

**Dynamique actuelle d'un sol ferrallitique très désaturé
sur sédiments argilo-sableux sous culture
et sous forêt dense humide subéquatoriale du sud de la Côte d'Ivoire
Adiopodoumé : 1964 à 1976**

1^{re} partie : L'érosion et le bilan hydrique

Eric J. ROOSE

Pédologue ORSTOM

Centre d'Adiopodoumé BP V 51 Abidjan, Côte d'Ivoire

Adresse actuelle : Lab. Geol. Appl., Université d'Orléans, 45045 Orléans Cedex, France

RÉSUMÉ

L'auteur présente la synthèse de 12 années d'expérimentation concernant le bilan hydrique et les transferts de matières par les pluies, le drainage et les activités biologiques sous une forêt dense humide et sous culture (en particulier une culture de maïs modérément fertilisée) sur un sol ferrallitique très désaturé de basse Côte d'Ivoire. Le climat subéquatorial est particulièrement agressif. D'une part, les pluies sont abondantes (1.600 à 2.700 mm par an), concentrées sur 2 mois (600 à 1.700 mm du 15 mai au 15 juillet), très intenses (averses de 150 mm/jour dont 90 mm/h durant 30' observées chaque année). D'autre part, les matières organiques évoluent rapidement puisque la température (24,6 °C) et l'humidité restent élevées toute l'année.

Sous forêt, le ruissellement (0.5 — 1 %) et l'érosion (20 à 450 kg/ha/an) sont faibles quelle que soit la pente (5 à 65 %) mais le drainage est très actif (400 à 1.700 mm/an). Les pertes par érosion et lixiviation sont largement compensées par les apports des pluies et par les remontées biologiques, surtout végétales car l'activité de la méso-faune est freinée par l'abondance des sables grossiers. Lorsque la forêt est défrichée et brûlée en vue d'implanter des cultures annuelles comme le maïs, la réserve en nutriments du sol et des matières végétales est rapidement épuisée par érosion sélective (20 à 90 t/ha/an sur une pente de 7 %) et par lixiviation. Pour obtenir des rendements acceptables, la fertilisation minérale doit compenser non seulement l'exportation par la récolte, mais aussi les pertes par érosion et lixiviation, très variables en fonction des plantes et des techniques culturales : la fumure doit être fractionnée en fonction des besoins physiologiques des plantes, des risques d'averses et de la faible capacité de stockage du sol.

L'appauvrissement en particules fines (jusqu'à 20 microns) des horizons superficiels de ces sols provient principalement de l'érosion sélective sous culture et du lessivage vertical sous forêt avec floculation diffuse sur toute l'épaisseur du profil des colloïdes transportés (matières organiques, kaolinite et secondairement quartz et goëthite). Ce processus pédogénétique est très rapide surtout sous culture annuelle. Pour l'exploitation rationnelle de ces sols sableux et acides, il faut tenir compte de l'agressivité des pluies en maintenant en permanence une abondante couverture végétale et en apportant les compléments minéraux en fonction des besoins particuliers à chaque plante cultivée.

SUMMARY

PRESENT DYNAMICS OF A VERY DESATURATED FERRALLITIC SOIL DERIVED FROM SANDY CLAY DEPOSITS UNDER CULTIVATION AND UNDER THE SUBEQUATORIAL RAINFOREST IN THE SOUTH OF THE IVORY COAST. ADIOPODOUMÉ 1964 to 1976. FIRST PART : EROSION AND WATER BALANCE

The author proposes the synthesis of 12 years experimentations about water balance and actual substances transfer by rainfall, erosion, leaching and biological activity under a secondary rainforest and crops (chiefly a moderate fertilized corn plantation) in a very desaturated ferrallitic clay-sandy soil of Lower Ivory Coast.

The subequatorial climate is particularly aggressive (R USA index = 1.260). Precipitations are plentyfull (1.600 to 2.700 mm/year), centered on two months (600 to 1.700 mm from May 15th to July 15th) and very intense (150 mm/day observed each year with 90 mm/hour during 30 minutes). Organic matter evolutes rapidly because high temperature and humidity all the year long.

Under forest, runoff (0.5 to 1 % of rainfall) and erosion (20 to 450 kg.ha/year) are limited, but drainage is very effective (400 to 1.700 mm). Losses by erosion and leaching are widely compensated by rains and biological inputs, principally by mineralisation of the litter (8 to 12 t/ha/year) : the coarse sand content of the soil is too high to allow a high mesofaune activity. When the forest is cleared and burnt for annual crops like corn, the nutrients reserve contained in soil and organic matter is quickly spraid out by selective erosion (20 to 90 t/ha/year on 7 % slope) and leaching. For acceptable yields, mineral fertilisation must compensate not only exportation by the harvest, but also losses by erosion and leaching losses very variable in relation with plant and land management : fertilisation must be equilibrated and fractionnated in relation with physiological plant needs, excessive rainfall hasard and low nutrients capacity of the soil.

The impoverishment in fine particles (0-20 microns) of upper horizons of this soil is explained by selective sheet erosion under crop and by leaching under forest with diffuse flocculation of transported colloïds (kaolinite, organic matter and quartz + goëthite). This pedogenetic actual process is very rapid principally under annual crops. Rational cultivation of these acid and sandy soils must take aggressivity of the climate into account, maintaining permanently a dense green cover on the soil and bringing complemental nutrients necessary for each crop.

INTRODUCTION

Dans le cadre du programme de recherches sur la dynamique actuelle des sols tropicaux sous végétation naturelle ou cultivée lancé par l'ORSTOM en Afrique de l'Ouest, quatre stations d'observation ont été installées en zone de savane et quatre en zone forestière : parmi ces dernières Divo est située sur granite, Azaguié sur schiste, Anguededou (hévéa) et Adiopodoumé (forêt et cultures diverses) sur les matériaux argilo-sableux du bassin sédimentaire tertiaire du sud de la Côte d'Ivoire (ROOSE, 1970; ROOSE, GODEFROY, 1978; ROOSE *et Coll.*, 1970; ROOSE, 1973).

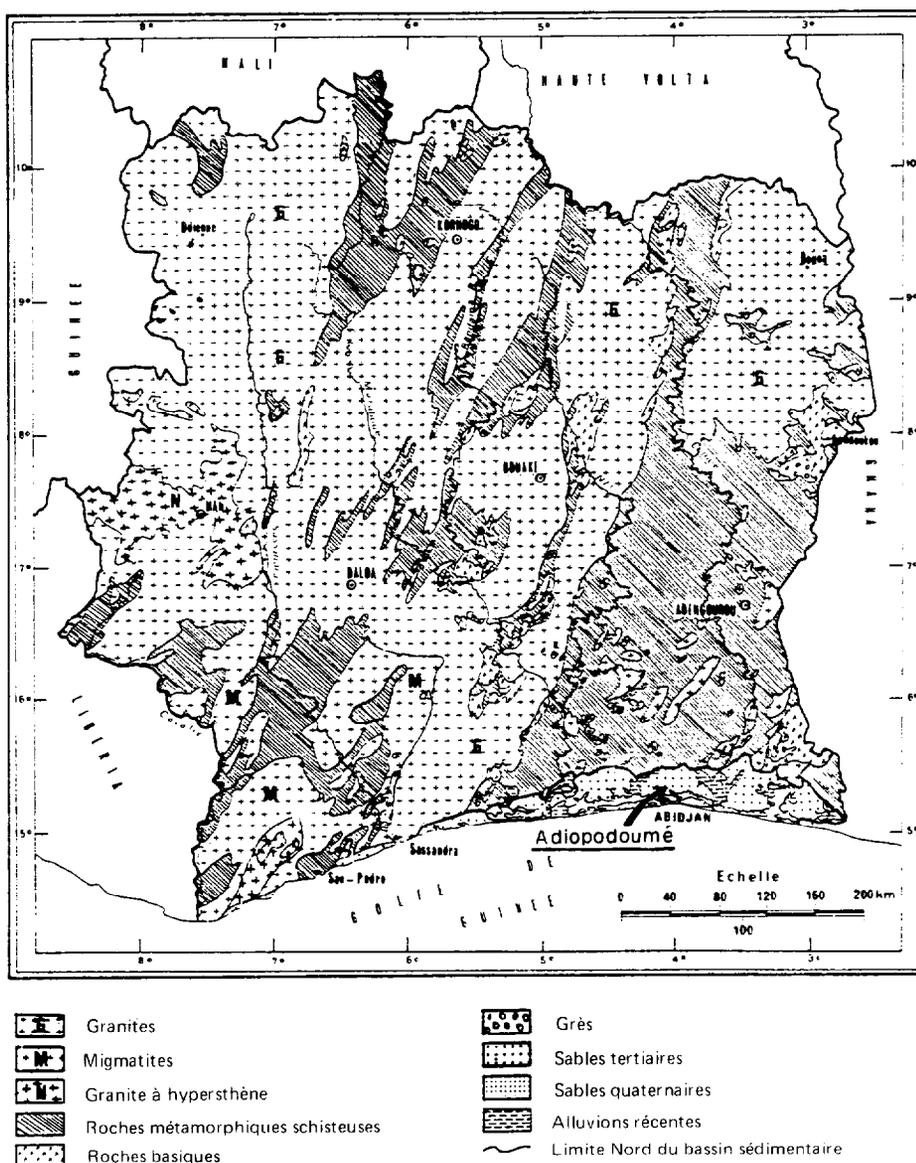
La station d'Adiopodoumé se trouve dans la zone la plus arrosée de la séquence géographique étudiée, donc la plus exposée aux risques d'érosion, de lixiviation et de lessivage. Cette région revêt une importance économique particulière du fait de la proximité de la mer, d'une grande ville et de deux ports : diverses cultures industrielles disputent les terres culti-

vables aux cultures vivrières.

Par ailleurs, les horizons superficiels des sols sur sables tertiaires ont beaucoup d'affinités avec ceux des sols ferrallitiques sur granite très répandus en Afrique de l'Ouest : texture riche en sables grossiers, structure peu développée, fertilité chimique réduite du fait des constituants minéraux (kaolinite, quartz, goëthite).

Nous nous proposons de résumer dans cette note de synthèse (1) les résultats de douze années d'observation sur la dynamique du sol étudiée en petites parcelles sous forêt et sous cultures. Dans une première partie seront présentés les phénomènes d'érosion et le bilan hydrique; dans une seconde partie seront tentés des bilans de matières, moins pour expliquer la morphologie des sols (laquelle dépend pour une part d'un héritage paléoclimatique) que pour faire ressortir l'évolution actuelle de ces sols pauvres, en fonction des options de mise en valeur.

(1) De nombreux travaux repris dans cette synthèse ont déjà été publiés (voir bibliographie) : ils concernent les méthodes et surtout l'érosion (ROOSE 1973-77), et nous ne rappellerons ici que leurs conclusions. Un rapport contenant l'ensemble des résultats est disponible auprès de l'auteur pour les lecteurs désireux de disposer de plus de détails.



Dressée par A. Perraud et P. de la Souchère d'après la carte géologique à 1 : 1 000 000 (Bagarre et Tagini)

FIG. 1. — Carte des roches-mères de Côte d'Ivoire. (In « Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire », *Mém. ORSTOM* n° 50).

1. LE MILIEU

Le centre ORSTOM d'Adiopodoumé (5°19' latitude N, 4°13' long. ouest, 0 à 40 m d'altitude) est situé à 17 km à l'ouest d'Abidjan et à une quinzaine de kilomètres à vol d'oiseau du bord de l'Océan Atlantique (voir fig. 1).

La forêt psammo-hygrophile à *Thurraanthus africana* (AUBREVILLE, 1938) couvrait jadis tout le bassin sédimentaire : en bordure de lagune, elle s'enrichit en fromagers et palmiers à huile. Nos dispositifs ont été placés sous des lambeaux forestiers insensiblement secondarisés qui présentent trois étages plus ou moins denses : les cimes des arbres dominant ou

dominés (40 à 20 m), un fouillis de buissons, de lianes et plantes diverses, un tapis de plantes basses ou une litière peu épaisse mais toujours présente (car la forêt sempervirente perd ses feuilles toute l'année). La forêt dense humide est un milieu parfaitement fermé par rapport aux cultures annuelles qui laissent le sol à découvert pendant plusieurs mois par an. Le climat est du type subéquatorial à deux saisons des pluies centrées sur juin et novembre (voir fig. 6, paragr. 4.3.). Les précipitations sont abondantes (1.600 à 2.700 mm autour d'une moyenne de 2.100 mm/an) et particulièrement concentrées sur deux mois de l'année (600 à 1.700 mm du 15 mai au 15 juillet). Les périodes écologiquement sèches sont de courte durée (janvier-février et août). Les mois de février à avril sont les plus chauds (t° Max. mens. = 32.3°C) et le mois d'août le plus frais (t° Max. mens. 27.5°C) : les températures moyennes mensuelles oscillent à peine de 2° autour de la moyenne annuelle (26.2°C). L'humidité relative est très élevée toute l'année (80 à 90 %). L'évapotranspiration potentielle (ETP Turc) est de l'ordre de 1.220 mm/an : elle diminue de 4.1 mm/jour en mars à 2.5 mm/jour au cœur de la saison des pluies

(juin à septembre) (ELDIN, 1971). Pendant deux mois les risques d'érosion et de drainage sont très élevés puisque le sol est saturé, les pluies très abondantes et l'ETP réduite.

La toposéquence des sols d'Adiopodoumé est schématisée à la fig. 2. Tous les sols ayant été décrits antérieurement (ROOSE et CHEROUX, 1966; 1973) nous nous contenterons de décrire brièvement le profil de la case ERLO (R2) et de présenter au tabl. I les résultats analytiques : les autres profils n'en diffèrent que par l'épaisseur des horizons superficiels et leur teneur en colloïdes (argile et matières organiques). La station est située sur un plateau en pente douce. D'un côté, le plateau se redresse (sols sablo-argileux sur pente de 6 %) avant de plonger brutalement (pente 40 à 70 %) vers un bras de lagune EBRIE. De l'autre côté, la pente (convexe) s'accroît progressivement, puis brusquement, avant d'atteindre une vallée colluviale sèche. Ce paysage de côtes à rias porte les traces des variations successives du niveau de l'océan depuis le Mio-pliocène (LE BOURDIEC, 1958).

La surface du sol de la parcelle R2 (pente 65 %) pré-

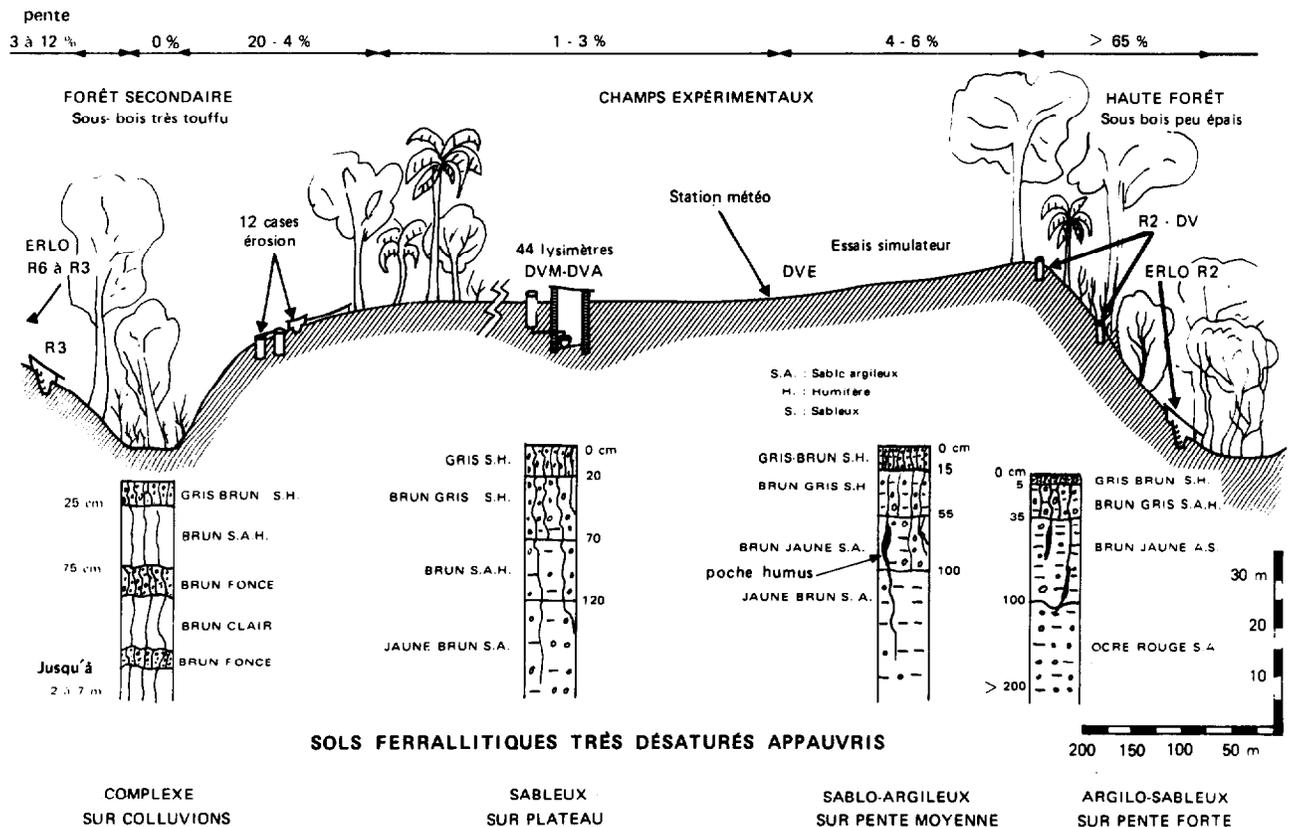


FIG. 2. — Schéma de la toposéquence et répartition des dispositifs à Adiopodoumé.

sente une succession de plages couvertes d'une mince litière de feuilles ou de végétation basse et de plages dénudées ou apparaît toute une série de microfalaises, cascades et replats burinés par les pluies entre le réseau racinaire (ROUGERIE, 1960). Des mesures aux aiguilles (1.000 points quadrats par station) effectuées en fin de saison des pluies (novembre 1976) ont montré que la couverture du sol diminue (98-97 et 83 %) lorsque la pente augmente (3 à 10 %, 30 et 65 %). Sous la surface un peu tassée du sol, apparaît un mince horizon gris brun (5 à 10 cm) humifère, sableux, à structure particulière avec quelques agrégats humifères accrochés au chevelu radicaire très abondant qui donne un peu de cohésion à cet horizon bouillant, très poreux et vite desséché. Les grains de quartz sont blancs. Vient ensuite (5 à 35 cm) un horizon brun gris encore humifère, sablo-argileux et plus cohérent. La structure est fondue à débit polyédrique moyen, faiblement développée. Les grains de quartz sont recouverts d'une pellicule ferrugineuse. On y trouve des charbons de bois, des graviers de quartz ferruginisés arrondis et de grès ferrugineux (colluvium). L'horizon est encore très poreux, perméable et colonisé par de nombreuses racines verticales. La transition est progressive (couleur, texture, son au marteau) avec l'horizon suivant qui sépare la zone de pénétration humifère du matériau originel.

Cet horizon de transition (35 à 100 cm de profondeur) est brun jaune, sablo-argileux, à structure fondue à débit polyédrique plus grossier peu développé. Il reste perméable, très poreux mais un peu plus cohérent et collant aux instruments : il est presque toujours frais et comporte des graviers de quartz ferruginisés et des poches plus foncées de pénétration des matières organiques (anciens trous de rats). Les racines sont moins nombreuses et localisées dans les fissures et les poches humifères. A la base de l'horizon, on distingue quelques taches jaune clair d'hydromorphie ainsi qu'une traînée de graviers de quartz arrondis. Le passage est assez net à un horizon jaune rouge (100 à plus de 250 cm), plus riche en sables grossiers, sablo-argileux, à structure fondue, plus compact et moins poreux, comportant quelques grosses racines d'ancrage plongeant dans ce matériau originel qui durcit à l'air libre. On y observe quelques taches jaunes ou rouges peu différenciées et des fissures recouvertes de revêtements beiges (humo-argillanes) et remontant presque jusqu'en surface.

D'après les résultats analytiques (tabl. I), les teneurs en matières organiques sont moyennes en surface (62 ‰) et diminuent progressivement (6 ‰ vers un mètre) : le taux de carbone humifié dépasse 30 % et les acides fulviques sont supérieurs aux acides humiques dès la surface. Les teneurs en azote sont élevées en surface (1 à 2.7 ‰) et le rapport C/N montre que la minéralisation s'effectue dans de bonnes

conditions (mull tropical de PERRAUD, 1971). Les carences en phosphore sont rares car le phosphore total est abondant sur les sables tertiaires. La capacité d'échange de cations (CEC) est médiocre dès 30 cm (5 à 3 mé/100 g) et dépend en surface du taux de matières organiques. La diffractométrie aux rayons X a indiqué la présence exclusive de quartz, kaolinite et goëthite. L'observation en lames minces n'a montré en dehors de ces constituants que de rares particules d'épidote, hornblende, rutile, micas plus ou moins chloritisées, et aucun feldspath qui justifierait une réserve en potassium. Le pH est très acide (5.2 à 4.5) et le taux de saturation diminue de 70 % en surface à moins de 8 % dès 20 cm. Calcium et magnésium sont bien représentés dans l'horizon humifère, mais dès 40 cm, tous les cations échangeables sont réduits à l'état de traces. Les réserves minérales sont très faibles sauf en potassium. L'attaque triacide montre que les résidus quartzeux sont très abondants sur tout le profil, tandis que la silice et l'alumine combinés augmentent légèrement dans l'horizon jaune rouge. Le fer total augmente progressivement de 1.9 à 3 % dans le premier mètre puis passe brusquement à 6 % vers 2 m. Le titane évolue à peine. Au total, les propriétés chimiques sont médiocres.

Les propriétés physiques par contre sont assez favorables au développement des plantes. Le profil est homogène et les propriétés physiques évoluent progressivement jusqu'à l'horizon brun jaune dont la profondeur varie de 1 à 1.5 m.

La stabilité structurale est bonne sous forêt ($I_s \leq 1$) mais se dégrade rapidement sous culture. La perméabilité est très forte sous forêt ($K_{Müntz} \geq 1.500$ mm/h) et reste bonne en profondeur ($K_{Vergiere} = 100$ à 220 mm/h après 8 heures d'écoulement) : la vitesse de filtration semble nettement supérieure sur des blocs prélevés verticalement et horizontalement plutôt que parallèlement à la pente topographique.

Sous culture, la perméabilité sous une nappe d'eau reste très élevée ($K_{Müntz} = 400$ à 600 mm/h) mais des essais au simulateur de pluie ont montré qu'après quelques minutes d'une pluie de 60 mm/h, il se forme une pellicule de battance : le ruissellement atteint 40 à 60 % sur sol nu (ROOSE et ASSELINE, 1978).

La porosité totale dépasse 60 % en surface, 41 % vers un mètre et diminue de 37 % vers 150 cm à 27 % vers 2 m de profondeur. Comme la microporosité augmente de 17 à 27 % de la surface jusqu'à 2 m, on constate que la macroporosité, très forte en surface, s'annule dans l'horizon jaune rouge ; ceci explique les accumulations temporaires d'eau et les écoulements obliques observés au-dessus de ce niveau. La réserve hydrique est faible en surface et s'épuise d'autant plus vite que 75 % des racines sont localisées dans les 50 premiers centimètres. Par contre, le sol reste frais

TABLEAU I

Résultats d'analyse du profil de sol de la case ERLO R2 (Adiopodoumé)

Horizon		1	2	3	4	5	6	7
Profondeur mini en cm		0	20	40	90	140	190	240
Profondeur maximale		5	30	50	100	/150	/200	/250
GRANULOMÉTRIE en 10 ⁻²	Argile 0 à 2 μ %	12.3	17.3	23.1	28.6	24.8	19.0	15.5
	Limon fin 2 à 20 μ %	1.9	2.6	2.7	2.9	3.8	3.1	1.1
	Limon grossier 20 à 50 μ %	3.3	3.9	3.6	4.1	5.9	2.2	3.0
	Sable fin 50 à 200 μ %	24.1	26.7	24.1	24.1	24.5	27.0	24.1
	Sable grossier 200 à 2.000 μ %	58.8	48.0	46.2	40.8	41.2	47.4	55.2
	SF/SG	41	56	52	59	59	57	43
MATIÈRES ORGANIQUES en 10 ⁻³								
	Carbone	0/00 36.34	7.28	5.38	5.56	5.20	5.15	5.05
	Azote	0/00 2.60	0.68	0.64	0.50	0.28	0.28	0.28
	Acides humiques	0/00 1.90	0.63	0.38				
	Acides fulviques	0/00 1.94	1.63	1.54				
ACIDITÉ								
pH eau 1/25		4.2	4.6	4.6	4.6	4.5	4.5	4.5
CATIONS ÉCHANGEABLES en mé/100 g	Calcium Ca ⁺⁺	mé/100 g 6.40	0.16	0.06	0.08	0.05	0.06	0.15
	Magnésium Mg ⁺⁺	mé/100 g 3.90	0.15	0.10	0.05	0.03	0.01	0.05
	Potassium K ⁺	mé/100 g 0.17	0.03	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01
	Sodium Na ⁺	mé/100 g 0.06	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
	Capacité d'échange	mé/100 g 14.71	4.68	4.70	3.25	3.17	2.39	3.18
ACIDE PHOSPHORIQUE en 10 ⁻³	Phosphore total	0/00 1.839	1.60	1.44	1.34	1.60	1.07	1.07
	Phosphore Ass. Olsen	0/00 0.10	0.03	0.03		0.03	0.03	
ÉLÉMENTS TOTAUX (triacide) en 10 ⁻²								
Perte au feu		% 8.60	3.65	4.50		4.55	3.25	
Résidu		% 79.80	79.80	76.10		70.20	77.80	
Si O ₂		% 5.70	9.90	10.30		12.0	9.60	
Al O ₃		% 3.58	5.41	7.04		8.92	4.11	
Fe ₂ O ₃		% 1.85	2.55	3.65		3.05	6.25	
Ti O ₂		% 0.43	0.57	0.63		0.64	0.50	
en mé/100 g	Ca ⁺⁺	% 8.90	11.0	0.60	7.70	1.60	0.70	1.88
	Mg ⁺⁺	% 4.50	0.01	0.20	2.28	2.00	0.30	1.20
	K ⁺	% 0.55	0.35	0.42	0.54	0.26	0.20	0.30
	Na ⁺	% 0.70	0.60	0.48	0.62	0.46	0.44	0.65
STRUCTURE et CARACTÉRISTIQUES HYDRIQUES								
pF 2.5		% 14.20	10.83	11.56	14.47	14.82	15.31	11.37
pF 2.7		% 13.58	9.77	10.71	13.83	14.38	10.61	8.62
pF 3		% 13.24	9.50	10.49	12.14	13.10	9.93	7.36
pF 4.2		% 11.70	6.53	8.13	10.63	10.13	7.44	5.77
Instabilité structurale		0.19	0.95	2.65	3.76	3.91	3.31	3.07
Perméabilité		cm/heure 60.21	4.76	1.69	0.91	1.20	1.81	1.10
SiO ₂ /Al ₂ O ₃		2.71	3.11	2.49	—	2.29	3.97	—
S. Bases éch. mé/100 g		10.53	0.36	0.21	0.15	0.10	0.09	0.22
Taux de saturation		% 71.5	7.6	4.5	4.6	3.1	3.7	6.9
Mat. Organ. en 10 ³		62.69	12.56	9.25	6.14	(1.8)	(1.8)	(1.8)
C/N		13.9	10.7	8.3	7.2			
Taux Carbone humifié		% 10.6	31.0	35.8				
Ac. Fulv./Ac. Hum.		1.0	2.6	4.1				

vers 1 m et son humidité ne varie guère au-delà de 3.5 m.

La présence de graviers de quartz, de grès et de charbons de bois jusqu'à 1 m semble indiquer que le sol a été profondément remanié : le rapport SF/SG pourtant reste constant jusqu'à 2 m. La courbe de texture fait apparaître un taux d'argile maximum de 50 à 150 cm (23 à 29 %) mais les analyses (1972) ne comportent pas de dispersion aux ultra-sons et l'on peut craindre la présence de pseudo-particules (fer passe de 3 à 6 %). En lames minces, on n'observe de cutane que vers 50 cm dans l'horizon brun jaune.

Enfin, un sondage effectué jusqu'à 10 m a montré qu'il existait une succession de niveaux de texture très variable pouvant aller jusqu'aux sables bouillants. D'après la classification française (AUBERT, SEGALIN, 1966) il s'agit d'un sol ferrallitique très désaturé appauvri modal sur sables tertiaires, faciès tronqué sur pente très forte.

2. LE DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Les dispositifs sont répartis (voir photos et fig. 2) en cinq endroits du centre d'Adiopodoumé distants de moins de 1,5 km du poste météorologique. Ils ont été décrits ailleurs (DABIN, LENEUF, 1958; ROOSE, 1968, 73, 77; ROOSE, des TUREAUX, 1970), et comprennent :

a - 12 cases d'érosion classiques comportant une parcelle expérimentale (surface réduite de 90 à 50 m² pour permettre l'usage du simulateur de pluie) isolées par des tôles fichées en terre, en bas de laquelle sont mesurées les pertes en eaux, en éléments solubles et solides dans 2 cuves reliées par un partiteur à 7 tubes. Les pentes ont été ajustées à 4 — 7 et 20 %.

b - 6 cases de lessivage oblique (ERLO) (1) ont été construites en janvier 1965 pour évaluer la variabilité de l'érosion et du lessivage oblique sur un même type de sol et de végétation en fonction de la pente (7-11 et 65 %). Suite à divers incidents, nous n'avons conservé à partir de 1967 que les parcelles R3 (1965-75) située sur une pente de 11 % et R2 sur un versant de 65 %.

La surface réelle projetée à l'horizontale est de 100 m² (4 x 25 m) en R2 et 200 m² (6 x 33 m) en R3 : les gouttières où sont recueillies les eaux de drainage oblique (2 m de large) sont enfoncées de 20 cm dans le sol à 20 - 50 - 100 et 150 cm de profondeur.

c - Les cases de drainage vertical sont des monolithes de sol non remanié, entourés de cylindres de tôle de

fer galvanisé débouchant vers le bas dans un cône muni d'un tuyau drainant : du goudron coulé à chaud assure l'étanchéité et un bon contact entre les tôles et le sol. Neuf cases de drainage ont été installées sous *Paspalum notatum* dans le parc météo (DVE). Huit lysimètres (63 cm de Ø) ont été placés sous forêt près de R2 à des profondeurs de 40 - 90 - 140 et 180 cm (essai R2DV de mai 71 à mai 76).

— Quinze cases de drainage (63 cm Ø, 150 à 180 cm de profondeur) ont été placées dans un champ près de la ferme expérimentale pour des études méthodologiques puis les bilans hydriques et chimiques sous une culture de maïs (7/1971 à 1/1976) fertilisé (5 doses) (essais = DVM correspondant à 7 cycles de maïs et une année de jachère.

— Douze cases de drainage (63 cm, 150 cm de profondeur) au milieu de douze parcelles de 50 m² furent consacrées à l'étude des bilans hydriques et chimiques sous cultures fourragères (*Panicum maximum* et *Stylosanthes guyanensis*) soumises à l'irrigation (2 doses) et à la fertilisation minérale (3 doses) (essai DVRT 1970-1974 : Voir TALINEAU, ROOSE et ROOSE TALINEAU, 1973). Après une année consacrée à l'égalisation de la fertilité (*Panicum* sans engrais), fut mise en place une expérimentation sur le mode de travail du sol combiné à 3 modes de restitution des déchets de culture (brûlis, enfouis, en surface) sous ananas (convention ORSTOM-IRFA - Salci-Socabo).

d - Les précipitations ont été estimées pour chaque dispositif à partir des différentes mesures disponibles sur le Centre ORSTOM et à partir de batteries de 10 pluviomètres installés sous le couvert forestier en 1969 en R3 et de 1969 à 1975 en R2.

Nous nous attacherons à présenter ici les résultats concernant la forêt et une culture de maïs modestement fertilisée.

3. LES RÉSULTATS CONCERNANT L'ÉROSION

Nous résumerons dans ce chapitre les caractéristiques principales des précipitations, du ruissellement et des transports solides à la surface du sol.

3.1. Les précipitations

Les écarts entre les observations effectuées aux pluviographes des cases d'érosion, du poste météo d'Adiopodoumé et du poste météo d'Abidjan (ASECNA) peuvent être considérables lors d'une

(1) Case ERLO où l'on mesure l'Erosion, le Ruissellement et le Lessivage Oblique sur une section de 2 x 2 m du sol.

PLANCHE I



Case d'érosion
1 champ expérimental clos
1 canal de réception et 2 cuves
de stockage



Case Erlo
Au bas d'un champ clos
1 canal de ruissellement
4 gouttières enfoncées dans
le sol sous les principaux
horizons pour recueillir les
eaux de drainage oblique

averse particulière mais s'estompent lorsqu'il s'agit de moyennes sur de longues périodes. Nous nous basons donc sur les longues séries d'observation des postes météo officiels pour caractériser les données climatiques et sur les observations particulières à chaque dispositif lorsqu'il s'agit de préciser un élément du bilan hydrique dans des circonstances données.

En moyenne, sur 28 ans (1948-1976), il a plu 2.131 mm par an à Adiopodoumé, 1.635 mm en année décennale sèche et 2.705 mm en année décennale humide (d'après les documents de MONTENY, ELDIN, 1977). Nos observations eurent lieu pendant trois années humides de fréquence triennale, deux années à peu près normales et huit années sèches de fréquence décennale (tabl. II). Ruissellement, drainage et transports de matières seront donc le plus souvent évalués par défaut.

Cependant, si les précipitations annuelles furent souvent déficitaires pendant la période d'observation, il y eut quand même chaque année une ou plusieurs décades où les pluies dépassent 200 à 500 mm et au moins une averse de plus de 100 mm. En 12 ans, on a observé 21 averses de plus de 100 mm dont cinq de plus de 150 mm et deux de plus de 200 mm. D'après l'étude des averses exceptionnelles que BRUNET -

MORET (1967) a effectué pour le poste d'Abidjan sur un échantillon s'étendant à 28 ans, on peut s'attendre à une pluie de 135 mm chaque année, 200 mm tous les cinq ans et 230 mm tous les 10 ans.

Il faut encore noter qu'il peut pleuvoir 600 à 1.700 mm en huit semaines entre le 15 mai et le 15 juillet et que toutes les averses les plus importantes tombent à cette époque alors que le sol est déjà saturé. Comme dans le milieu naturel le sol est couvert d'une abondante végétation, les phénomènes d'érosion sont très limités sous forêt, mais il n'en va pas de même sous culture et il faut en tenir compte dans le calendrier des travaux culturaux.

Sous forêt, 79 à 92 % des précipitations annuelles ont traversé la voûte foliaire des arbres et atteint les capteurs situés à 25 cm de la surface du sol : sur ces 14 % d'interception moyenne, une faible partie (1 % au Banco d'après HUTTEL) ruisselle le long des troncs et rejoint le sol en créant localement des engorgements; mais une fraction supplémentaire des pluies peut être interceptée par les buissons, les mousses et la litière situés sous les capteurs. La voûte foliaire modifie également la répartition spatiale et temporelle des précipitations (retard et étalement des pics d'intensité). De plus, en se condensant au bout des feuilles acuminées, les gouttes de pluie grossissent et peuvent

TABLEAU II

*Précipitations mensuelles et annuelles à la station « Cases d'érosion d'Adiopodoumé ».
Pluies journalières maximales (mm/24 h) et indice d'agressivité climatique (RUSA)*

	JANV.	FÉV.	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUIL.	AOUT	SEPT.	OCT.	NOV.	DÉC.	TOTAL
1964	27.5	46.1	54.3	63.0	328.1	737.5	18.8	18.5	53.7	4.6	29.0	266.9	1.648
1965	1.8	86.4	148.3	211.2	176.8	687.3	702.2	35.0	77.2	73.5	88.9	10.6	2.299
1966	16.0	32.0	89.0	57.7	161.5	370.0	441.5	20.5	47.3	116.5	103.2	14.0	1.469
1967	4.0	29.0	91.1	59.0	194.0	807.5	212.0	15.0	62.5	11.0	73.0	87.0	1.645
1968	27.5	157.0	64.5	68.5	179.5	416.0	401.0	230.5	178.5	143.5	103.0	114.0	2.084
1969	23.5	9.5	90.0	190.0	133.5	701.0	379.5	13.0	20.0	206.0	159.0	26.0	1.951
1970	29.5	86.5	115.5	115.2	447.5	294.5	140.0	9.5	57.7	159.5	128.3	31.0	1.615
1971	28.0	8.0	85.0	96.5	162.0	678.0	280.0	37.5	47.0	56.5	150.0	63.0	1.692
1972	8.0	130.0	107.5	92.5	275.0	517.5	159.8	22.5	15.0	151.5	100.0	55.0	1.634
1973	33.0	32.0	62.2	250.3	163.5	432.5	40.0	89.5	192.5	178.7	97.5	72.0	1.644
1974	14.0	105.7	187.5	62.8	113.0	901.5	321.5	45.5	134.0	122.1	105.5	112.0	2.225
1975	0	192.9	178.5	202.5	227.5	340.7	160.3	68.0	58.0	92.0	106.7	84.5	1.712
(1976)	(30.5)	(102.8)	(150.0)	(135.3)	(318.1)	(1.324.8)	(146.5)	(34.7)	(0.7)	(31.2)	(42.7)	(15.2)	2.333
P2 moy. 64/75	17.7	76.3	106.1	122.4	213.5	573.7	271.4	50.4	78.6	109.6	103.8	78.0	1.802
Météo moy. 48-7	29.8	65.5	112.2	142.6	294.6	697.9	267.6	42.4	76.9	167.4	152.2	81.1	2.131
Pluie Jour. Max.	33	102	90	95	142	263	197	105	100	91	47	98	263
RUSA Mens.	6.3	55.3	66.8	89.7	148.1	364.1	156.1	10.8	37.8	40.0	38.1	54.1	1.067

TABLEAU III

Intensité maximale des averses (mm/h) en fonction du temps

Intensité max. (mm/h) en	5'	10'	20'	30'	60'	180'
Roose (Adiopodoumé P2)						
I max. fréquent chaque année	120-150	100-130	75-100	60- 80	40- 60	15-30
I max. fréquent exceptionnelle fréquence en 10 ans	200-240	160-200	130-170	110-150	80-120	45
	2	5	4	5	4	1
Brunet-Moret (Abidjan 1967)						
récurrence 1 an	144	126	—	92	66	30
inconnue	228	204	—	130	102	42

acquérir plus d'énergie que dans les champs voisins : mais ce phénomène est sans conséquence car la surface découverte du sol forestier est minime (1 à 15 % sous les forêts denses secondarisées étudiées).

On constate au tabl. III que les intensités observées aux cases d'érosion (1966-75) sont très élevées et du même ordre de grandeur que celles publiées par BRUNET - MORET (1967) pour le poste d'Abidjan. Durant l'averse de fréquence annuelle, l'intensité maximale peut atteindre 150 mm/h pendant 5 minutes, 90 mm/h pendant 30 minutes et 70 mm pendant une heure : mais il est arrivé plusieurs fois en 10 ans

d'observation aux cases d'érosion que l'intensité dépasse 200 mm/h pendant 5 minutes, 130 mm/h pendant 30 minutes et plus de 100 mm pendant 1 heure.

WISCHMEIER et SMITH (1960) ont défini empiriquement un indice d'agressivité climatique (RUSA) comme étant la somme des produits de l'énergie cinétique des pluies unitaires par leur intensité maximale en 30 minutes. Calculé d'après le dépouillement des enregistrements pluviographiques des averses de plus de 10 mm de hauteur, aux cases d'érosion, cet indice a varié de 614 à 1.673 unités autour d'une moyenne de RAM = 1.027 pour des

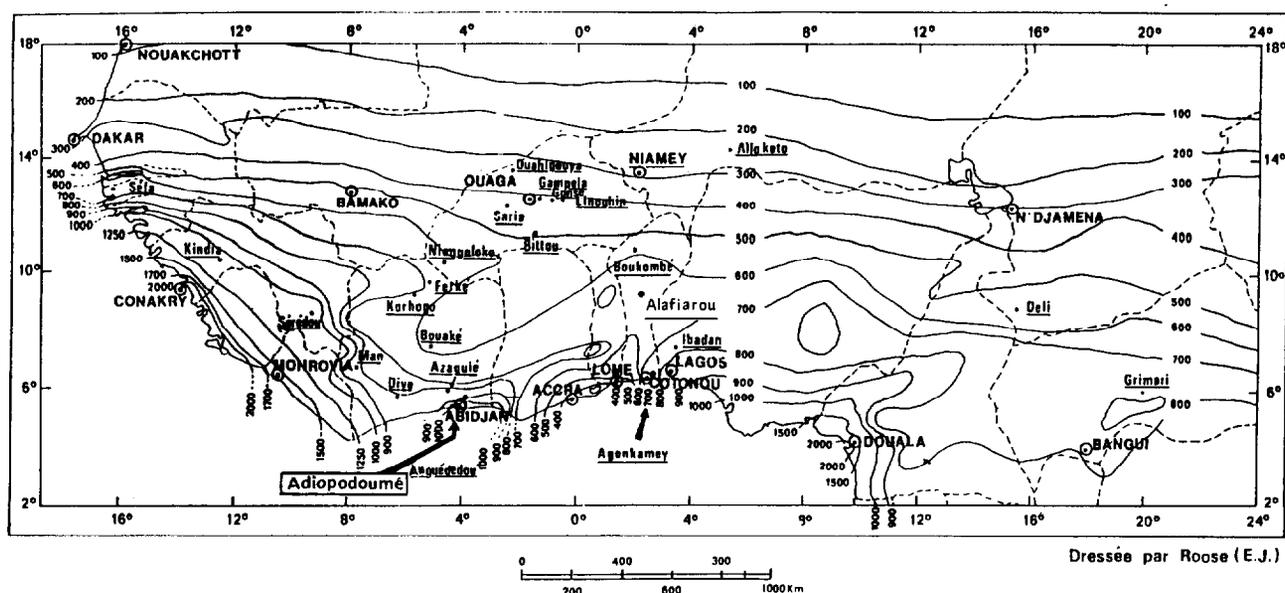


FIG. 3. — Esquisse de la répartition de l'indice d'agressivité climatique annuel moyen (Rura de Wischmeier) en Afrique de l'Ouest et du Centre - Situation des parcelles d'érosion - D'après les données pluviométriques rassemblées par le Service Hydrologique de l'ORSTOM et arrêtées en 1975.

précipitations moyennes durant la même période de HAM = 1.802 mm. Sur une longue période, il atteindrait en moyenne 1.260 unités (avec un rapport RAM/HAM de 0.6) ce qui est extrêmement élevé (voir fig. 1) : 10 à 60 fois plus fort qu'en climat tempéré (BOLLINE, 1978), 4 à 20 fois plus élevé qu'en région méditerranéenne (KALMAN, 1967; MASSON, 1971), 2 à 6 fois plus fort qu'en zone soudano-sahélienne (ROOSE, 1976-1977).

L'ensemble de ces résultats montre que les précipitations sont extrêmement agressives à Adiopodoumé, de loin les plus agressives de toutes les stations de notre réseau d'observation.

3.2. Le ruissellement

Sous les forêts denses secondarisées d'Adiopodoumé, le ruissellement a toujours été très réduit (1 à 50 mm/an) et indépendant de la hauteur des précipitations annuelles comme de celle de l'année précédente ou de la durée des observations. Par contre, le ruissellement augmente légèrement avec la pente : lorsque la pente passe de 7 à 11 - 23 et 65 %, le coefficient de ruissellement annuel moyen (KRAM) augmente de 0.1 % à 0.3 - 0.5 et 1.2 % tandis que le coefficient de ruissellement maximal paraverse croît plus rapidement (KRMAX. = 0.7 - 1.3 - 3.2 et 12 %). Les variations saisonnières sont bien marquées. Lors des orages de fin de saison sèche (averses violentes mais brèves), on observe souvent des ruissellements relativement forts (KR = 1 à 10 %) car la voûte foliaire est moins dense à cette époque et le sol est desséché en surface (hydrophobie des matières organiques et macropores encombrés de bulles d'air). Ensuite, les réserves d'eau se reconstituent dans le profil et l'on n'observe plus temporairement ni ruissellement ni drainage oblique. Les plus gros volumes de ruissellement sont mesurés lors des averses les plus importantes (souvent aussi les plus intenses) tombant du 15 mai au 15 juillet sur un sol détrempé; quoique la hauteur de ces pluies atteigne 100 à 250 mm/2 jours, les coefficients de ruissellement ne sont pas forcément les plus élevés de l'année car la perméabilité du sol est élevée jusqu'en profondeur. Durant la petite saison sèche, le ruissellement est négligeable : il ne reprend légèrement qu'en novembre, au cours de la seconde saison des pluies.

Sur des parcelles nues, le ruissellement est beaucoup plus élevé. En moyenne sur 5 ans, le ruissellement annuel (KRAM) diminue de 35 à 33 et 24 % pour des pentes de 4.5 - 7 et 23 %. Lors des fortes averses le ruissellement maximal (KR MAX) diminuait également de 98 à 87 et 73 % pour les mêmes pentes. Ce phénomène inattendu a été vérifié sous pluies simulées (LAFFORGUE, NAAH, 1977) et naturelles (ROOSE,

LACOEUILHE, 1976).

Sous culture de maïs, le ruissellement sur une pente de 7 % est encore élevé (KRAM = 22 à 30 %) et assez proche de celui qu'on observe sur sol nu surtout lors des plus fortes averses (KR MAX = 60 à 80 %). Il est vrai que les billons étaient orientés dans le sens de la pente et que la culture de maïs ne couvre le sol que pendant 2 cycles de 4 mois au cours duquel la couverture végétale reste incomplète (80 % max.) (ROOSE, 1973-77).

Le ruissellement est un phénomène discontinu. Sous forêt, il n'apparaît qu'en certaines plages dénudées et tassées où il forme des filets qui s'anastomosent, se regroupent ou disparaissent dans les trous laissés par les racines pourries ou des animaux. Sous culture, les irrégularités de la surface du sol retardent (mottes) ou accélèrent (billons) la hiérarchisation des écoulements; celle-ci apparaît très rapidement sur sol nu finement travaillé pl. photo II a et b. Si on veut aussi se rappeler que les propriétés hydrodynamiques des sols changent le long des versants, on comprendra que l'influence de la longueur de la pente sur le volume du ruissellement n'est pas toujours décisive; par contre, il arrive que le ruissellement se concentre en certains axes, prend de l'énergie en dévalant la pente et provoque alors des dégâts considérables en relation avec la longueur de la pente (pl. photo II c).

La perméabilité de ce type de sol ferrallitique est remarquable. Sur trois parcelles cultivées en ananas, non billonnées, mais avec les résidus de la culture précédente laissés à la surface du sol, des pluies simulées de 60 mm/h pendant 2 heures, de 90 mm/h pendant 1 heure et 120 mm/h pendant 30 minutes tombant sur un sol humide, ont été totalement infiltrées. Des mesures d'infiltration sous une lame d'eau de 3 cm (MÜNTZ à double anneau) ont montré que l'infiltration était exceptionnellement élevée, de l'ordre de 1.500 mm/h sous forêt, 400 mm/h sous culture et plus de 600 mm/h sur sol nu récemment travaillé.

Or, sur des parcelles nues ou mal couvertes, des pluies de 60 mm/h provoquent de forts ruissellements. Le ruissellement dépend donc, non seulement des caractéristiques des pluies (intensité et durée) et du couvert végétal mais aussi des propriétés de la surface du sol (humidité préalable, structure) et en particulier de son aptitude à former une pellicule de battance laquelle commande tous les phénomènes d'infiltration.

3.3. L'érosion mécanique

Sous forêt, les transports solides (tabl. IV) à la surface du sol sont extrêmement réduits (quelques dizaines à quelques centaines de kg/ha/an) quelles

PLANCHE II



a) Organisation du ruissellement en nappe
Adiopodoumé, pente 4 %



b) Érosion en nappe.
Micro-falaise se débitant en micro-demoiselles
coiffées.



c) Érosion en ravine
Dans une plantation d'ananas les ravines
proviennent de l'accumulation des eaux de
ruissellement sur le réseau routier et,
secondairement, elles sont nourries par l'eau
des sillons

TABLEAU IV

Résumé des phénomènes de ruissellement et d'érosion observés
sous forêt et sous maïs à Adiopodoumé (1958-75)

		FORÊT SECONDAIRE				MAÏS	
		R5	R3	P6	R2		
		7 %	11 %	23 %	65 %	7 %	
		2	11	8	11	6	
Années		1965/66	1965-75	1958-65	1965-75	1967-69	
KRAM	extrêmes	%	—	0.07 à 0.7	0.1 à 2.2	0.5 à 2.5	22 à 30
	médian	%	0.1	0.3	0.5	1.2	27
KRMAX	extrêmes	%	—	0.7 à 2.2	1 à 7	3 à 16	56 à 80
	médian	%	0.7	1.3	3.2	12	65
Turbidité g/l			556	266	483	384	1.315
Erosion tot.	extr.		17 à 86	14 à 89	7 à 227	211 à 1.200	75.000 à 134.000
kg/ha/an	médian		17	38	56	455	90.000

que soient l'agressivité des pluies, l'orientation et l'inclinaison des versants. Cependant, l'érosion croît plus que proportionnellement avec la pente (17 à 455 kg/ha/an).

Il faut noter que l'érosion mesurée de la sorte est probablement supérieure à la réalité. En effet, elle est nettement plus forte les premières années que les suivantes (3 à plus de 10 fois) et la différence provient essentiellement des terres de fond (sables et agrégats entraînés par les eaux de ruissellement le long des versants). Ceci pourrait s'expliquer par les perturbations dues à la mise en place des bordures de parcelles. Le rapport entre la fraction fine qui circule en suspension (S) et l'érosion totale (E) augmente sensiblement avec le temps : S/E passe de 1 à 30 % sur la pente de 65 %, de 7 à 85 % sur la pente de 11 % et jusqu'à 100 % en P6. De plus, le canal collecteur au bas de la parcelle, reçoit des éléments terreux de la taille des sables grossiers qui se sont déplacés par la battance des pluies : ce genre de déplacement par bonds successifs des sables existe dans la nature, mais il s'effectue dans toutes les directions, donc avec des compensations partielles qui ne peuvent exister dans le canal recouvert d'une tôle. Cette erreur n'est sensible que sur les petites parcelles bien couvertes où l'érosion est faible. L'érosion réelle des versants forestiers est donc probablement encore plus réduite que celle que nous avons mesurée en parcelles complètement fermées.

Sur sol nu, par contre, les transports solides sont 1000 fois plus élevés et augmentent très rapidement avec la pente : l'érosion croît de 60 à 130 et 570 t/ha/an pour des pentes de 4.5 - 7 et 23 % (ROOSE, 1973-77).

Sous maïs, l'érosion est encore considérable (90 t/ha/an pour une pente de 7 %) et la fraction des transports en suspension reste faible et assez stable (S/E = 4 à 9 %). C'est parce que le couvert végétal du maïs est peu développé et que les techniques culturales (billonnage dans le sens de la pente) favorisent l'écoulement des eaux que l'érosion atteint de telles proportions (70 % des pertes en terre sur sol nu). L'adoption de techniques culturales mieux adaptées (plantation précoce et plus dense, variétés plus vigoureuses et répondant mieux à une fertilisation équilibrée, travail du sol réduit à la ligne de plantation et perpendiculaire à la pente) permettrait de réduire les transports solides de moitié.

Connaissant les pertes en terre, l'érosivité des pluies (RUSA) et le facteur topographique (SL) des parcelles nues travaillées qui servent de référence, il est aisé de calculer le coefficient d'érodibilité du sol (K) de l'équation de WISCHMEIER et SMITH (1960) : il varie de 0.05 à 0.17 en fonction des années autour d'une moyenne de K = 0.10 qui correspond à des sols sableux très résistants à l'érosion en nappe et en rigole (ROOSE, 1973, 1974, 1977). Par conséquent, les phénomènes d'érosion catastrophique qu'on peut observer dans la région sont dus à l'agressivité des pluies (double du maximum observé aux U.S.A.) ou encore à la concentration du ruissellement suite au développement de l'urbanisme (ex. route du Banco près d'Abidjan) ou du réseau routier (ex. plantation d'ananas).

Parmi les facteurs qui déterminent l'importance de l'érosion, le couvert végétal a un rôle prédominant

puisque'il peut intercepter l'énergie des gouttes de pluie qui sont à l'origine de la battance des sols, du ruissellement et des transports solides.

Le sol est très résistant à l'agressivité mécanique des pluies. La pente modifie relativement peu le ruissellement mais augmente la charge solide et donc l'érosion. Le travail du sol peut améliorer provisoirement l'infiltration mais diminue sa cohésion. En conclusion, dans cette région qui manque rarement d'eau, la meilleure protection du milieu consiste à couvrir le sol par tous les moyens (cultures pérennes avec plantes de couverture, plantation précoce et dense des plants sélectionnés pour leur vigueur, fertilisation et travail du sol adaptés aux besoins de chaque culture, lutte phytosanitaire, etc.) tout en prévoyant l'écoulement des excès d'eau dans des drains aménagés.

4. ESSAIS DE BILAN HYDRIQUE

Il n'est pas possible de calculer un bilan hydrique précis pour chaque parcelle sans les données d'évapotranspiration réelle. Aussi allons nous d'abord passer en revue les données disponibles avant de schématiser le bilan hydrique sous forêt et sous maïs en année moyenne, sèche et humide et de le comparer aux bilans hydriques observés sur petits bassins des régions équatoriales.

4.1. Les données d'observation

4.1.1. LES PRÉCIPITATIONS

Nous disposons des observations journalières des pluies aux cases d'érosion (1960-75) et au poste météorologique d'Adiopodoumé (1964-74); les pluies moyennes (2.131 mm) sont celles du poste météo (1948-1976) publiées par MONTENY et ELDIN (1977). Nous choisissons les observations de 1972 ($P = 1.636$ mm) pour l'année décennale sèche et 1962 pour l'année décennale humide ($P = 2.776$ mm).

4.1.2. LE RUISSÈLEMENT

Sur les versants forestiers, le ruissellement ne dépasse guère 1 % des précipitations annuelles que l'année soit sèche ou humide. Par contre, sous maïs (fertilisation faible et pente 7 %), le ruissellement augmente de 22 % en année sèche, à 25 % en année moyenne et 27 % en année humide.

4.1.3. LE DRAINAGE OBLIQUE MESURÉ EN CASE ERLO

Lorsque les eaux qui s'infiltrèrent dans le sol ren-

contrent des horizons peu perméables, elles s'accumulent et forment au-dessus de ceux-ci une nappe temporaire d'eau libre susceptible de s'écouler à l'intérieur du sol vers les points bas du paysage en transportant diverses matières solubles et solides : c'est le drainage oblique que nous avons tenté d'évaluer et de recueillir dans six cases ERLO réparties sur deux toposéquences.

Sur les parcelles R5 et R6 de pente voisine de 7 %, on n'a recueilli que quelques litres durant les deux années d'observation. En R3, situé plus bas sur la même toposéquence et sur une pente plus forte (11 %), le drainage oblique sur une section de 2 x 1.50 m a atteint 21 litres en 1968 puis a régressé jusqu'à disparaître en 1972. Sur ces pentes moyennes, le drainage oblique s'est manifesté très rarement et uniquement dans les horizons humifères superficiels très poreux lors des violents orages de fin de saison sèche.

En R2 qui englobe un versant très raide (65 %), les manifestations de drainage oblique furent nombreuses (10 à 20 fois l'an) et les volumes écoulés relativement abondants : 26 à 1.212 l pour une section de 2 m de front et 150 cm de profondeur (médiane = 345 l/an pour 100 m²). La parcelle étant limitée par le sommet du versant, on peut évaluer l'importance du drainage oblique dans le bilan hydrique. A l'échelle de l'année, le coefficient de drainage oblique (D.O./Pluies) a varié de 0.3 à 1.2 % des pluies ($Md = 0.5$ %) (1) et lors d'une averse particulière, il atteint 0.3 à 7 % des précipitations ($Md = 2.4$ %).

Les plus forts écoulements eurent lieu en 1969, année assez moyenne au total, mais dont les pluies ont été abondantes en juin et juillet (701 et 380 mm). C'est au niveau des horizons humifères (les plus poreux) situés au-dessus de l'horizon brun jaune que les écoulements furent les plus abondants. Les premiers écoulements obliques de l'année peuvent être observés lors de violents orages de fin de saison sèche : les eaux sont brunâtres, très chargées, peu abondantes et recueillies dans les 2 premières gouttières. En avril et mai le sol reconstitue ses réserves. Du début juin au 15 juillet, les écoulements sont très abondants (jusqu'à 300 l/j sur 2 m de front) : les eaux sont d'autant plus claires et peu chargées que les volumes sont importants mais elles restent opaques. Le drainage oblique se manifeste rarement durant la petite saison des pluies. L'analyse des facteurs liés aux phénomènes de drainage oblique montre qu'il se produit parfois lorsque le sol est très sec (air emprisonné dans les macropores) mais surtout lors des averses les plus importantes de l'année (plus de 60 mm) tombant sur un sol détrempe. En définitive, le drainage oblique existe, en dehors des mouvements de la nappe phréatique beaucoup plus profonde, mais il ne constitue pas le moteur essentiel de la pédogenèse dans ce type de paysage.

(1) Md = Médiane des valeurs observées.

4.1.4. LE DRAINAGE VERTICAL MESURÉ EN LYSIMÈTRES

A la suite d'une série d'essais préliminaires (ROOSE, des TUREAUX, 1970) il est apparu difficile, même dans des sols aussi perméables et homogènes que les sols sur sables tertiaires, de mesurer le drainage et de récolter les eaux de percolation ainsi que leur charge soluble et solide en dehors de lysimètres complètement isolés (fond et bordures jusqu'au-dessus de la surface du sol). En particulier, les casiers drainants destinés à piéger les eaux percolant sous un mètre de sol en place n'ont jamais donné satisfaction : les eaux de drainage sont repoussées par le capteur (problème du contact sol/tôle).

Nous n'avons pas utilisé de capsules poreuses car elles ne permettent pas de mesurer le volume du drainage ni sa charge colloïdale. De plus, la représentativité des échantillons prélevés en vue d'estimer la charge soluble est discutable puisqu'ils sont prélevés par succion temporaire dans les micropores du sol alors que les grands mouvements de drainage s'effectuent rapidement dans les macroporosités.

Nous ne pouvons rapporter ici tous les résultats des observations effectuées sur les 42 lysimètres monolithiques mis en place à Adiopodoumé, le lecteur pourra consulter le rapport de synthèse (ROOSE, 1979) et les publications particulières (TALINEAU et ROOSE 1973; ROOSE et LACOEUILHE, 1977). Nous ne développons ici que l'aspect méthodologique et les résultats obtenus sous maïs et sous forêt.

4.1.4.1. Effet des modèles de lysimètre

Soucieux de respecter l'architecture naturelle des pores par lesquels circulent les solutions du sol et de matérialiser les limites latérales des monolithes tout en assurant aux racines un développement normal, nous avons comparé pendant quatre ans quatre types de lysimètre de 0.312 m² placés à 150 cm de profondeur sous Panicum puis sous maïs (3 répétitions).

Il apparaît au tabl. V que les casiers drainant captent très mal l'eau de percolation (uniquement lors des plus fortes averses des mois les plus humides) et donnent une image déformée des qualités analytiques de ces eaux. Par contre, à l'échelle de l'année les différences de drainage entre les trois autres types de lysimètre sont inférieures à l'erreur expérimentale toujours assez élevée, que le sol soit remanié ou non. On observe également au tabl. V que pour des précipitations annuelles très comparables (1.634-1.637 mm), le drainage peut varier considérablement (47 à 65 % des pluies) car il dépend avant tout des séquences pluvieuses et de leur répartition au cours de l'année. Même en année décennale sèche, il est toujours abondant (730 à 1.363 mm).

4.1.4.2. Effet de la fertilisation sur le drainage sous maïs

Après une culture de Panicum et un cycle de maïs non fertilisé, 15 lysimètres (profondeur = 150 cm, Ø = 63 cm) dispersés sur 5 parcelles furent consacrés

TABLEAU V

Drainage vertical (mm) observé sous 4 types de lysimètres placés à 150 cm sous végétation cultivée (Panicum maximum, puis maïs). Moyenne annuelle de trois répétitions

n° des Lysimètres	Casiers 43 - 47 - 49	Lys. remanié 42 - 45 - 48	Lys. non rem. 150 cm 41 - 46 - 51	Lys. non rem. 100 cm 40 - 44 - 50	Moyenne des 3 derniers %
1971 Pluie = 1.634 mm	95	854	781	942	52.6 %
1972 Pluie = 1.635 mm	15	764	735	820	47.2 %
1973 Pluie = 1.637 mm	21	1.115	1.052	1.021	64.9 %
1974 Pluie = 2.223 mm	123	1.296	1.363	1.200	57.9 %
Moyenne	65mm	1.007 mm	983 mm	996 mm	995 mm/56 %

TABLEAU VI

Influence de la dose de fertilisation sur le drainage sous maïs (3 répétitions).
Drainage moyen en mm et % des pluies

Fertilisation	Dose : 0	0,5	1	2	4
1973 Pluie 1.637 mm	1.139 mm /69.6 %	1.156 mm /70.6 %	1.142 mm /69,7 %	1.013 mm /61,9 %	1.032 mm /53,1 %
1974 Pluie 2.223 mm	1.387 mm /62.4 %	1.483 mm /66.7 %	1.363 mm /66.2 %	1.214 mm /54.6 %	1.325 mm /59.6 %
1975 Pluie 1.648 mm	980 mm /60.1 %	1.023 mm /62.1 %	894 mm /54.2 %	839 mm /50.9 %	858 mm /52.1 %
Moyenne Pluie = 1.835 mm %	1.174 mm/ /63.9 %			1.047 mm /57.0 %	

à l'étude de l'influence de la fertilisation sur le volume et les qualités des eaux de drainage sous maïs. Les doses de fertilisation sont un multiple de l'exportation théorique correspondant à 30 quintaux d'épis/ha (60 N, 10 P, 18 K, 6 Ca, 3 Mg) : les résidus de culture et les mauvaises herbes restent sur place.

Le drainage observé sous maïs est très élevé (50 à 70 % des pluies soit 840 à 1.400 mm). Il a tendance à diminuer si la dose de fertilisation augmente : la différence n'est vraiment nette que lorsque les apports minéraux sont suffisants pour entraîner un fort développement végétatif. Il faut noter que dans cet essai, le refus à l'infiltration est empêché de ruisseler en dehors des lysimètres par les bordures qui dépassent la surface du sol. Or, en parcelle d'érosion, le ruissellement sous maïs atteint 22 à 27 % sur des pentes de 7 % et 80 % de ruissellement se produisent à l'époque où le sol est saturé. Il faut donc soustraire environ 80 % du ruissellement au drainage observé aux lysimètres pour approcher le « drainage corrigé » (37 à 44 % des pluies).

A titre de comparaison avec des cultures fourragères pour lesquelles le ruissellement est généralement très faible (1 %), on a observé 45 % de drainage moyen (6 lysimètres de 1971 à 1974) sous *Panicum maximum* et *Stylosanthes guyanensis* fertilisés, non irrigués (ROOSE, 1979). Ces deux plantes fourragères à racines nombreuses et profondes consomment toute la réserve hydrique disponible mais à des rythmes différents : la légumineuse aurait une croissance plus progressive mais plus prolongée que la graminée (TALINEAU et ROOSE, 1973).

4.1.4.3. *Drainage sous forêt dense secondaire*
(Voir tableau 23 du rapport ROOSE, 1979)

Les eaux de percolation ont été recueillies à quatre profondeurs (40 à 180 cm) au fond de huit lysimètres monolithiques complètement isolés et ne comportant aucun végétal susceptible de transpirer (ou très peu).

De 1971 à 1975, le drainage a varié de 70 à 92 % des pluies (soit 1.100 à 1.700 mm) : il s'est produit toute l'année avec un maximum marqué durant la période du 15 mai au 15 juillet. Les lysimètres peu profonds se vidangent plus rapidement que les autres mais il n'y a pas de différence significative du volume drainé en fonction de la profondeur des capteurs étant donné l'hétérogénéité du milieu (interception des pluies par la frondaison) et l'absence de racines actives. Ces valeurs très élevées de drainage ne représentent évidemment pas le drainage réel sous forêt puisqu'aucune racine active ne peut pénétrer dans les lysimètres. Ces résultats indiquent seulement que l'évaporation directe du sol sous forêt dense se réduit à 14 - 27 % des précipitations (soit 200 à 400 mm/an).

La méthode lysimétrique ne peut donner d'estimation acceptable du drainage sous forêt tant qu'elle ne respecte pas l'architecture des pores et du système racinaire concentré dans les 50 premiers centimètres du sol.

4.1.4.4. *Conclusions sur le drainage mesuré en lysimètre*

Le drainage tel qu'il est mesuré au bas d'un lysimètre, est très élevé dans cette région subéquatoriale et concentré sur quelques semaines de l'année (75 % du 15 mai au 15 juillet). Il dépend du couvert végétal, de son architecture et de son développement (influence des engrais), mais si on déduit 80 % du ruissellement observé par ailleurs sur chaque culture on constate qu'il varie entre 35 et 60 % des pré-

cipitations ce qui représente 500 à plus de 1.700 mm par an. Etant donnée l'hétérogénéité du milieu (interception des pluies par le couvert végétal, redistribution au niveau des irrégularités de la surface du sol, variabilité de la perméabilité du sol en fonction du réseau racinaire, concentration localisée du ruissellement), le drainage est très variable d'un profil à un autre d'un même sol forestier. La surface de nos lysimètres étant réduite pour des raisons pratiques (0.312 m²), elle n'intègre pas la maille de l'hétérogénéité du système, de telle sorte qu'il est quelquefois difficile de faire ressortir des différences significatives entre traitements malgré quatre répétitions et des situations assez différentes.

Il est bien connu que ce genre de lysimètre ne laisse couler que les eaux libres et retient à sa base une partie des eaux sous tension qui, dans la nature draineraient lentement (RICHARDS, NEAL, RUSSEL, 1939). Il faudrait créer une succion au bas des lysimètres pour supprimer l'engorgement relatif qui y règne et qui est d'autant plus gênant que la texture du sol est fine et que le climat entraîne de fréquentes variations d'humidité à ce niveau (ce qui n'est pas le cas à Adiopodoumé). Des essais ont été mis en place à Madagascar (Manankazo) pour démontrer la théorie à l'aide de mesures neutroniques de l'humidité et tensiométriques des flux : mais en définitive, le lysimètre fermé du même type que les nôtres (prof. = 180 cm, Ø = 63 cm) a drainé plus que le sol en place. En effet, le sol est un matériau hétérogène (JORDAN *et al.*, 1978) et son comportement est quelquefois plus complexe que la théorie !

En ce qui nous concerne, connaissant les limites de cette méthode, nous constatons qu'elle nous a permis de chiffrer l'ordre de grandeur du drainage et son évolution quantitative et qualitative en fonction du

climat et de différents traitements bien tranchés pourvu que la taille du couvert et la densité de plantation soient respectées. Remarquons qu'en la matière, il n'y a pas de méthode de référence, aussi allons-nous tenter d'autres approches.

4.2. Le bilan hydrique calculé

Il est possible d'estimer le drainage à partir des données sur les précipitations, le ruissellement, l'évapotranspiration potentielle (ETP) et les variations du stock d'eau du sol. Le « drainage brut » est calculé (à l'échelle du jour, de la décade ou du mois) par différence entre la pluie et la somme du ruissellement et de l'ETP. En saison sèche, il n'y a pas de drainage possible tant que les pluies sont inférieures à la somme (Ruiss. + ETP); d'où $ETR = \text{Pluie} - \text{Ruiss.}$ En saison humide, l'ETR est voisine de l'ETP (tout au moins si le couvert végétal est bien développé) et le Drainage = $\text{Pluie} - (\text{Ruiss.} + \text{ETP})$ aux variations de l'humidité du sol près. En effet, après l'arrêt des pluies, ETR n'est pas nulle car les plantes puisent l'eau dans les réserves du sol : il faut donc ajouter à ETR les variations du stock d'eau du sol (humidité à capacité au champ — profil sec en fin saison sèche) et le soustraire au drainage brut car avant que l'eau percole, il faut ramener le profil à capacité au champ.

Avant d'aborder les résultats de ce calcul du drainage sous forêt et sous maïs, il nous faut encore préciser les données sur l'ETP et les variations du stock d'humidité du sol.

4.2.1. L'EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE

L'ETP mensuelle a été calculée par ELDIN (1971) selon la formule de TURC pour le poste d'Adiopodoumé de 1956 à 1976 (MONTENY, ELDIN, 1977).

TABLEAU VII

Evapotranspiration potentielle (mm/mois) selon la formule de TURC pour le poste d'Adiopodoumé

	JANV.	FÉV.	MARS	AVR.	MAI	JUIN	JUIL.	AOÛT	SEPT.	OCT.	NOV.	DÉC.	Total annuel
ETP moyen	109	114	130	123	115	79	83	79	82	110	116	109	1.249
St. déviation	19	13	12	10	12	11	13	7	8	14	12	19	
Maxi	135	130	147	140	129	102	103	104	98	128	137	134	1.402
Mini	67	88	105	101	95	64	62	65	71	85	88	74	1.058
ETP an. humide P = 2.775 mm	96	99	114	110	111	66	70	79	83	97	99	83	1.107
ETP 1972 an. sèche P = 1.636 mm	123	120	140	125	114	90	77	76	83	118	108	111	1.285

Il ressort du tableau VII que l'ETP annuelle est très stable autour de 1.250 mm quelles que soient les précipitations et que les variations mensuelles sont faibles, surtout en saisons humides (mai à novembre). L'ETP varie de 3.5 à 4.2 mm/jour en saison sèche et de 2.5 à 2.7 mm/jour de juin à septembre, période très peu ensoleillée.

Elle est nettement inférieure à celle qu'on observe en zone soudanienne (1.640 mm à Korhogo) et sahélienne (1.905 mm à Ouagadougou).

4.2.2. LES VARIATIONS DU STOCK D'EAU DU SOL

Toute une série de profils hydriques ont été effectués aux cases d'érosion et à la parcelle R2 (tube alu 10 m, sonde HP 310 + EC 310) en vue de déter-

miner la différence de stock d'eau du sol entre la fin de la saison humide et celle de la saison sèche.

Sous maïs et les cultures à enracinement superficiel et cycles courts, les variations du stock ne dépassent guère 50 mm : les lysimètres se remettent d'ailleurs très vite à couler après une averse de plus de 50 mm. Sous forêt dense, les variations d'humidité sont encore fortes vers 2 m de profondeur : elles diminuent nettement vers 3.2 m et s'annulent vers 5 m. Au-delà, les variations sont faibles (8 %) et peuvent s'interpréter comme correspondant à des mouvements lents des eaux de drainage à des variations de l'électronique ou des imprécisions sur le temps de comptage (BOIS, ROOSE, 1977).

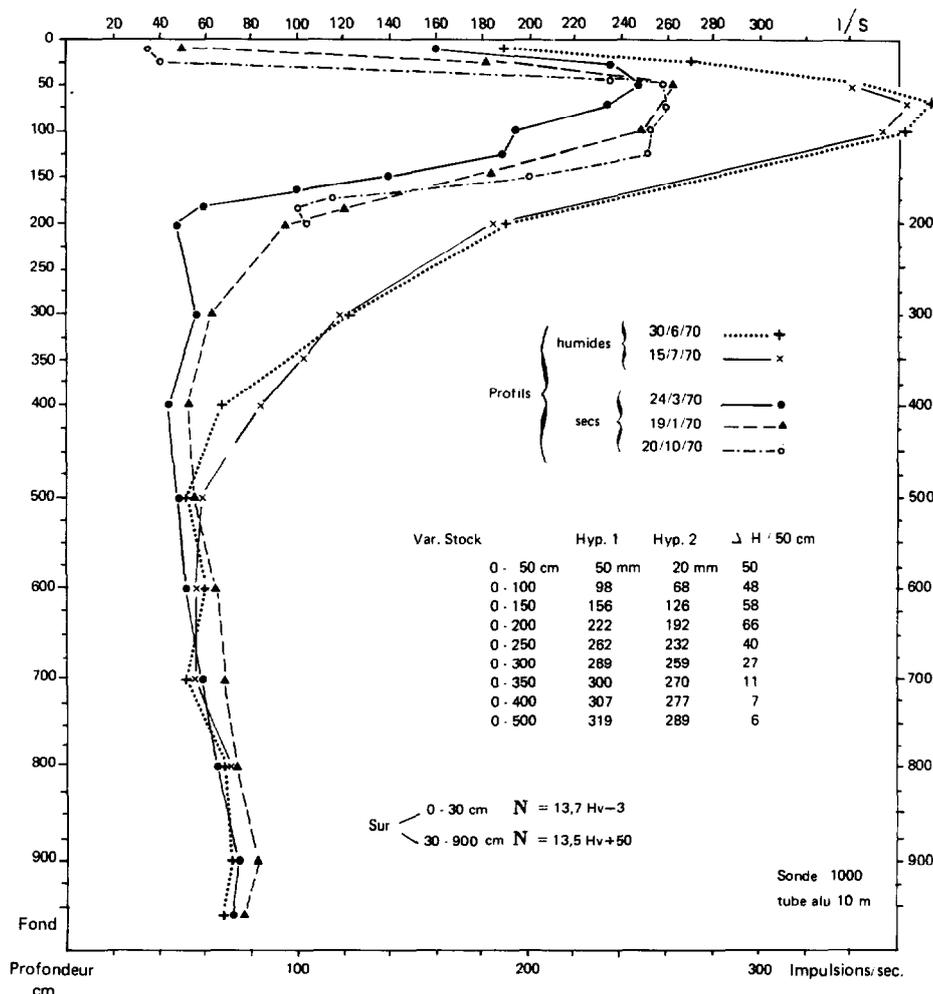


FIG. 4. — Profils hydriques sous forêt (case Erlo R₂: Adiopodoumé) - D'après les résultats d'observations à la sonde à neutrons communiqués par J.F. BOIS (mai 1979) du laboratoire des Radio-isotopes d'Adiopodoumé.

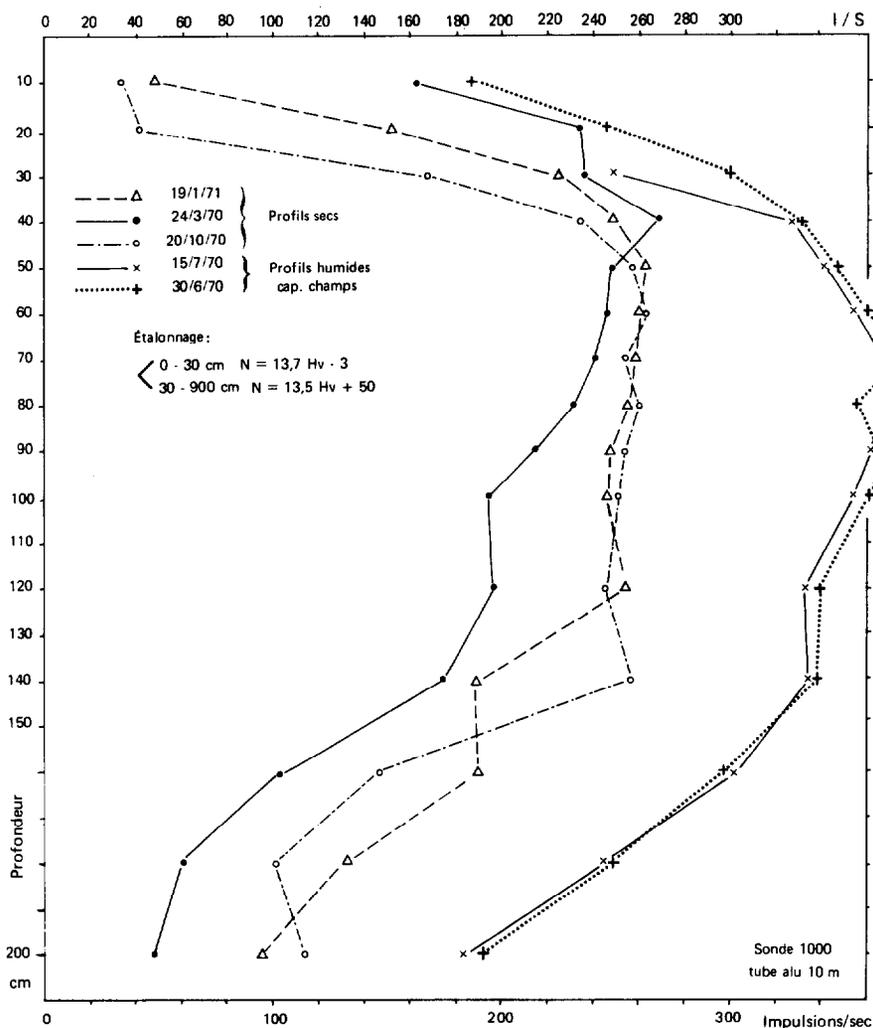


FIG. 5. — Profils humides et secs sous forêt (détails des 2 premiers mètres en R_2) - D'après les résultats communiqués par J.F. BOIS (mai 1979).

Si on limite le bilan à 2 m d'épaisseur de sol, les variations s'élèvent à environ 200 mm (192 mm si on tient compte du profil le plus sec : 24-3-70). Si on considère toute la tranche non saturée jusqu'à la nappe (tout le profil) la variation du stock doit atteindre 300 mm.

Dans la forêt du Banco, HUTTEL (1971 et 1975) a trouvé des résultats semblables sur le même type de sol; sur 232 cm de profondeur, les variations de stock d'eau s'élèvent à 199 mm sur le plateau et 213 mm dans le bas-fond colluvial.

4.2.3. ESSAI DE BILAN HYDRIQUE CALCULÉ : 1966-1975

Le bilan hydrique a été calculé à partir de données mensuelles pendant 10 ans sous forêt et 3 ans sous

mais en négligeant les variations d'humidité du sol pendant la petite saison sèche (très faibles) (voir rapport de synthèse).

L'estimation du drainage par cette méthode est correcte à 5 % près (par défaut) pour la forêt car les années considérées ont été nettement plus sèches que la normale ($P = 2.131$ mm). En 1974, année à peu près normale ($P = 2.223$ mm), le drainage a dépassé 39 % des pluies soit 870 mm. Cette méthode semble bien adaptée au cas de la forêt sempervirente dont le feuillage est toujours en état d'évapotranspirer toute l'eau disponible dans les limites de l'apport d'énergie indispensable : ETR est toujours proche de l'ETP.

Il n'en va plus de même sous maïs où l'on sou-

TABLEAU VIII

Drainage calculé à partir des données mensuelles d'observation (moyennes)

	PLUIE	ETP	Var. Stock	RUISS.	ETR corrigé (+ var. stock)	DRAINAGE corrigé (- var. stock)
FORÊT 1966-1975	1.771 mm	1.346 mm 76 %	200 mm 11 %	18 mm 1 %	1.139 mm 64.3 %	614 34.7 %
MAÏS 1973-1975	1.844 mm	1.371 mm 74 %	50 mm 3 %	428 mm 23.2 %	978 mm 53 %	438 mm 23.8 %

s'estime largement le drainage en confondant l'ETR avec l'ETP alors que le couvert n'est bien développé que pendant quelques mois de l'année. Pour la même période le drainage en lysimètre a varié de 37 à 44 % (après avoir soustrait 80 % du ruissellement). On constate que si l'ETR est importante sous forêt, le drainage est finalement plus faible sous maïs que sous forêt car le ruissellement est beaucoup plus fort. Comme la majorité du drainage et du ruissellement a lieu à la même époque, lorsque le sol est saturé, il y a compensation entre ces deux éléments du bilan. Dans le cadre de l'aménagement du territoire, il faudra

choisir entre deux risques : le ruissellement qui entraîne l'érosion et le drainage qui lixivie les éléments nutritifs du sol.

4.3. Schéma de bilan hydrique calculé en année moyenne, décennale sèche et humide

On suivra la même méthode que précédemment mais en choisissant les données mensuelles moyennes puis les données mensuelles d'une année sèche (1972) et d'une année humide (1962).

TABLEAU IX

Schéma de bilan hydrique calculé en année moyenne, décennale sèche et humide

		FORÊT DENSE HUMIDE SECONDAIRE			MAÏS FERTILISÉ		
		1972 sèche	Années moyennes	1962 humide	1972 sèche	Années moyennes	1962 humide
Précipitations mm		1.636	2.131	2.775	1.635	2.131	2.775
ETP TURC	mm	1.285	1.249	1.107	1.285	1.249	1.107
	< %	79 %	59 %	40 %	79 %	59 %	40 %
Ruiss.	mm	16.4	22	28	360	532	750
	< %	1 %	1 %	1 %	22 %	25 %	27 %
ETR corr.	mm	1.128	1.230	952	863	966	779
	< %	68.9 %	57.7 %	34.3 %	52.8 %	45.3 %	28.1 %
Drain. corr.	mm	491.6	879	1.796	413	633	1.247
	< %	30.1 %	41.3 %	64.7 %	25.2 %	29.7 %	44.9 %

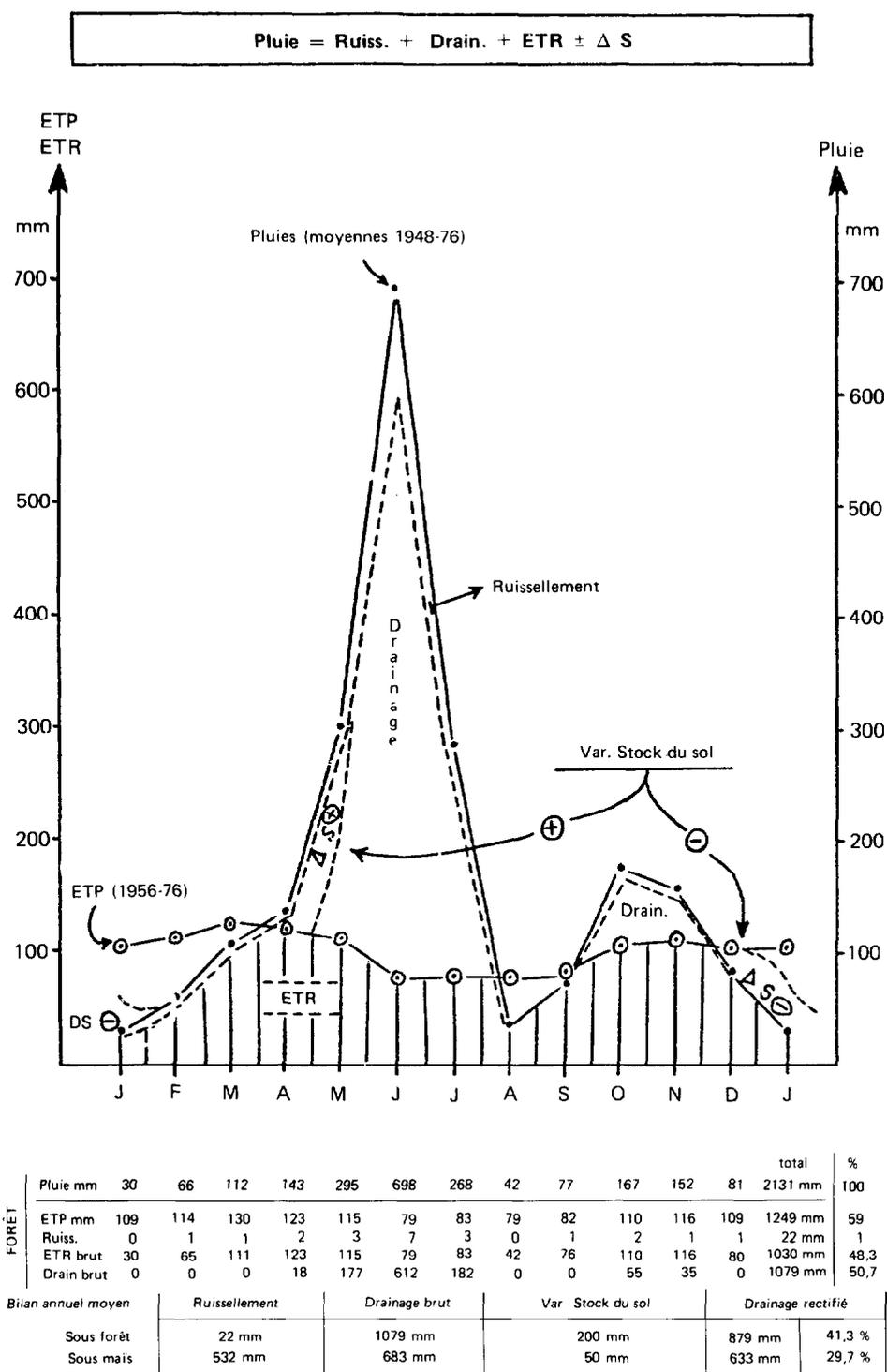


FIG. 6. — Schéma du bilan hydrique pour la région d'Abidjan. Moyennes mensuelles d'Adiopodoumé. D'après les données de pluies et ETP recueillies par MONTENY et ELDIN(1977).

Le drainage calculé à partir des moyennes mensuelles est forcément inférieur au drainage réel car cette estimation fait disparaître le drainage éventuel lors des événements pluvieux concentrés en dehors de la période la plus humide.

En moyenne, sous forêt, on peut s'attendre à un drainage de l'ordre de 880 mm pour des précipitations de 2.131 mm (soit 41,3 %). Cette lame d'eau percole au-delà de 2 m de profondeur et atteindra la nappe située 10 à 30 m en perdant encore 100 mm environ. Les horizons situés au-dessus de 2 m subiront un drainage d'autant plus fort qu'ils se rapprochent de la surface du sol (environ 1 mm de plus par centimètre) : les risques de lixiviation des bases et de lessivage des colloïdes en sont augmentés d'autant. HUTTEL (1975) a trouvé des résultats semblables dans la forêt du Banco. Il déduit de mesures neutroniques de l'humidité de 12 profils pendant 3 ans que le drainage moyen s'est élevé à 36 % pour 1.800 mm de pluie et il estime qu'il doit atteindre 40 % en année moyenne. GIRARD *et al.* (1971) rapportent que sur trois petits bassins versants de 27 à 93 km² du sud de la Côte d'Ivoire, le coefficient d'écoulement annuel fut de 27 à 32 % (donc déficit d'écoulement assimilable à l'ETR de 73 à 68 %) pour des pluies de 1.671 à 1.885 mm.

De l'année sèche à l'année humide de fréquence décennale, les précipitations augmentent de 1.140 mm, tandis que l'ETP diminue de 178 mm à peine. Sous forêt, la totalité de cet apport d'eau passe au drainage. Sous maïs, 34 % de cette eau supplémentaire ruisselle tandis que le restant percole à travers le sol : l'ETR n'a guère changé. On peut donc s'attendre à voir ces écoulements s'accroître dans les climats chauds encore plus humides.

C'est ainsi qu'en Guyane, BLANCANEAU (1979) a observé sous forêt des ruissellements de l'ordre de 17 % des pluies annuelles (3.300 mm/an) et des ruissellements maxima journaliers (KRMAX) atteignant 74 à 97 % des averses ; le drainage oblique dépasse 3 à 10 % dans une case de lessivage oblique de 24 % de pente (Crique Grégoire sur granito-gneiss). Par ailleurs, ROCHE (1979) a observé sur de petits bassins du Sinnamary (schistes de Bonidoro) des précipitations de l'ordre de 3.500 mm en 1977 dont 46 % alimentent l'évapo-transpiration, 7 à 19 % ruissellent, 6 à 8 % constituent des écoulements retardés et 40 à 27 % alimentent la nappe. Dans ces régions très humides, la somme du ruissellement et du drainage reste constante et les proportions dépendent de l'évolution du sol et de la dégradation de sa structure qui entraîne une dynamique de l'eau de plus en plus oblique en bordure de vieilles couvertures ferrallitiques (HUMBEL, 1978 ; BOULET *et al.*, 1978).

Au Gabon, COLLINET (1971) a observé sur un ver-

sant forestier de 15 % de pente, un ruissellement moyen de 5,4 % des pluies (3.830 mm en 1970) et un drainage oblique de l'ordre de 1 % du bilan annuel sur un sol ferrallitique très désaturé appauvri modal sur calcaire fin de la région de Libreville ; l'ETP ne dépasse guère 1.640 mm, le drainage doit être voisin de 1.800 à 2.000 mm.

La dynamique verticale des sols ferrallitiques dans ces régions forestières très humides est donc très active ; mais si la structure du sol se dégrade, il se produit une augmentation notable du ruissellement hypodermique et de surface, même sous forêt. Sous culture, cette évolution de la dynamique de l'eau s'accélère car les horizons profonds deviennent compacts et il se forme souvent des pellicules de battance, une fois détruite la litière et le réseau racinaire forestier.

Cependant, la dynamique verticale de l'eau reste dominante. Elle est quasi exclusive sur les plateaux et sommets de croupes et d'autant plus partagés avec la dynamique oblique qu'on se rapproche du bas des versants.

CONCLUSIONS SUR L'ÉROSION ET LE BILAN HYDRIQUE

Les observations effectuées pendant douze années sur le terrain ont permis de quantifier différents moteurs de la pédogenèse actuelle en milieu subéquatorial forestier ou cultivé.

Le climat subéquatorial avec ses pluies abondantes et concentrées sur deux mois de l'année, est très agressif. Le sol étant très perméable dans son ensemble, mais sujet à la battance, très désaturé mais peu apte à retenir les nutriments, les risques d'érosion, de lessivage des colloïdes et de lixiviation des solubles sont donc fort élevés.

En réalité, sous forêt, le ruissellement et l'érosion sont toujours restés modestes quelle que soit la pente. Le drainage oblique est quasi inexistant dans la partie supérieure du profil en dehors des versants exceptionnellement pentus (65 %). L'évapotranspiration réelle reste voisine de l'ETP presque toute l'année. Le moteur de la pédogenèse est sans doute le drainage vertical lequel varie de 400 à 1.700 mm en fonction des précipitations.

Sous une culture extensive de maïs, qui couvre mal le sol, le ruissellement est 50 fois plus abondant (25 %) et l'érosion près de 1.000 fois plus élevée que sous forêt. L'importance du drainage sera donc quelque peu masquée par les phénomènes d'érosion.

Pour conclure sur la dynamique des sols, il faut

encore préciser les charges solubles et solides des flux liquides dont nous avons parlé. Ce sera l'objectif de la deuxième partie de cette étude qui abordera le bilan des transferts de matières et ses conséquences sur les

phénomènes d'appauvrissement en particules fines des horizons superficiels, la lixiviation des solubles et le lessivage des colloïdes.

Manuscrit reçu au service des Publications de l'ORSTOM, le 8 février 1980.

La bibliographie de l'ensemble de l'étude est reportée à la fin de la seconde partie pour éviter les répétitions.