	0,41	0,29	—	—	—	—	—
Apports pour :								
— 2 100 mm pluie.....	37,8	8,4	6,3	17,2	27,3	29,4	5,04	5,46
— 1 800 mm PLV**.....	68,4	39,6	70,2	31,5	133,2	45,0	4,86	13,32
	PO ₄	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Cl	SO ₄	CO ₃ H*	RES
(1) PDV ciel ouvert.....	0,32	0,04	0,08	0,70	2,1	1,2	5,1	4 880
(1) PR ₂ /forêt.....	0,87	0,12	0,11	1,3	4,9	2,5	18,0	2 500
(2) BANCO/forêt.....	0,4 à 2,2	—	—	—	—	—	—	—
(2) BANCO ciel ouvert.....	0,1	—	—	—	—	—	—	—
Apports pour :								
— 2 100 mm pluie.....	6,72	0,84	1,68	14,7	44,1	25,2	107,1	—
— 1 800 mm PLV**.....	15,66	2,16	1,98	23,4	88,2	45,0	324,0	—

(1) ROOSE, 1979.

(2) F. BERNHARD-REVERSAT (1975) sur 6 échantillons.

* CO₃H estimé par balance anions = cations.

** Pluiolessivage si 14 % des pluies sont interceptées par le couvert.

Quant aux animaux qui puisent à grande profondeur des matériaux fins pour construire des édifices épigés, ils sont actuellement absents du paysage. Les activités des termites, vers de terre et mille-pattes seront comptabilisées au titre des cycles internes, car ces organismes ne font que brasser les horizons superficiels en les mélangeant à la litière.

5.3. Les flux négatifs

5.3.1. LES PERTES PAR ÉROSION

Elles comportent les pertes en solution dans les eaux de ruissellement et les pertes sous forme solide dans les suspensions fines et les terres de fond (tabl. XIV et XV, colonnes 4 et 5).

Sous forêt, nous avons retenu l'exemple assez répandu (voisin de R3) où les pentes sont comprises entre 7 et 20 %. Dans ce cas, le ruissellement moyen annuel atteint 0,5 % des pluies (soit 105 m³) et les

pertes en terre 50 kg/ha/an, dont 80 % de suspensions fines. Les pertes par érosion sont alors extrêmement réduites (16 kg/ha/an de C + N, 2,2 kg de bases totales, 16 kg de fer + alumine + silice combinée). Les bases circulent en majorité sous forme soluble, tandis que fer, silice et alumine sont associés aux migrations solides ; carbone, azote et phosphore sont liés aux suspensions fines et au ruissellement.

Sous culture, nous avons choisi le maïs moyennement fertilisé, pour tenir compte des études effectuées dans les autres stations de notre réseau. Le ruissellement moyen est de 25 % (5 250 m³/ha/an) et les pertes en terre de l'ordre de 90 t/ha/an dont 10 t de suspensions (sur une pente de 7 %). Les pertes ne sont plus négligeables, car, si les teneurs sont légèrement plus faibles, les masses sont nettement plus fortes : plus de 1 800 kg/ha/an de carbone ; 183 kg d'azote, 105 kg de Ca + Mg, 54 kg de potasse, 33 kg de phosphore et plus de 8 540 kg de fer, alumine et silice combinée. Les bases et l'azote sont liées tant au ruissellement qu'aux terres érodées. Par contre,

TABLEAU XIV

Schéma de bilan géochimique d'une parcelle sous forêt dense secondaire sur un sol ferrallitique très désaturé sur matériaux sablo-argileux.
Adiopodoumé : 1964-76

Apports			Pertes						Stocks		Cycles internes			
Pluie 2 100 mm	Engrais	Remont. biolog.	Total						Végét. 510 t/ha par déf ^t	Sol 0-30 cm 3 900 t/ha	Litière 10 t/ha	Remont. mésosofaune 4 t/ha/an	Pluvioless. 1 800 mm en + de 1	
			Érosion solide 50 kg/ha	Ruiss. solub. 105 m ³	Drain. solub. 880 mm	Export. bois feu	kg/ha/an 4 + 5 + 6	Solub. % total 5 + 6/8						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
Carbone....	27,3	0	P.M.	13,04	1,18	73,92	P.M.	88,14	85		45 670		122,0	105,9
Azote.....	29,4	0		1,07	0,47	29,48		31,02	97	1 400	4 279	217,7	11	15,6
Phosphore..	2,19	0		0,034	0,08	2,07		2,18	98	100	{ ass. 81 tot. 1 125	10,4	1,05	2,9
Calcium....	37,8	0	P.M.	0,21	0,59	46,64	P.M.	47,44	99,5	1 200	échange. 167	68,0	1,3	30,6
Magnésium..	8,4	0		0,04	0,28	30,36		30,68	99,8	530	151	38,5	1,4	31,2
Potassium..	6,3	0		0,06	0,50	69,08		69,64	99,9	600	66	58,9	0,78	63,9
Sodium.....	17,2	0		0,01	0,20	25,34		25,55	99,9		27		0,24	14,3
SiO ₂	14,7	0	P.M.	6,85	0,37	68,20	P.M.	75,42	91		308 500		232	8,7
Al ₂ O ₃	1,7	0		6,44	0,03	2,77		9,24	30		217 900		180	0,30
Fe ₂ O ₃	0,8	0		2,27	0,08	2,46		4,81	53		137 100		101	1,32
SO ₄	25,2	0	P.M.		0,33	49,72	P.M.	50,05	100					19,8
Cl.....	44,1	0			0,29	48,40		48,69	100					44,1
CO ₂ H.....	107,1*	0			2,9	198,00*		200,90	100					217,0
Quartz.....		0		19,8		0		19,80	0				3 160	
Total....	322,2	0		50 kg	7,30	646,44		703,56	92,9	510 t/ha	3 900 t/ha			555,6

P.M. = pour mémoire.

* Estimé par balance cationique.

le fer, l'alumine et la silice (combinée et surtout le quartz) migrent essentiellement liés aux solides. On note donc que le labour (dénudation du sol et mélange des horizons) et la culture de plantes peu couvrantes entraînent dans ces régions où les pluies sont particulièrement agressives, des pertes très dangereuses pour l'équilibre du milieu.

5.3.2. LES PERTES PAR LIXIVIATION DANS LES EAUX DE DRAINAGE

Aux tableaux XIV et XV (colonne 6), il apparaît que les pertes moyennes en éléments solubles dans les eaux de percolation sont importantes en raison du volume considérable du drainage (880 mm sous forêt, 640 mm sous maïs). La masse totale de solubles lixiviés est finalement du même ordre (650 kg/ha/an) mais la répartition est assez différente selon la couverture végétale. Sous forêt, l'essentiel des solubles lixiviés provient des bicarbonates, du carbone, de la silice et des bases. Sous maïs, faiblement fertilisé, les éléments les plus lixiviés sont dans l'ordre les sulfates, le calcium, les bicarbonates et l'azote ; par contre, la potasse et le phosphore sont peu représentés dans les eaux de percolation sous maïs (carence en K du sol ?). Il existe des relations étroites entre la lixiviation du calcium, l'acidification généralisée des sols sous culture et l'usage intensif ou répété d'engrais acides (azote sous toutes ses formes, sulfates, chlorures).

5.3.3. LES EXPORTATIONS PAR LA RÉCOLTE (tabl. XIV, col. 7)

Dans le milieu naturel forestier tout est recyclé sur place. Cependant, près des villes, les bois morts sont souvent ramassés. D'après BERNHARD-REVERSAT (1975), la chute de branches s'élèverait à 1 800 kg/ha/an \pm 50 %, ce qui correspondrait en cas de ramassage à une exportation très faible de nutriments : 13 kg d'azote, 16 kg de bases, 0,7 de phosphore.

Sous maïs fertilisé à une dose théorique correspondant à l'exportation de 3 t d'épis par hectare et par cycle, on a récolté 9 t d'épis à l'hectare en 3 ans (donc 2 fois moins que prévu). Les teneurs observées sont telles que l'exportation par 3 t/ha/an d'épis correspond à une perte pour le sol de 54 kg d'azote, 12 kg de potassium, 9 kg de phosphore, 3 kg de magnésium, 1,5 kg de calcium, 4 kg de silice. Les pertes par exportation peuvent être bien plus considérables sous d'autres cultures (fourrage, ananas, etc.).

Encore ne s'agit-il que de l'exportation par les épis tandis que les pailles et les mauvaises herbes qui poussent entre les cycles sont recyclées rapidement.

5.4. Les cycles internes (1)

En dehors de ce qui entre ou sort de la boîte noire (végétation, plus 2 mètres supérieurs du sol) il faut distinguer des cycles internes au système. Nous en aborderons trois, ayant trait au lessivage de la voûte foliaire par les eaux de pluie, au recyclage des résidus de culture et de la litière forestière et, enfin, à l'activité de la mésofaune dans les horizons superficiels du sol.

5.4.1. LE PLUVIOLESSIVAGE (tabl. XIII)

Au paragraphe 5.2.1, nous avons montré que les apports en solubles par les pluies s'élèvent à 322 kg/ha/an. Or, lors du passage à travers la voûte foliaire, les eaux s'enrichissent en tous les éléments (teneurs doublées) et particulièrement en matières organiques (6 \times), en magnésium (5 \times) et surtout en potassium (13 \times). Cette augmentation des teneurs n'est plus due exclusivement à la diminution du volume des pluies arrivant effectivement au sol (14 % d'interception d'après nos mesures), mais aussi aux poussières déposées sur le feuillage (peu abondants d'après CROIZAT) et surtout aux phénomènes de récrétion par la végétation (BERNHARD-REVERSAT, 1975). Les effets du pluviolessivage sont certainement moins développés sous le maïs, qui occupe beaucoup moins le terrain dans le temps et dans l'espace qu'une forêt.

Ces restitutions rapides de 556 kg/ha/an de matières solubles ne constituent qu'un cycle interne au système : elles ne l'enrichissent pas mais permettent à une végétation luxuriante de se développer sur des sols très pauvres en accélérant la circulation des éléments actifs.

5.4.2. LE RECYCLAGE DES LITIÈRES ET DES RÉSIDUS DE CULTURE (tabl. XIV et XV, col. 12)

Aucune mesure de production de litière n'a été faite dans les parcelles forestières d'Adiopodoumé, mais ce travail a été réalisé dans la forêt voisine du Banco (BERNHARD-REVERSAT, 1975). D'après l'auteur, la production totale de litière varie de 8 à 12 t/ha/an en basse Côte d'Ivoire en fonction du développement de la forêt. En tenant compte d'une production moyenne de 10 t/ha/an (7,5 t de feuilles, 0,8 t de fleurs et fruits, 1,7 t de bois) et des teneurs de chaque

(1) Par cycle interne on entend la circulation de matière à l'intérieur d'un système considéré (boîte noire).

TABLEAU XV

Schéma de bilan géochimique d'une parcelle en maïs fertilisé (dose 1) sur un sol ferrallique très désaturé sur matériaux sablo-argileux.
Adiopodoumé : 1964-76

Apports			Pertes						Stocks		Cycles internes			
Pluie 2 100 mm	Engrais	Total	Érosion solide 80 + 10 t/ha	Ruiss. solub. 5 250 m ³	Drain. solub. 640 mm	Export. 3 t/ha/an épis sec	Total		Végét.	Sol 0-30 cm 4 500 t/ha	Résid. cult. tiges + feuilles + spathes	Remont. méso- faune	Pluvio- lessivage	
							kg/ha/an 4 + 5 + 6	Solub. % du total 5 + 6/8						10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
Carbone....	27,3	0	27,3	1 801,2	64,79	7,04	1 200	1 873	4	0	23 310	2 400	0	P.M.
Azote.....	29,4	2 × 60*	149,4	143,4	39,38	50,56	54	233	39		2 310	48		
Phosphore..	2,19	2 × 10	22,2	29,89	3,47	0,32	9	33,7	11		{ ass. 313 { tot. 2093	13,2		
Calcium....	37,8	2 × 6	49,8	total 47,32	22,87	124,80	1,5	195,0	76	0	échang. 324	15	0	P.M.
Magnésium..	8,4	2 × 3	14,4	20,35	14,98	25,60	3	60,9	67		202	8,4		
Potassium...	6,3	2 × 18	42,3	43,10	10,46	3,07	12	56,6	24		70	54		
Sodium.....	17,2		17,2	9,24	5,84	19,20**	0,3**	34,3	73		10	0,6*		
SiO ₂	14,7		14,7	4 520*	18,38**	34,55	3,9	4 573	1	0	308 500	15	0	P.M.
Al ₂ O ₃	1,7		1,7	2 370*	1,47**	1,92**	0,6	2 373	0,1		217 900	3,6		
Fe ₂ O ₃	0,8		0,8	1 630*	3,94**	1,92**	0,5	1 636	0,3		137 100	6		
SO ₄	25,2		25,2		57,8**	238,72				0		18	0	P.M.
Cl.....	44,1		44,1		21,0**	33,92								
CO ₃ H.....	107,1*		107,1		62,5**	100,48								
Quartz.....				79 385	0	0								
Total....	322,2		516,2	90 000	326,88	642,11				0	4 500 t/ha			

* Deux cultures de maïs par an.

** Estimation des teneurs par comparaison avec le milieu forestier ou avec des cultures de céréale.

CO₃H est estimé par calcul de la balance cationique.

fraction au Banco, on obtient un transit dans la litière de 218 kg/ha/an d'azote, 68 kg de calcium, 59 kg de potassium, 39 kg de magnésium et 11 kg de phosphore. C'est donc une masse considérable de nutriments (dont 75 % sont contenus dans les feuilles) qui enrichit chaque année les horizons humifères superficiels. La libération des éléments minéraux de la litière est progressive (N-Mg) ou rapide (K-Ca) selon les éléments et leur intégration dans les molécules végétales.

Dans l'essai sur maïs, la production de résidus de culture (tiges + feuilles + spathes) a varié de 18 à 34 q/ha/cycle pour la dose 1 de fertilisation. En année moyenne, on peut donc prévoir une production de 6 t/ha/an de résidus de culture secs (dessèchement à l'étude ventilée jusqu'à poids constant à 40° C). L'immobilisation dans les pailles représente 48 kg/ha/an d'azote, 54 kg de potassium, 13,2 kg de phosphore, 15 kg de calcium, 8,4 kg de magnésium, 2 400 kg de carbone organique, 15 kg de silice, 6 kg de fer et 4 kg d'alumine. Si l'on exporte à la fois les pailles et les grains, les pertes en nutriments (surtout N-P-K) sont élevées et difficiles à équilibrer économiquement par des apports d'engrais.

Remarquons enfin que le retour au sol de matières organiques, azote, calcium et magnésium est plus important sous forêt dense que sous la culture de maïs faiblement fertilisée. Certes, en doublant ou quadruplant la dose d'engrais on peut atteindre, si les pluies sont favorables, une production de 50 q/cycle de paille légèrement plus riches en nutriments ; mais à quel prix ! Par ailleurs, l'enfouissement deux fois l'an de 5 t/ha/de paille de maïs n'aura probablement pas le même effet sur le sol que l'apport en surface et étalé toute l'année de 10 t/ha de litière forestière (GODEFROY, 1974).

5.4.3. LES REMONTÉES PAR LA MÉSOFAUNE

Dans la zone forestière des sables tertiaires, les grandes termitières sont rares. Ceci ne veut pas dire que les termites ne sont pas actifs sous forêt ; ils jouent un rôle considérable dans la disparition du bois mort et dans la minéralisation des litières et autres matières organiques du sol. Ils ne remontent pas de grandes quantités de matériaux fins, mais participent à la dynamique des matières organiques et à la perforation des horizons humifères.

A Adiopodoumé, une seule petite termitière a été repérée en R2 (100 m²) et aucune en R3 (200 m²) ; par contre, les boulettes fécales des mille-pattes sont nombreuses (plusieurs dizaines par mètre carré). Quant aux vers de terre, certains signalent leur activité en rejetant en surface une partie de la terre prélevée en creusant leurs galeries. Au cours d'un inventaire effectué en fin de petite saison des pluies

(novembre 1975), on a compté 29 turricules pesant au total 166 g (sec à 105° C) soit 16,6 kg/ha en R2, ce qui est extrêmement peu. En R3, on en a dénombré 355 (17 750 turricules/ha pesant 388,9 kg/ha). Ces inventaires ne donnent qu'une idée très sommaire des remontées de terre par les vers au cours de l'année. A la même saison (novembre 1970 à 1974), nous avons trouvé dans la forêt du Téké sur schistes, en moyenne 400 g de turricules par mètre carré, ce qui représente 4 t/ha soit 1/8 de la production annuelle (32 t/ha/an en moyenne sur 15 parcelles). L'activité des vers de terre semble donc beaucoup plus modeste qu'au Téké, probablement en raison de la texture beaucoup plus grossière des sols sur sables tertiaires (sables grossiers = 60 % contre 30 %).

Les résultats analytiques des turricules prélevées en R3 figurent à la dernière colonne du tableau XII. Leur comparaison avec ceux de l'horizon superficiel de R3 montre que ces terres, mélangées à la litière plus ou moins digérée, sont plus riches en matières organiques évoluées (C et N), en acides humiques et surtout fulviques, en calcium et magnésium échangeables et totaux, ainsi qu'en phosphore assimilable. La texture a été profondément modifiée. Les sables grossiers diminuent de 21 % au profit principalement des sables fins (77 % de la variation des S.G.) et secondairement des argiles et limons. Si les vers de terre sélectionnent la terre fine en rejetant simplement les particules de taille trop forte pour leur tube digestif, l'exclusion des plus gros sables grossiers devrait se traduire par un gain homogène de toutes les fractions granulométriques. Or, à Adiopodoumé comme au Téké, les pertes en sables grossiers s'accompagnent d'une augmentation importante des sables fins et très peu des limons et argiles. MEYER (1943) et TRAN VINH AN (1973) admettent que les sables grossiers se cassent dans le tube digestif des vers : ceci ne nous paraît pas impossible puisqu'on a constaté en lame mince combien les gros grains de quartz sont tarudés et ferruginisés tandis que les petits grains ressemblent à des éclats.

Ce cycle interne ne contribue que secondairement à l'enrichissement superficiel en nutriments (122 kg de carbone, 11 kg d'azote, 1 kg de phosphore et bases totales) dû principalement aux éléments libérés par la destruction de la litière végétale. Par contre, il ramène en surface des fractions fines (argiles, limons, sables fins), contrebalance le lessivage vertical de l'argile et nourrit l'érosion sélective.

Sous culture de maïs, l'activité de la mésofaune semble très ralentie (quelques nids de fourmis).

Ce flux de matériaux alimente l'érosion sélective qui ne laisse en place qu'un résidu grossier riche en sables quartzeux après destruction des agrégats par la battance des pluies et après l'érosion des fines (ROOSE, 1976).

5.5. Les stocks

Une fois les flux quantifiés, il reste à les comparer aux stocks d'éléments compris dans le modèle pour interpréter les vitesses actuelles d'évolution. Ces stocks sont localisés essentiellement dans le sol sous culture annuelle, mais également dans la végétation dans le cas de la forêt et des cultures pérennes.

5.5.1. LES STOCKS CONTENUS DANS LA BIOMASSE AÉRIENNE

L'estimation du stock d'éléments minéraux dans la biomasse totale aérienne (510 t/ha sans les racines) a été effectuée par BERNHARD-REVERSAT (1975) dans la forêt voisine du Banco située sur le même substrat pédologique et géologique. On peut constater au tableau XIV (colonne 10) que la forêt elle-même constitue une réserve considérable de nutriments : 1 400 kg/ha d'azote, 1 200 kg de calcium, 600 kg de potassium, 530 kg de magnésium et 100 kg de phosphore. Chaque année, près de 10 % de cette masse minérale retourne au sol sous forme de litière ; après minéralisation et intégration temporaire dans les horizons superficiels du sol, cette fraction est récupérée presque intégralement par le chevelu racinaire extrêmement dense dans les vingt premiers centimètres du sol.

A titre de comparaison, une culture de maïs à maturité (1,5 t/ha d'épis + 3 t/ha de paille) immobilise 51 kg/ha d'azote, 11 kg de phosphore, 8,5 kg de calcium, 6 kg de magnésium et 33 kg de potassium, soit 1/9 à 1/141 du stock minéral contenu dans la

biomasse aérienne de la forêt dense. On comprend bien dès lors, l'efficacité remarquable du système traditionnel d'exploitation extensive du milieu (shifting cultivation) qui :

- accélère la minéralisation de la biomasse forestière à l'aide du feu,
- réalise pendant 2-4 ans toute une série de cultures intimement mélangées dans le temps et dans l'espace,
- puis confie à une longue jachère forestière le soin d'éliminer les mauvaises herbes, d'améliorer les propriétés physiques du sol et de reconstituer le potentiel chimique et biologique du sol.

5.5.2. STOCKAGE DANS LE SOL (tabl. XVI)

Le sol contient en réserve quantités d'éléments plus ou moins mobilisables. La fraction utile de cette réserve dépend, entre autres, de l'enracinement des plantes et du volume de terre mis à sa disposition. En absence de données locales précises, nous nous sommes limité à comparer les stocks dans les 30 premiers centimètres du sol, là où sont localisées la majorité de racines actives et où les différences sont les plus sensibles selon l'utilisation du sol. Malgré cette simplification, une autre difficulté surgit lorsqu'on compare le milieu forestier aux parcelles cultivées voisines : la densité apparente varie si largement que le stock minéral d'une tranche donnée de sol peut paraître plus élevé sous culture que sous forêt par suite du tassement ($da = 1$ sous forêt, 1,45 à 1,55 sous culture), alors que le milieu s'est appauvri.

TABLEAU XVI

Comparaison des teneurs sous 3 parcelles voisines (Adiopodoumé) et des stocks minéraux (kg/ha) des sols de différentes stations

	C	N	P		Ca		Mg		K	
			assimilable	total	échangeable	total	échangeable	total	échangeable	total
<i>Teneur sur 10 cm.....</i>	%	%	%	%	még.	még.	még.	még.	még.	még.
Adiopo. { sol nu.....	7,6	0,6	0,09	0,93	0,03	0,5	0,25	1,6	0,2	1,2
Adiopo. { culture.....	12,4	1	0,3	1,2	1	3	0,5	2,3	0,1	1,2
Adiopo. { forêt 2 aire.....	18,7	1,4	0,05	0,72	0,2	0,55	0,3	1,7	0,04	1
<i>Stock sur 30 cm (kg/ha)</i>										
Adiopodoumé maïs dose 1..	23 310	2 310	313	2 093	324	2 676	202	1 083	70	1 737
— forêt.....	45 670	4 279	81	1 125	167	1 020	151	1 181	66	1 182
Téké forêt.....	26 250	2 405	52	637	104	467	27	1 131	74	2 300
Korhogo sav. arbust...	22 568	1 096	58	533	466	777	243	1 860	173	2 800
Gonsé sav. arborée..	21 400	1 451	82	745	1 536	2 995	579	2 149	116	1 641
Saria sav. arbust...	14 545	1 130	40	280	1 071	1 555	319	2 968	129	13 945

La comparaison des caractéristiques chimiques de l'horizon superficiel (10 cm) de trois parcelles voisines à Adiopodoumé montre que :

- la parcelle dénudée, la plus érodée, est aussi la plus pauvre dans tous les éléments (sauf K),
- les teneurs en matières organiques (C et N) sont nettement plus élevées sous forêt,
- par contre, en ce qui concerne les bases échangeables et totales ainsi que le phosphore, la parcelle cultivée, qui s'est tassée et a reçu quelques engrais organiques et minéraux, a un niveau un peu moins bas que la parcelle forestière. Il ne semble donc pas utopique de conserver ou même d'améliorer légèrement le potentiel chimique de ces sols forestiers très désaturés en pratiquant une exploitation conservatrice du milieu et en apportant un minimum d'engrais. Cependant, il ne peut être question d'investir en apportant en une fois la masse considérable d'engrais nécessaire pour relever de façon notable la fertilité de ce type de sol : le climat est trop lixiviant.

Les stocks minéraux contenus dans les 30 premiers centimètres du sol sont 10 à 50 fois plus élevés que les flux négatifs en ce qui concerne le carbone, l'azote, le phosphore et les bases totales. Par contre, les éléments assimilables sont à peine suffisants pour compenser les pertes sous maïs pendant 12 ans pour le phosphore assimilable, 3 ans pour le calcium et le magnésium échangeables et 1 an pour le potassium échangeable. Lorsqu'on défriche une forêt de ce type, la carence potassique se manifeste la première, puis le sol s'acidifie et on peut craindre des toxicités aluminiques et des carences azotées ; le phosphore fait rarement défaut sur les sols ferrallitiques développés sur les sables tertiaires.

La comparaison des stocks minéraux contenus dans les 30 premiers centimètres du sol sous végétation naturelle, sous différents climats, montre que les sols tropicaux forestiers sont plus riches en carbone et azote que les sols des savanes soudaniennes et surtout des savanes présahariennes. Par contre, ces derniers sont moins pauvres en bases (échangeables et totales) et phosphore assimilable (moins de lixiviation). Les réserves en phosphore total semblent dépendre plus de la roche mère que du climat actuel (faible migration).

5.6. Conclusions sur le bilan géochimique

Les données disponibles concernant les apports, les pertes, les stocks et certains cycles internes au système « eau-sol-plante » ont été réunies aux tableaux XIV et XV. Ces données sont encore incom-

plètes surtout en ce qui concerne les remontées biologiques, mais elles sont suffisamment précises pour indiquer l'orientation de l'évolution actuelle de ce type de sol ferrallitique très désaturé sous forêt dense et sous une culture modestement fertilisée de maïs.

Sous la forêt dense humide sempervirente secondaire d'Adiopodoumé, les pertes par érosion sont infimes même sur de fortes pentes, mais la lixiviation par les eaux de drainage très abondantes entraîne une forte désaturation du complexe absorbant ($v < 10\%$). Ces pertes ne sont pas totalement compensées par les apports minéraux non négligeables que fournissent les précipitations. Or, les horizons superficiels sont de loin les plus riches ; le bilan est donc positif grâce à d'autres mécanismes de compensation que nous avons englobés sous le terme de remontées biologiques mais que nous n'avons pu quantifier. Il s'agit d'absorption par les racines profondes d'éléments en voie d'évacuation du milieu (appauvrissement de la charge des eaux de percolation jusqu'à la source), de minéraux en voie d'altération (très rares micas), de fixation de l'azote atmosphérique par divers micro-organismes, de remontée de minéraux altérables par la mésofaune, etc. D'autres cycles internes interviennent très activement pour maintenir la fertilité des horizons superficiels des sols forestiers : le pluviollessivage et surtout la minéralisation de la litière qui ne s'accumule pas sous les forêts tropicales humides. Cet apport, largement supérieur aux pertes par lixiviation, est très rapidement récupéré par le réseau racinaire extrêmement dense et actif au voisinage de la surface du sol.

Comme dans les autres stations, les flux sont faibles par rapport aux stocks contenus dans la biomasse forestière et dans le sol. Ceci est vrai pour les éléments totaux, mais pas pour les éléments facilement assimilables par les plantes (en particulier Ca, Mg et surtout K échangeable). Le ramassage du bois mort ou l'exploitation d'une cinquantaine de mètres cubes de bois fort ne compromettent pas l'équilibre géochimique du sol forestier. Par contre, le défrichement, l'andainage mécanisé et le brûlage des feuilles et branchettes entraînent nécessairement une baisse sensible des réserves en matières organiques et en nutriments du sol (rapide les trois premières années puis plus lentes). Si ces trois opérations sont effectuées précautionneusement, comme dans le cas normal d'une plantation de palmiers, cette légère baisse de potentiel ne met pas en péril la productivité des plantes pérennes (OLLAGNIER *et al.*, 1978). Par contre, si ces trois opérations, en particulier l'andainage, aboutissent à la destruction de l'horizon humifère, et sont suivies de l'extirpation des racines avant culture mécanisée des plantes annuelles, les pertes par drainage et érosion auront bientôt fait de rendre le sol impropre à la culture.

Sous une culture de maïs, l'équilibre du bilan est rompu par l'augmentation des pertes par l'exportation et surtout par l'érosion (50 fois plus de ruissellement et 1 000 fois plus d'érosion que sous forêt). Si on veut obtenir des rendements acceptables, il faut apporter des engrais car les pluies et le sol ne fournissent ni assez, ni à un rythme suffisant, les éléments minéraux indispensables à un développement harmonieux des plantes cultivées. Certes, le sol contient des réserves importantes en nutriments, mais elles ne sont que très partiellement mobilisables : les rendements médiocres (quelques quintaux/ha/an) observés sur les parcelles sans engrais en sont la preuve. La minéralisation rapide des matières organiques du sol, l'exportation par la récolte (surtout si on enlève les pailles) jointes aux pertes par lixiviation et érosion ont tôt fait d'épuiser les réserves de nutriments assimilables dans ces régions tropicales humides. Une saine gestion conduit donc à limiter les pertes par érosion et drainage et à donner à la plante cultivée les éléments dont elle a besoin, au moment où elle en a besoin (fractionnement) tout en maintenant l'environnement favorable à un enracinement profond. Il est clair que l'apport d'engrais doit dépasser largement les exportations par la récolte, car il est impossible d'éviter à la fois le ruissellement et le drainage au moment des fortes pluies. Il est possible de réduire les pertes en intensifiant la demande des végétaux (culture dense et hâtive), en augmentant le pouvoir fixateur du sol (conservation des matières organiques) et en fractionnant les apports en fonction des besoins physiologiques des plantes et des disponibilités du sol.

L'analyse des flux négatifs (tableaux XIV et XV, colonne 9) montre que, sous forêt, la plupart des éléments migrent sous forme soluble (drainage) sauf le fer et l'alumine qui circulent à la surface du sol associés à des particules solides. Sous culture, à part l'azote, les bases et les anions, les éléments circulent associés à des matériaux solides érodés à la surface du sol : l'érosion masque les autres phénomènes.

6. CONSÉQUENCES DES TRANSFERTS DE MATIÈRES SUR LA TEXTURE DU SOL

Nous avons montré jusqu'ici que les pluies abondantes peuvent entraîner des phénomènes de ruissellement, d'érosion, de drainage importants, en particulier du 15 mai au 15 juillet et quelle est l'influence de ces flux sur les bilans hydriques et chimiques à l'échelle de la parcelle. Il s'agit d'aborder maintenant l'impact de l'agressivité climatique sur la texture du sol.

Bon nombre de sols tropicaux présentent en surface des horizons appauvris 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, voire inexistant.

Ainsi, dans le profil de la case R3 sous forêt (pente 11 %), la teneur en argile + limons fins (A + LF) passe de 15 % dans l'horizon superficiel (7 cm) à 23 % dans l'horizon de transition (30 à 150 cm) puis continue à augmenter (25-32 %) dans le matériau originel vers 2 à 3 m de profondeur. Il en va de même près des cas d'érosion. En R2, par contre, la teneur en A + LF augmente de 14-20 % dans les horizons humifères (30 cm) à 26-31 % dans l'horizon B (40 à 150 cm) pour diminuer ensuite (21-17 %) dans le matériau originel. En lame mince, nous n'avons observé de cutane que dans l'horizon brun-jaune vers 45 cm de profondeur du profil de R2.

Plusieurs hypothèses peuvent être envisagées pour expliquer ce genre d'organisation texturale :

- 1 — SÉDIMENTATION EN LENTILLE DE TYPE TORRENTIEL dans un climat sahélien. On a bien observé des couches de granulométrie très variable au cours de la mise en place d'un tube de 10 m, mais dans les 2 m supérieurs qui nous concernent le rapport sables fins/sables grossiers reste constant.
- 2 — DESTRUCTION DE LA KAOLINITE en milieu acide au contact de l'humus. L'analyse a montré que si l'on trouve 3 à 8 ppm de SiO_2 dans les eaux superficielles, l'alumine dissoute ne dépasse guère 0,3 ppm et ne s'accumule pas non plus à la surface du sol. Et si le sol peut être très acide (pH = 4 à 6), les eaux le sont beaucoup moins (pH = 5 à 7) sauf en cas de fertilisation intensive. La silice dissoute (68 kg/ha/an sous forêt, 73 kg sous maïs) proviendrait des apports par les pluies (15 kg/ha/an), de la minéralisation des litières (15 kg sous maïs et beaucoup plus sous forêt) et de la dissolution lente du quartz (grains taraudés : voir lames minces), toujours très abondant dans toute la gamme de texture.
- 3 — L'ÉROSION EN NAPPE arrache sélectivement les particules fines à la surface du sol ; divers agents d'homogénéisation (vers de terre, termites, chute d'arbres, etc.) transmettent en profondeur l'appauvrissement des particules fines qui en résulte.
- 4 — LE LESSIVAGE OBLIQUE des colloïdes de l'horizon A d'un profil situé en haut de toposéquence, avec transport à l'intérieur du sol, et évacuation par le réseau hydrographique ou colmatage des sols de bas de pente.

5 — LE LESSIVAGE VERTICAL AVEC DÉPÔTS DIFFUS tout au long d'un profil très profond. Les colloïdes sont mis en suspension plus ou moins stables par la battance des pluies à la surface du sol et pénètrent plus ou moins profondément dans le profil à l'occasion des averses successives et flocculent progressivement en fonction de leur taille et de leur composition. Ces dépôts temporaires peuvent se remettre à circuler lors d'averses violentes à l'occasion desquelles les eaux d'infiltration jouent le rôle de chasse et nettoient les voies de circulation rapide. Quant aux colloïdes piégés dans les micropores du sol, ils se déposent dans les zones les plus fines des canalicules où ils forment des cutanes, visibles en lame mince si les agents homogénéisateurs ne les détruisent pas.

Tous ces mécanismes peuvent agir ensemble, et nous nous contenterons ici de préciser les effets de l'érosion en nappe, de l'activité de la mésofaune et de la migration des colloïdes dans les eaux de drainage.

6.1. L'érosion en nappe

Au tableau XII sont comparés les résultats d'analyse des terres érodées, des turricules rejetés par les vers et de l'horizon superficiel sous forêt (R2 et R3) et sous culture de maïs. Le coefficient de sélectivité (teneur dans les terres érodées/teneur sol en place) est estimé par défaut puisqu'on n'a pas tenu compte des éléments en solution dans le ruissellement.

On constate que l'érosion en nappe entraîne sélectivement les particules fines (jusqu'à 20 ou 50 μ), les matières organiques (N, C et surtout les acides fulviques), les bases (échangeables et totales), le phosphore (total et surtout assimilable). Par contre, les sables s'accumulent sur place. Plus la pente est douce et le couvert végétal bien développé, plus l'érosion est faible mais sélective. Ainsi, sous forêt et pente moyenne (R3), les indices de sélectivité atteignent 5 à 23 pour les matières organiques et les bases tandis qu'ils dépassent rarement 3 sur le versant forestier très raides (R2) et 2 sous maïs (pente 7 %).

Ces résultats confirment nos résultats antérieurs tant sur les sables tertiaires que dans nos autres stations (ROOSE, 1968, 1972, 1973, 1979).

6.2. Rôle de la mésofaune et du labour mécanique

En d'autres stations, nous avons étudié en détail l'activité des vers de terre et des termites (ROOSE, 1976). A Adiopodoumé, les sols sont trop sableux pour que l'activité de la mésofaune soit spectaculaire ; suite à l'inventaire réalisé en novembre 1976,

on peut tout de même estimer à 4 t/ha/an la terre remuée par les vers de terre. L'analyse des turricules montre que ce matériau façonné par les vers est plus riche en matières organiques, en nutriments, en argile, limons et surtout sables fins que le sol en place. (tabl. XII dernière colonne) : ils proviennent du malaxage des résidus organiques (litière) et du sol prélevé à faible profondeur (couleur gris foncé, jamais brun-jaune). Nous avons montré ailleurs l'importance du rôle de la mésofaune sur l'infiltration de l'eau (réseau de galeries) et sur le développement des horizons appauvris en fines et lixiviés en bases. En effet, l'érosion en nappe provoquerait la formation d'un voile de sables grossiers qui bloquerait l'évolution des phénomènes d'appauvrissement si la mésofaune ne rapportait pas en surface des matériaux relativement riches en fines et ne brassait continuellement les horizons superficiels.

Dans les sols cultivés intensément, l'activité de la faune est fortement ralentie. Mais le labour a des fonctions voisines : homogénéiser les horizons de surface, retourner la terre (donc exposer les niveaux profonds plus riches en fines), augmenter la macroporosité et l'infiltration. Malheureusement, le labour (surtout s'il est mécanisé) tasse les horizons profonds et renforce le contraste entre les horizons appauvris et les horizons sous-jacents. De même, il fait ressortir les cailloux, les concentre en surface, alors que la mésofaune enfouit les éléments grossiers sous une couche de terre fine.

6.3. Le lessivage des colloïdes

Les cases de drainage vertical et oblique ont été conçues pour mesurer les charges solubles et solides (colloïdales) des eaux de drainage à différents niveaux du profil (perturbation minimale de l'architecture des pores du sol). En dix ans, nous avons prélevé 445 échantillons des différents types d'eau représentant 4 720 l ; ils ont été immédiatement filtrés au laboratoire pour écarter les pollutions éventuelles, puis flocculés au sulfate d'alumine et séparés de la charge soluble.

Étant données l'instabilité des pseudo-solutions et leur variabilité, les résultats doivent être interprétés avec prudence et peuvent se résumer comme suit :

1 — La couleur des flocculats évolue du blanc pour les échantillons provenant des eaux de pluie, au brun-gris à brun-jaune pour le pluviolessivage et le ruissellement, au brun à jaune-crème pour le drainage oblique, jaune-crème à blanc pour le drainage vertical (lysimètres), et blanc à blanc-crème pour les échantillons prélevés à l'émergence de la nappe souterraine.

- 2 — La charge colloïdale varie généralement entre 10 et 300 mg/l : les variations dépendent du type d'eau prélevé, de la saison et du volume des écoulements.
- 3 — Comme la charge colloïdale diminue lorsque le volume des écoulements augmente, nous avons retenu les moyennes pondérées par les volumes (*mpv*) pour calculer les flux. Cette diminution de la charge semble indiquer l'existence d'un stock limité de particules fines mobilisables plutôt qu'une érosion de la matrice même des horizons (laquelle est très abondante).
- 4 — Les eaux de drainage vertical recueillies au bas des lysimètres vers 40 à 180 cm de profondeur sont moins chargées (34 à 46 mg/l) que les eaux recueillies à la case ERI.O (69 à 112 mg/l) et les variations de la charge colloïdale sont moins accusées : on pourrait soupçonner (1) un piégeage des colloïdes au fond des lysimètres dans la couche de sable continuellement engorgée. Sous maïs et plantes fourragères, la charge colloïdale des eaux de drainage recueillies dans des lysimètres de 150 cm de profondeur est du même ordre de grandeur que sous forêt.
- 5 — La charge colloïdale augmente (11 à 27 mg/l) dans les eaux de pluie lorsqu'elles traversent la voûte foliaire (poussière et matières organiques).

Suite à la battance des pluies sur le sol, les eaux de ruissellement ont une charge solide totale de 348 mg/l ; mais après filtration, on retrouve une fraction colloïdale (90 mg/l) nettement plus élevée que dans les eaux de pluie. Dans la partie du profil qui nous intéresse, la charge colloïdale reste pratiquement stable jusqu'à 50 cm de profondeur puis augmente légèrement (70, 64, 85, 112 mg/l) à mesure qu'on approche de l'horizon jaune-rouge. Au niveau de la source, les eaux sont encore opalescentes mais beaucoup moins chargées (11 mg/l = autant que la pluie).

- 6 — Les matières colloïdales recueillies contiennent une forte charge de carbone organique et sont riches en azote (analyses réalisées par le Centre de Pédologie Biologique de Nancy).

Le schéma est bien différent du schéma que l'on pourrait observer dans les sols lessivés classiques des régions tempérées où les eaux se chargent dans les horizons A éluviaux et se déchargent dans les horizons B illuviaux par suite d'un changement brutal de conditions physico-chimiques. Cependant, des migrations de particules très fines maintenues en suspension stable par des agents organiques ont été

signalées dans les sols tempérés podzolisés (GUILLET, ROUILLER, VEDY, 1979).

La matière organique complexante semble donc jouer un grand rôle dans la mobilisation et la diffusion des fractions argileuses. Ceci constitue une analogie déjà soulignée par DUCHAUFOUR et LELONG, (1967).

Les variations de la charge colloïdale ne se justifient guère en raison de la diminution progressive du volume d'eau qui percole à travers les horizons profonds. En réalité, les eaux de pluie se chargent en colloïdes au contact de la végétation et de la surface du sol. Malgré quelques avatars secondaires (légère perte vers 50 cm où on a observé des cutanes en R2), la charge colloïdale se transmet à travers le profil étudié en augmentant à peine (phénomènes cumulatifs verticaux ou obliques). Et, comme les eaux de source sont peu chargées, il doit y avoir un piégeage des colloïdes en bas des profils ou en bas de pente, dans les sols colluviaux ou dans la nappe phréatique avant l'émergence de la nappe d'eau souterraine : il n'y a pas de changement brutal des conditions physico-chimiques provoquant la floculation généralisée dans un horizon précis comme dans les sols lessivés classiques des régions tempérées, en tout cas pas dans la partie supérieure du profil qui nous intéresse ici.

6.4. Vitesse actuelle de l'appauvrissement en particules fines

Sans vouloir nier l'influence possible de l'héritage sédimentologique sur la texture du matériau original, il nous a semblé intéressant d'évaluer l'efficacité actuelle des moteurs de l'évolution vers l'appauvrissement en particules fines des horizons superficiels.

En comparant la quantité de fines (A + LF) qui manque dans les horizons appauvris (892 t/ha aux cases d'érosion et 372 t/ha en R2) aux pertes annuelles par érosion sélective (27,7 et 120,2 kg/ha/an sous forêt et 3 240 kg/ha/an sous maïs) et par lessivage (721 kg sous forêt et 455 kg/ha/an sous maïs), on calcule qu'il faut 442 à 1 191 ans sous forêt (en fonction de la pente), et 241 ans sous culture extensive de maïs, pour atteindre, au *rythme actuel*, le stade actuel de l'appauvrissement. Ces chiffres ne sont que des ordres de grandeur. Ils montrent le rôle actif du lessivage sur l'appauvrissement en milieu ferrallitique et de l'érosion sélective dès que le sol est découvert pour la culture : de toute façon l'appauvrissement est un processus rapide. Lorsque la pente augmente, l'érosion devient moins sélective, plus décapante et l'épaisseur des horizons humifères appauvris diminue (ROOSE, CHEROUX, 1966).

(1) Le colmatage du système de drainage (sable, grille, tuyau fin) nécessite 1 ou 2 interventions par an à l'aide d'air comprimé dont on surveille le parcours inverse aux solutions.

7. DISCUSSION ET CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Toute une série de dispositifs expérimentaux ont été mis en place en vue de chiffrer — ne fût-ce que grossièrement — les mouvements des matières transportées par l'eau à travers cette boîte noire dont nous voulons préciser le devenir : il s'agit des deux mètres supérieurs d'un sol ferrallitique très désaturé en bases, développé sur des sédiments sablo-argileux en milieu subéquatorial.

Les observations se sont déroulées pendant douze années couvrant trois années humides, deux années normales et sept années très sèches. Partant des principaux résultats, nous tentons de préciser la dynamique actuelle de ces sols en fonction du type de couverture végétale et d'évoquer les aménagements nécessaires pour leur mise en valeur.

7.1. L'érosion

Le climat subéquatorial est particulièrement agressif. L'humidité de l'air et la température étant élevées toute l'année, les matières organiques évoluent rapidement et la litière disparaît au fur et à mesure. Les pluies sont abondantes, intenses et excessives pendant deux mois de l'année : comme le sol est perméable dans son ensemble, mais battant dès qu'il est découvert, que par ailleurs sa capacité de rétention en nutriments est très limitée (peu de matières organiques, et argile de type kaolinitique), les risques d'érosion, de lixiviation des nutriments et de lessivage de colloïdes sont élevés.

En réalité, sous forêt dense ou secondarisée (et tant que le sol est parfaitement couvert), les phénomènes d'érosion et de ruissellement sont modestes quelle que soit la pente.

Sur sol nu, le ruissellement est 50 fois plus fort (25-40 % des pluies) et l'érosion environ 1 000 fois plus élevée que sur sol couvert : les pertes en terre croissent plus vite que la pente ($E = 60, 138$ et 570 t/ha/an sur des pentes de 4,5, 7 et 23 %).

Sous des cultures extensives couvrant aussi mal le sol que le maïs, le ruissellement est très élevé et l'érosion atteint 80 % de celle observée sur sol nu.

Des travaux antérieurs, il ressort (ROOSE, 1973, 1976 b, 1977 b) :

- que si les pluies sont très agressives, les sols ferrallitiques, pauvres en limons très fins sont très résistants à l'agressivité mécanique des pluies, beaucoup plus que bien des sols lessivés tempérés ;
- que le couvert végétal est de loin le facteur qui modifie le plus l'expression de l'érosion potentielle (facteur 1 à 0,001) et qu'en son absence, même

partielle, l'inclinaison de la pente joue le rôle le plus important (facteur 0,1 à 10) ;

- que les techniques culturales (enfouissement de matières organiques, aération du sol, surface motteuse) peuvent réduire temporairement le ruissellement et l'érosion pendant environ 3 semaines couvrant 100 à 200 mm de pluie, (facteur 1 à 0,1) ;
- que les techniques antiérosives classiques (fossés, terrasses, labours isohypses) sont nettement moins efficaces (facteur 1 à 0,1) que les méthodes biologiques qui visent à ralentir le ruissellement et à développer au maximum la couverture du sol (ROOSE, 1973 et 1977).

A l'échelle des petits bassins-versants forestiers de la région, le ruissellement direct et les transports solides sont très réduits (quelques t/km²) (ROCHE, 1979 ; ROUGERIE, 1960 ; GIRARD *et al.*, 1971).

7.2. Le bilan hydrique

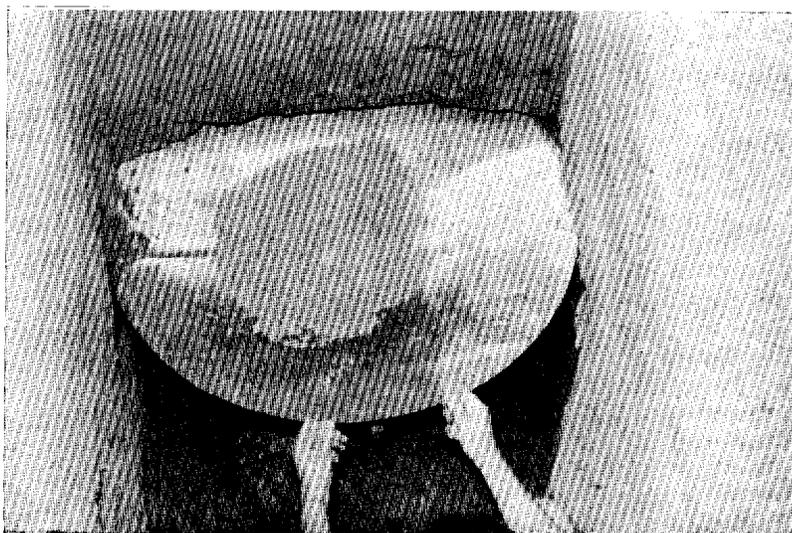
Le bilan hydrique sous la forêt sempervirente est caractérisé par un faible ruissellement (1 %), une évaporation toujours voisine de l'ETP (1 000 à 1 200 mm) et un drainage vertical abondant et très variable (400 à 1 700 mm) en fonction des précipitations (1 600 à 2 700 mm). Le drainage oblique est quasi inexistant en dehors des versants excessivement pentus.

Sous culture de maïs, le ruissellement étant élevé (22 à 27 %), le drainage vertical est finalement plus faible (640 mm en année moyenne) que sous forêt (880 mm) malgré des variations de réserve hydrique du sol beaucoup plus étroites (50 au lieu de 200 mm). Il y a donc une certaine compensation entre le ruissellement et le drainage, ce qui va poser des problèmes de choix entre deux risques : d'une part, le ruissellement qui provoque des dégâts d'érosion (routes, ponts, ravines) et, d'autre part, les pertes de nutriments dans les champs par lixiviation. L'augmentation du drainage présente deux impacts positifs : meilleure alimentation des nappes souterraines et régulation de l'écoulement superficiel.

7.3. Bilan géochimique

De nombreuses analyses d'eau, de terre et de végétaux ont permis de schématiser le bilan géochimique. Sous la forêt dense d'Adiopodoumé, les pertes par érosion sont minimes, mais la lixiviation par les eaux de drainage surabondantes entraîne une forte désaturation du complexe absorbant. Ces pertes sont compensées par les apports dus aux pluies, le pluviollessivage, les remontées biologiques et surtout par la minéralisation de la litière (8 t/ha/an) : ces apports minéraux sont récupérés par le réseau raci-

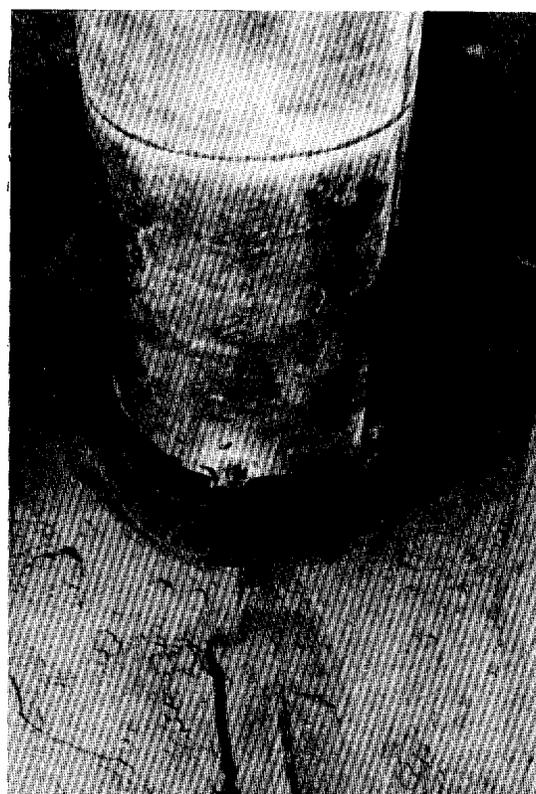
PLANCHE III



Mise en place du système de drainage



Enfoncement du cylindre en cadence



Du goudron coulé à chaud rend solidaire le cylindre et le drain

naire très dense et très actif au voisinage de la surface du sol. Comme dans les autres stations, les flux sont réduits par rapport aux stoks minéraux compris dans la biomasse forestière et dans le sol : ceci n'est pourtant pas exact pour les bases échangeables et en particulier la potasse dont la carence est notable dans ce type de sol. La composition des eaux en milieu naturel est finalement assez semblable pour des stations bioclimatiques aussi éloignées que la forêt dense subéquatoriale et les savanes présahariennes. Il semble pourtant que la composition des eaux de surface soit liée à l'évolution des matières organiques, ainsi qu'aux apports marins et continentaux (pluie, embruns, poussières du désert), tandis que celle des eaux de nappe profonde serait davantage contrôlée par les réactions d'équilibre thermodynamique avec le monde minéral qui les entoure (temps de contact plus long et absence de matières organiques) (TARDY, 1969 ; GARDNER, 1970). Sous une culture de maïs, même modérément fertilisée, l'équilibre du bilan est rompu par l'augmentation des pertes minérales du fait de l'exportation (grains et pailles) et surtout par l'érosion. Il semble que le réseau racinaire d'une culture comme le maïs soit capable d'absorber une dose raisonnable d'engrais pourvu qu'il soit bien adapté aux besoins physiologiques de la plante : il retiendrait moins bien les produits de la minéralisation des matières organiques du sol (CHABALIER, 1976). L'exploitation continue du sol exige une politique de restitution des matières organiques (pour stocker l'eau et les nutriments), des apports d'éléments nutritifs minéraux fractionnés dans le temps en fonction des besoins physiologiques des cultures et de l'acidification du sol.

L'analyse des flux montre que si les bases et l'azote migrent en majorité sous forme soluble, le carbone, la silice et surtout le fer et l'alumine circulent étroitement associés à des particules solides entraînées principalement par l'érosion de surface.

L'appauvrissement en particules fines des horizons humifères des sols ferrallitiques de la région étant généralisé en toute position topographique, on ne peut accepter l'hypothèse selon laquelle ce phénomène serait exclusivement lié au mode de sédimentation à l'époque tertiaire. La destruction de l'argile en présence des acides humiques peut se produire occasionnellement, mais ce n'est pas le phénomène dominant : on ne retrouve l'alumine ni dissoute dans les eaux de percolation, ni accumulée dans les horizons superficiels.

Par contre, l'érosion en nappe est d'autant plus sélective que le sol est bien couvert et la pente faible : des agents d'homogénéisation transmettent en profondeur l'appauvrissement et remontent des matériaux fins. Lorsque la pente augmente, l'érosion en masse se déclenche, qui décape de plus en plus de

sable en laissant à nu une quantité de racines traçantes : l'érosion explique donc bien l'épaisseur des horizons appauvris en fonction de la pente.

La migration des colloïdes à l'intérieur du sol participe aussi à cet appauvrissement en fines des horizons superficiels. Les eaux de pluies (11 mgr/l) se chargent au contact de la voûte foliaire (27 mgr/l) et surtout de la surface du sol (384 mgr/l au total). Après un premier dépôt à la surface du sol (litière et pellicule de battance), les eaux traversent les horizons superficiels du sol en modifiant à peine leur charge solide (70 mgr/l vers 20 cm, 64 vers 50 cm, 85 vers 1 m et 112 mgr/l vers 150 cm). Dans les eaux de source par contre, la charge colloïdale a une valeur très faible, voisine de celle des eaux de pluie (11 mgr/l) ; il y a donc un premier piégeage peu important à la base des horizons humifères (vers 45 cm, c'est-à-dire dans l'horizon où on a observé des cutanes en lames minces) et un piégeage beaucoup plus important entre le bas du pédon et le fond de la vallée où sont évacuées les eaux de nappe. L'analyse des floculats a montré qu'il y a des liens entre ces migrations d'argile et de matières organiques. L'étude minéralogique aux rayons X a démontré la présence essentiellement de kaolinite et secondairement de quartz et de goethite. C'est la matière organique riche en acides aminés (C/N bas) qui permettrait, en milieu ferrallitique, la migration de la kaolinite extrêmement stable (présence de Al échangeable (SOUCHIER, communication écrite, 1979).

L'appauvrissement serait dû principalement au lessivage sous forêt et à l'érosion sélective sous culture : c'est un processus rapide dans les conditions actuelles (2 à 11 siècles pour atteindre le stade actuel au rythme actuel) et qui est accéléré par la culture et le travail du sol.

La pédogenèse actuelle semble donc très active et orientée vers un appauvrissement en fines des horizons superficiels et la désaturation poussée du complexe absorbant sur tout le profil. Le climat ne semble cependant pas encore assez agressif pour aboutir à la destruction de la kaolinite et la libération de l'alumine comme on l'a observé sous des climats plus humides en Guyane (pluie = 3 500 mm) (LELONG, 1969).

La richesse en nutriments des horizons superficiels en milieu forestier dépend des remontées biologiques, du pluviollessivage et surtout de la minéralisation de la litière. Que les apports de litière cessent et le milieu se dégrade jusqu'à atteindre un nouvel équilibre en rapport avec le niveau de production.

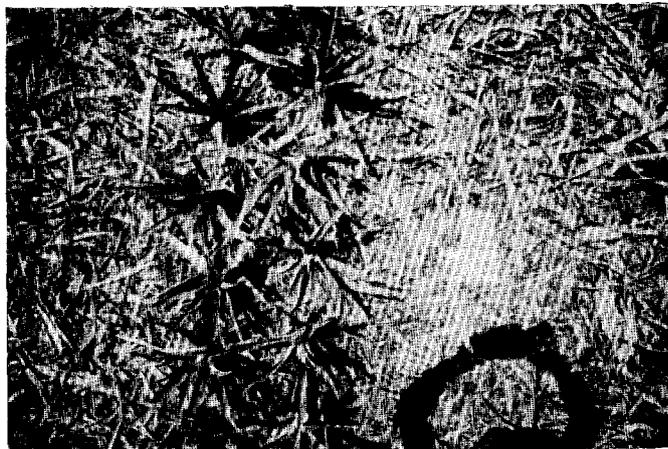
Les sols forestiers sont généralement moins pauvres que les sols de savane de la même région, mais ils perdent plus vite leur fertilité. Et, en même temps que diminue le taux de matières organiques du sol, se dégradent les propriétés physiques (stabilité struc-



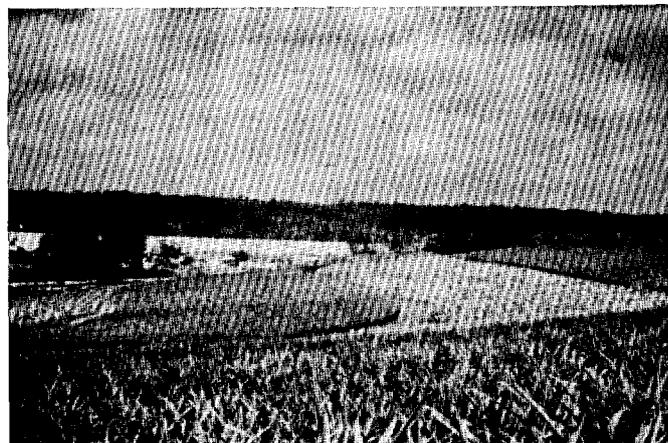
Le labour et la culture sarclée entraînent des risques élevés de battance du sol et d'érosion



Le meilleur type de mise en valeur est celui des plantations arbustives avec le sol couvert toute l'année par des plantes de couverture : leur pâturage extensif peut encore améliorer leur rentabilité.



La couverture du sol par les résidus de culture peut résoudre pas mal de problèmes d'infiltration. Cependant le bon développement des racines d'ananas exige un travail profond du sol. Les méthodes permettant d'aérer le sol sous le paillis sont encore à mettre au point.



La culture en courbe de niveau de bandes d'âges et de couvert différents permet d'assurer une protection satisfaisante à condition que le réseau routier n'accumule pas les eaux qui creuseront une ravine.

turale, macroporosité, infiltration, etc.) et la résistance intrinsèque du sol à l'érosion (pellicule de battance, ruissellement, érosion en rigole et ravine). Soumis sans ménagement au défrichement brutal et surtout à l'endainage (décapage de l'horizon humifère), au désouchage et à l'extirpation des racines puis aux labours, ces sols dénudés et battus par les pluies sont vite érodés et lixiviés. Mais heureusement, dans ces régions humides, la végétation reprend rapidement le dessus et reconstruit en quelques années un horizon humifère.

7.4. Perspectives agronomiques

Ce type de sol ferrallitique très désaturé en bases, appauvri en fines, présente au départ un milieu physique assez favorable au développement des racines (profil homogène, bonne porosité, bonne perméabilité), mais une réserve hydrique et surtout minérale médiocre. La mise en valeur doit tenir compte des conditions climatiques régionales qui entraînent une évolution rapide des matières organiques, le tassement des horizons superficiels, une lixiviation poussée des nutriments et une érosion rapide des sols partiellement exposés aux pluies.

Dès lors, les cultures les mieux adaptées sont celles qui couvrent le mieux le sol en permanence et reconstituent une ambiance forestière, comme les plantations de palmiers, cocotiers, hévéas, caféiers, cacaoyers et fruitiers avec plantes de couverture : elles occupent le sol en permanence pendant 15 à 30 ans, exportent peu d'éléments minéraux et produisent une masse de matières organiques qui retournent au sol et reconstituent l'horizon humifère. Les pertes par érosion et lixiviation sont faibles : les apports minéraux nécessaires (d'après analyses foliaires) sont correctement interceptés par l'abondant réseau racinaire.

La prairie également protège bien le sol contre l'érosion et la lixiviation, mais l'exportation minérale par les récoltes est considérable et difficile à compenser économiquement si le troupeau ne restitue sur place une partie des éléments consommés.

Les plantes sarclées à cycle court, comme le maïs, sont mal adaptées à ce genre de climat : les pluies sont trop violentes et l'ensoleillement insuffisant en saison des pluies. Le sol étant mal protégé, les pertes par érosion et lixiviation sont importantes. La culture mixte traditionnelle est beaucoup mieux adaptée, qui voit se succéder sur des buttes pendant 2 ou 3 années arachides, maïs, divers légumes et finalement le manioc et les bananiers, avant l'abandon au recrû forestier.

Si les propriétés physiques de ces sols forestiers sont bonnes au départ, il faut reconnaître qu'elles se dégradent rapidement (tassement en profondeur battance en surface) : le système racinaire de l'ananas

par exemple se développe mal sans un travail profond du sol. La technique de non-travail de terre déjà cultivées depuis quelques années donne de mauvais résultats, car les pluies sont trop agressives : l'usage de dents rigides permettrait d'aérer le sol sans le dénuder et sans le retourner (exposition aux pluies du sous-sol et dilution des matières organiques productrices par le labour).

Sur le plan chimique, ces sols sont souvent acides (pH 4,5 à 5,5) et carencés en potassium. Les réserves en azote facilement minéralisables s'épuisent en 2 ou 3 ans, mais le taux de phosphore total est généralement suffisant sur les sables tertiaires. Sous palmiers et hévéas, le fractionnement des apports minéraux n'améliore pas la nutrition pourvu que les apports soient effectués en dehors de la grande saison des pluies : le réseau racinaire est assez dense. Sur les plantes sarclées par contre, le fractionnement des apports en fonction des besoins physiologiques des plantes et des risques de lixiviation s'impose. On évitera également d'apporter trop d'engrais acidifiant ; certains engrais naturels peu concentrés et les engrais organiques retardent l'acidification du sol.

Le meilleur aménagement antiérosif consiste à maintenir le sol couvert toute l'année : le climat humide le permet. C'est assez facile dans les plantations arbustives en rabattant le recrû forestier ou en semant des plantes de couvertures (de préférence une légumineuse qui fixe l'azote de l'air).

Dans le cas des cultures sarclées, l'aménagement devra viser différents objectifs :

- favoriser la couverture du sol (plantation dense et précoce, fumure et travail du sol bien adaptés, soins phytosanitaires et mulch éventuel aux périodes critiques) ;
- améliorer la structure du sol et sa capacité à stocker l'eau et les nutriments (politique de recyclage des matières organiques) ;
- freiner le ruissellement et piéger les sédiments (cultures alternées, prairies temporaires ou bandes d'arrêt) ;
- évacuer les excès d'eau au cœur de la saison des pluies, quitte à les récupérer plus bas dans un lac collinaire (culture sur gros billons, sur planches, aménagement de quelques exutoires, type ICRISAT).

Quant au réseau routier secondaire, si souvent à l'origine des manifestations les plus spectaculaires de l'érosion (ravines), il peut souvent être tracé parallèlement à la courbe de niveau principale située à mi-pente, profilé en légère contre-pente et recouvert de graminées régulièrement rabattues.

Mais, avant-tout, il faut répartir les cultures dans le paysage en fonction de la topographie et des potentialités des sols, en limitant les cultures sarclées à des

pententes inférieures à 7 %, les cultures protégeant bien le sol pendant la majorité du cycle des pententes inférieures à 15 %, et en consacrant le reste à des cultures pérennes les mieux adaptées au sol et au climat.

Malgré la brièveté de la saison sèche, l'irrigation d'appoint par aspersion est souvent rentable, car elle permet de profiter des périodes les plus ensoleillées pendant lesquelles la photosynthèse, l'activité microbienne et la richesse chimique des solutions du sol sont les plus fortes.

*Manuscrit reçu au Service des Éditions de l'ORSTOM
le 27 octobre 1980*

BIBLIOGRAPHIE

- AUBERT (G.) et SEGALEN (P.), 1966. — Projet de classification des sols ferrallitiques. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, vol. IV, n° 4 : 97-112.
- AUBREVILLE (A.), 1938. — La forêt coloniale. Les forêts de l'A.O.F. *Ann. Ac. Sci. col.*, t. IX, 244 p., Paris.
- BELOUSOVA (N. I.), 1970. — Lysimetric studies in the Taiga zone. Genetical interpretation in « Colloque Intern. Migrations organo-minérales dans les sols tempérés », Nancy, sept. 1979.
- BERNHARD-REVERSAT (F.), 1975. — Recherches sur les cycles biogéochimiques des éléments minéraux majeurs en milieu forestier subéquatorial (Côte d'Ivoire). Thèse Doct. Sci. Nat. Paris Sud, O.R.S.T.O.M., *multigr.* Paris, 108 p. + ann.
- BLANCANNEAUX (Ph.), 1979. — Dynamique des sols ferrallitiques sur granito-gneiss en Guyane française. Relation avec l'érosion, le ruissellement et le lessivage oblique. Rapport O.R.S.T.O.M. Cayenne, 162 p. *multigr.* + annexes.
- BOIS (J. F.) et ROOSE (E. J.), 1978. — Quelques réflexions sur les résultats de mesures systématiques d'humidité à la sonde à neutrons dans un sol forestier de basse Côte d'Ivoire. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Hydrol.*, 15, 4 : 351-363.
- BOLLINE (A.) et LAURANT (A.), 1978. — Rainerosivity map of Belgium. Symposium « Erosion in Europe and USA », Gand, mars 1978.
- Boulet (R.), 1977. — Aperçu sur le milieu pédologique guyanais, caractères originaux et conséquences sur la mise en valeur. O.R.S.T.O.M. Cayenne, cote p. 149, 36 p. *multigr.*
- BRUNET-MORET (Y.), 1967. — Étude générale des averse exceptionnelles en Afrique Occidentale : la république de Côte d'Ivoire. Rapport C.I.E.H.-O.R.S.T.O.M., 20 p. *multigr.*
- CHABALIER (P.), 1976. — Contribution à la connaissance du devenir de l'azote du sol et de l'azote engrais dans un système sol-plante. Thèse Doct.-Ing. Fac. Sciences Abidjan, n° 33, 139 p. *multigr.*
- COLLINET (J.), 1971. — Premiers résultats de l'exploitation d'une parcelle de lessivage oblique dans la région de Libreville (Gabon). O.R.S.T.O.M. Libreville, 15 p. *multigr.*
- DABIN (B.) et LENEUF (N.), 1958. — Étude de l'érosion et du ruissellement en basse Côte d'Ivoire : mai 1956-58. O.R.S.T.O.M., Abidjan, 20 p. *multigr.*
- DUCHAUFOUR (Ph.) et LELONG (F.), 1967. — Entraînement ou destruction d'argile dans les horizons éluviaux des sols lessivés. *C. R. Acad. Sci. Paris*, t. 264 : 2884-2887.
- ELDIN (M.), 1971. — Le climat, in « Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire ». *Mémoire O.R.S.T.O.M.* Paris, n° 50, 391 p.
- FAUCK (R.), 1970. — Évolution des quartz dans les sols rouges ferrallitiques développés sur les roches sableuses et gréseuses de l'Afrique Occidentale. *C. R. Acad. Sci. Paris*, t. 271 : 2273-2276.
- FOURNIER (F.), 1967. — La recherche en érosion et conservation des sols sur le continent africain. *Sols Africains*, 12, 1 : 5-53.
- GARDNER (L. L.), 1970. — A chemical model for the origin of gibbsite from kaolinite. *Amer. Mineral.*, 55 : 1380-1389.
- GIRARD (G.), SIRCOULON (J.) et TOUCHEBŒUF (P.), 1971. — Le réseau hydrographique, in « Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire ». *Mémoire O.R.S.T.O.M.* Paris, n° 50, 391 p.
- GODEFROY (J.), 1974. — Évolution de la matière organique sous culture de bananier et de l'ananas. Relation avec la structure du sol. Thèse Doct.-Ing. Nancy I, n° C.N.R.S. AO 9296, 166 p.
- GOSSE (G.) et ELDIN (M.), 1973. — Données agroclimatologiques recueillies à la station O.R.S.T.O.M. d'Adiopodoumé : 1948-1972. O.R.S.T.O.M. Abidjan, 22 p. *multigr.*
- GOUZY (M.), 1973. — Méthodes d'analyses utilisées dans le Laboratoire Central d'Analyse du Centre O.R.S.T.O.M. d'Adiopodoumé. O.R.S.T.O.M. Abidjan, *multigr.*
- GUILLET (B.), ROUILLER (J.) et VEDY (J. C.), 1979. — Dispersion et migration de minéraux argileux dans les podzols. Composition des composés organiques associés. Leur rôle sur les formes et l'état de l'aluminium. Coll. Intern. Nancy « Migrations organo-minérales dans les sols tempérés » sept. 1979, in « Résumés des publications », p. 8.
- HUDSON (N. W.), 1973. — Soil conservation. B. T. Batsford Limited Editor, London, 320 p.
- HUMBEL (F. X.), 1978. — Caractérisation par des mesures physiques, hydriques et d'enracinement, de sols de Guyane française à dynamique de l'eau superficielle.
- HUTTEL (Ch.), 1975. — Recherches sur l'écosystème de la forêt subéquatoriale de basse Côte d'Ivoire. IV. Estimation du bilan hydrique. *Rev. Écol. Appl.*, 29 : 192-202.
- JOURDAN (O.), MARIN (P.) et VILLEMIN (P.), 1978. — Étude des conditions particulières créées par un lysimètre. Application au type monolithe. *Bulletin G.F.A.L.*, n° 5, p. 14.
- KALMAN (R.), 1967. — Le facteur climatique de l'érosion dans le bassin du Sebou (Maroc). Projet Sebou, 32 p. *multigr.*
- LAFFORGUE (A.) et NAAH (E.), 1976. — Exemple d'analyse expérimentale des facteurs de ruissellement sous pluies simulées. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Hydrol.*, XIII, 3 : 195-237.
- LE BOURDIEC (P.), 1958. — Contribution à l'étude géomorphologique du bassin sédimentaire et des régions littorales de Côte d'Ivoire. *Études Éburnéennes*, 7 : 7-96.
- LELONG (F.), 1969. — Nature et genèse des produits d'altération de roches cristallines sous climat tropical humide (Guyane française). Thèse Doct. Sc. Nat. Fac. Nancy. *Sciences de la Terre, Mémoire* n° 14, 188 p.
- LELONG (F.), TARDY (Y.) et al., 1976. — Pedogenesis, chemical weathering and process of formation of some supergene ore deposits, in « Handbook of strata bound and stratiform ore deposits ». Éd. Wolf Elsevier, Amsterdam : 93-173.

- MASSON (J. H.), 1971. — L'érosion des sols par l'eau en climat méditerranéen, méthodes expérimentales pour l'étude des quantités érodées à l'échelle du champ. Thèse Doct.-Ing. Univ. Languedoc, 213 p.
- MASSON (J. M.) et KALMS (J. M.), 1971. — Analyse et synthèse des facteurs de l'érosion sur le bassin versant de la Tet à Vinca. Note 14/71 E.D.F./Univ., Montpellier, 90 p. *multigr.*
- MEYER (L.), 1943. — Experimenteller Beitrag zu makrobiologischen wirkungen auf humus und bodenbildung *Z. Pflanzenernähr Düngung Bodenkiende*, 29 : 119-140.
- MONTENY (B.) et ELDIN (M.), 1977. — Données agroclimatiques recueillies à la station O.R.S.T.O.M. d'Adiopodoumé : 1948-1976. O.R.S.T.O.M. Abidjan, 24 p. *multigr.*
- NALOVIC (Lj.), 1968. — Les méthodes d'analyse des sols et des eaux utilisées dans le laboratoire du Centre O.R.S.T.O.M. d'Adiopodoumé. O.R.S.T.O.M. Abidjan : 123 p. *multigr.*
- NORTCLIFF (S.) et THORNES (J. B.), 1977. — Water and cation movement in a tropical rainforest environment. London School of Economics, Geography Dept. Discussion paper n° 62.
- OLLAGNIER (M.), LAUZERAL (A.), OLIVIN (J.) et OCHS (R.), 1978. — Evolution des sols sous palmeraie après défrichement de la forêt. *Oléagineux*, 33, 11 : 537-544.
- PERRAUD (A.), 1971. — La matière organique des sols forestiers de la Côte d'Ivoire. Relations sol-végétation-climat. Thèse État, Nancy I, n° C.N.R.S. AO 5683, O.R.S.T.O.M. Paris, 82 p. *multigr.*
- RICHARDS (L. A.), NEAL (O. R.) et RUSSEL (M. B.), 1939. Observation on moisture conditions in lysimeters. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 4 : 55-59.
- ROCHE (M. A.), 1979. — Étude sur bassins versants expérimentaux des possibilités d'exploitation et d'aménagement de la forêt amazonienne en Guyane. Séminaire « Hydrologie en agriculture et l'aménagement des bassins versants dans la zone tropicale » : IITA, Ibadan, novembre 79, O.R.S.T.O.M. Cayenne, 10 p. *multigr.*
- ROOSE (E.) et CHEROUX (M.), 1966. — Les sols du bassin sédimentaire de Côte d'Ivoire. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, IV, 2 : 51-92.
- ROOSE (E.), 1968. — Un dispositif de mesure du lessivage oblique dans les sols en place *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, VI, 2 : 235-249.
- ROOSE (E.), 1968. — Érosion en nappe et lessivage oblique dans quelques sols ferrallitiques de Côte d'Ivoire. WASA, Abidjan, avril 1968, O.R.S.T.O.M. Abidjan, 15 p. *multigr.*
- ROOSE (E.), HENRY des TUREAUX (P.), 1970. — Deux méthodes de mesure du drainage vertical dans les sols en place. *Agron. Trop.*, 25, 12 : 1079-1087.
- ROOSE (E.), 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. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, vol. VIII, n° 4 : 469-482.
- ROOSE (E.) *et al.*, 1970. — Érosion, ruissellement et lessivage oblique sous une plantation d'hévéa en basse Côte d'Ivoire. III. Résultats des campagnes 1967-68-69. O.R.S.T.O.M.-IRCA, Abidjan, 115 p. *multigr.*
- ROOSE (E.), 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. Bull. liaison thème A, n° 1, O.R.S.T.O.M. Paris : 19-41.
- ROOSE (E.), 1973. — Dix-sept années de mesures expérimentales de l'érosion et du ruissellement sur un sol ferrallitique sableux de basse Côte d'Ivoire. Contribution à l'étude de l'érosion hydrique en milieu intertropical. Thèse Doct.-Ing. Fac. Sci. Abidjan, n° 20, O.R.S.T.O.M. Abidjan, 125 p. *multigr.*
- ROOSE (E.), 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. Comm. X^e Coll. Inst. Intern. Potasse, Abidjan, décembre 1973 : 305-320.
- ROOSE (E.), 1974. — Influence du type de plante et du niveau de fertilisation sur la composition des eaux de drainage en climat tropical humide, in XIII^e Journées de l'Hydraulique, Paris, question 3, rapport 13, p. 7.
- ROOSE (E. J.), 1974. — Conséquences hydrologiques des aménagements anti-érosifs. Comm. XIII^e Journées de l'Hydraulique, Paris, question 3, rapport 10, 6 p.
- ROOSE (E. J.), 1974. — Contribution à l'étude de la résistance à l'érosion de quelques sols tropicaux. X^e Congrès Soc. Intern. Sci. Sol, Moscou, août 1974, t. 11 : 54-60.
- ROOSE (E.) et PERRAUD (A.), 1974. — Nature des composés humiques des eaux de ruissellement et de drainage. Essai d'évaluation des migrations de matières organiques sous végétation naturelle en région tropicale. X^e Congrès Soc. Intern. Sci. Sol, Moscou, août 1974, t. 6 : 74-80.
- ROOSE (E. J.), ARRIVETS (J.) et POULAIN (J. F.), 1974. — Étude du ruissellement du drainage et de l'érosion sur deux sols ferrugineux de la région Centre Haute-Volta. Bilan de 3 années d'observation à la station SARIA O.R.S.T.O.M. Abidjan - IRAT/H.V., 83 p. *multigr.*
- ROOSE (E. J.), 1974. — Influence du niveau de fertilisation sur l'évolution des bilans hydriques et chimiques pour une culture continue de maïs sur des sols ferrallitiques perméables de la zone tropicale humide. Protocole expérimental. O.R.S.T.O.M. Abidjan, 14 p. *multigr.*
- ROOSE (E. J.), 1975. — Natural mulch or chemical conditioner for reducing soil erosion in humid tropical areas, in « Soil Conditioners ». SSSA, Special Publication n° 4, Chap. 12 : 131-138.
- ROOSE (E. J.) et LACOEUILHE (J. J.), 1975-76. — Étude du ruissellement, de l'érosion et de la lixiviation en fonction du mode d'utilisation des résidus de la culture d'ananas. I. Protocole expérimental : O.R.S.T.O.M. Abidjan, 17 p. *multigr.* II. Rapport de la campagne 1975 : O.R.S.T.O.M.-IRFA Abidjan, 18 p. *multigr.*
- ROOSE (E. J.), 1976 a. — Contribution à l'étude de l'influence de la mésofaune sur la pédogenèse actuelle en milieu tropical. O.R.S.T.O.M. Abidjan, 56 p. *multigr.*
- ROOSE (E. J.), 1976 b. — Use of the universal soil loss equation to predict erosion in West Africa in SSSA. Special Publication n° 21 : 60-74.
- ROOSE (E. J.), 1977. — Adaptation des méthodes de conservation des sols aux conditions écologiques et socio-économiques de l'Afrique de l'Ouest. *Agron. Trop.*, 33, 2 : 132-140.
- ROOSE (E. J.) et GODEFROY (J.), 1977. — Pédogenèse actuelle comparée d'un sol ferrallitique remanié sur schiste sous forêt et sous une bananeraie fertilisée de basse Côte d'Ivoire. Azaguié 1966-73. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, XV, 4 : 67-94.
- ROOSE (E. J.), 1977 b. — Érosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest. Vingt années de mesure en petites parcelles expérimentales. *Travaux et Documents O.R.S.T.O.M.* Paris, n° 78, 108 p.

- ROOSE (E. J.), ASSELINE (J.) et coll., 1978. — Mesure des phénomènes d'érosion sous pluies simulées aux cases d'érosion d'Adiopodoumé. II. Les charges solides et solubles des eaux de ruissellement sur sol nu et diverses cultures d'ananas. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, XVI, 1 : 43-72.
- ROOSE (E. J.), 1978. — Pédogenèse actuelle d'un sol ferrugineux complexe issu de granite sous une savane arborescente du plateau Mossi (Haute-Volta) : Gonse 1968 à 74. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, XVI, 2 : 193-223.
- ROOSE (E. J.), 1978. — Dynamique actuelle de deux sols ferrugineux indurés issus de granite sous sorgho et sous une savane soudano-sahélienne. Saria (Haute-Volta) : 1971-74. O.R.S.T.O.M., Paris, 116 p. *multigr.*
- ROOSE (E. J.), 1979. — Dynamique actuelle d'un sol ferrallitique gravillonnaire issu de granite sous culture et sous une savane arbustive soudanienne du nord Côte d'Ivoire. Korhogo, 1967-75. Rapport O.R.S.T.O.M. Paris, 150 p. *multigr.* et *Cahier O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, vol. XVII : 81-118.
- ROOSE (E. J.), 1979. — Dynamique actuelle d'un sol ferrallitique très désaturé sur sédiments sablo-argileux sous culture et sous forêt dense humide sub-équatoriale du sud de la Côte d'Ivoire. Adiopodoumé : 1964-76. Rapport O.R.S.T.O.M. Paris, 184 p. *multigr.* et *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, vol. XVII, 4 : 259-281.
- ROUGERIE (G.), 1960. — Dynamique actuelle des versants en Côte d'Ivoire forestière. Mémoire IFAN, n° 40.
- SIBAND (P.), 1972. — Étude de l'évolution des sols sous culture traditionnelle en Haute-Casamance. *Agron. Trop.*, 27, 5 : 574-591.
- SOUCHIER (B.), 1979. — Communication écrite personnelle.
- TALINEAU (J. C.) et ROOSE (E. J.), 1973. — Réserve hydrique du sol et comparaison de son utilisation par une graminée et une légumineuse fourragère tropicale. Coll. IAEA/FAO, 176/26. Vienne, sept. 1973. O.R.S.T.O.M. Abidjan, 19 p. *multigr.*
- TARDY (Y.), 1969. — Géochimie des altérations. Étude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique. Thèse Doct. Sc. Nat. Strasbourg, 199 p. *Mémoire Serv. Carte Géol. Alsace-Lorraine*, n° 31.
- TRAN-VINH-AN, 1973. — L'action des vers de terre, genre *Hyperiodrilus Africanus*, sur quelques propriétés pédologiques d'un sol sablonneux de la région de Kinshasa (Zaïre). *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, XI, 3-4 : 249-256.
- TURC (L.), 1961. — Évaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle. Formule climatique simplifiée et mise à jour. *Ann. Agron.*, 12, 1 : 13-49.
- VALENTIN (C.), 1978. — Divers aspects des dynamiques actuelles de quelques sols ferrallitiques de Côte d'Ivoire. O.R.S.T.O.M. Abidjan, 150 p. *multigr.* + Annexes.
- VILLECOURT (P.) et ROOSE (E.), 1978. — Charge en azote et en éléments minéraux majeurs des eaux de pluie, de pluviolossivage et de drainage dans la savane de Lamto (Côte d'Ivoire). *Rev. Écol. Biol. Sol*, 15, 1 : 1-20.
- WISCHMEIER (W. H.) et SMITH (D. D.), 1960. — A universal soil loss estimating equation to guide conservation farm planning. 7th Congres Soc. Intern. Sci. Sol, Madison, t. 1 : 418-425.
- WISCHMEIER (W. H.) et SMITH (D. D.), 1978. — Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. USDA, Agriculture Handbook n° 537, 58 p.