

## CYCLES BIOGÉOCHIMIQUES COMPARÉS DE QUELQUES ÉLÉMENTS CHIMIQUES (Ca, Mg, K, Na, Si, Cl, S) DANS DIVERS ÉCOSYSTÈMES A VÉGÉTATION NATURELLE D'AFRIQUE OCCIDENTALE

François LELONG\* et Eric ROOSE\*\*

**RÉSUMÉ** — Dans le cadre d'un vaste programme de recherche mené par l'ORSTOM sur l'évolution actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique de l'Ouest, plusieurs milliers d'échantillons de pluies, de pluviolessivats, d'eaux de ruissellement et de drainage ont été analysés pendant 4 à 11 ans d'expérimentation sur le terrain. Huit stations représentatives de différentes conditions bioclimatiques (subéquatoriales à tropicales sèches) ont été étudiées au moyen de parcelles expérimentales de 100 à 200 m<sup>2</sup> équipées comme suit : pluviographes, lysimètres, cases de ruissellement et de drainage oblique. Ces équipements permettent d'évaluer les divers écoulements superficiels et souterrains et de mesurer les charges en solution et solide qu'ils transportent. Certains transports d'origine biologique ont également été évalués.

Des bilans géochimiques ont été établis en quantifiant les entrées et les sorties de matières minérales et organiques pour chaque « *pedosystème* » (volume de terrain comprenant la tranche supérieure de 2 m, le sol et sa végétation, délimitée par le contour de la parcelle). Certains transferts internes, à l'intérieur de chaque *pedosystème*, ont été également estimés.

On a reporté dans cette note les résultats obtenus relatifs à trois stations représentatives des climats subéquatorial (Adiopodoumé, près d'Abidjan), tropical de transition (Korhogo, Nord Côte-d'Ivoire) et tropical pur (Saria, près de Ouagadougou, Haute-Volta), avec leur couvert végétal naturel ; les résultats permettent de schématiser les cycles biogéochimiques de quelques éléments chimiques (Ca, Mg, K, Na, Si, Cl, S) de la façon suivante : (1) les bilans de matières entrée-sortie sont, dans ces *pedosystèmes* à végétation naturelle, sensiblement équilibrés (sauf pour Si) ; (2) les pertes ont essentiellement lieu sous forme chimique (sauf pour Si qui est entraîné en majorité à l'état particulaire) avec les eaux de drainage ; (3) les pertes latérales par érosion superficielle, dues aux eaux de ruissellement, sont faibles et souvent négligeables par rapport aux pertes verticales par lixiviation et lessivage, dues aux eaux de drainage ; (4) les flux de matières internes à chaque *pedosystème* (cycles internes) — liés à l'activité biologique (pluviolessivats, retombées végétales, remontées de terre par la mésofaune ...) — sont nettement supérieurs aux pertes de matière pour K, Ca, Mg et Si, éléments fortement engagés dans les processus biologiques.

Parcelle expérimentale, Erosion, Altération, Bilan géochimique, Cycle biogéochimique, Evolution du sol, Sols ferrallitiques, Sols ferrugineux tropicaux, Afrique de l'Ouest, Zone intertropicale

### Biogeochemical cycles of several elements (Ca, Mg, K, Na, Si, Cl, S) in different natural terrestrial ecosystems of West Africa

**ABSTRACT** — In connection with a large research program conducted by ORSTOM about the *present day evolution* of ferrallitic and ferruginous soils of West Africa, several thousand samples of rainfall, throughfall, runoff, and drainage waters have been analyzed during 4 to 11 years of field observations. Eight stations representative of different bioclimatic conditions (subequatorial to dry tropical) have been tested on experimental plots (100 - 200 m<sup>2</sup>), with the following equipment : rain gauge, lysimeters, runoff and oblique drainage plots. This equipment permits evaluating water flows and determining dissolved and solid transports in the experimental plots. Some biological transports have been also evaluated.

Geochemical budgets have been established in quantifying the inputs and outputs of organic and inorganic matters in each *pedosystem*. The « *pedosystem* » is defined as the 2 m depth soil section, with the vegetation above it, extending all over the 100 - 200 m<sup>2</sup> surface of the experimental plot.

In this work are reported the results which have been obtained for three stations, representative of subequatorial, transitional tropical and pure tropical climate (Adiopodoumé near Abidjan, Ivory Coast ; Korhogo, Northern Ivory Coast ; and Saria, near Ouagadougou, Haute-Volta, respectively), with their natural vegetation. These results permit to establish schematic biogeochemical cycle of several elements (Ca, Mg, K, Na, Si, Cl, S), as follows : (1) the inputs-outputs budgets are approximately balanced (except for Si) in these terrestrial natural *pedosystems* ; (2) the outputs correspond principally to solute transports (except for Si) by drainage waters ; (3) the lateral outputs related to runoff waters (surface erosion) are low and often negligible in comparison with vertical outputs, related to soil drainage

\* Laboratoire d'Hydrogéologie, Université d'Orléans, 45046 Orléans Cedex, France.

\*\* ORSTOM, 24 rue Bayard, 75008 Paris, France.

ORSTOM Fonds Documentaire

N° : 25889 M  
EX 1

Cote : B

waters (lixiviation and leaching) ; (4) the internal cycle fluxes, related to biological activity (through falls, vegetal falls, mesofauna reworking ...) are clearly more intense for the biophiles elements, K, Ca and Mg and Si than the input (or output) fluxes.

Experimental plot, Erosion, Chemical weathering, Geochemical budget, Biogeochemical cycle, Soil dynamics, Ferrallitic soils, Tropical ferruginous soil, West Africa, Intertropical area

## INTRODUCTION

Développée par RANKAMA et SAHAMA (1950) pour expliquer la distribution des éléments chimiques dans les diverses couches du globe (atmosphère, hydrosphère, couches sédimentaires, roches ignées, magmas), la notion de cycle géochimique a été restreinte et progressivement affinée en géochimie de surface pour décrire en termes quantitatifs la dynamique des éléments lors des processus exogènes : altération météorique, érosion, formation de roches sédimentaires. L'importance des phénomènes biologiques dans cette partie du cycle géochimique général a justifié l'introduction de la notion de cycle biogéochimique (ODUM, 1959 ; DUVIGNAUD, 1971 et 1972 ; DUCHAUFOR, 1977).

Pour les éléments chimiques sans phase gazeuse à température normale, les transferts ont lieu, essentiellement, à l'état solide ou en solution, sous l'action du vecteur eau ; on peut alors déterminer leurs cycles biogéochimiques par des mesures de transport de matière, à l'échelle de systèmes naturels de drainage tels les bassins versants où la quasi-totalité des exportations de matière transite par un exutoire unique. C'est en suivant cette voie que les géologues et géochimistes ont pu établir des bilans de matières « entrées-sorties », et chiffrer les pertes ou les gains de différents éléments au cours du transit dans les bassins (CLEAVES *et al.*, 1970 ; CLARIDGE, 1970 ; LIKENS *et al.*, 1977 ; FELLER et KIMMINS, 1979) ; ces bilans permettent d'évaluer l'importance de l'altération ou de l'accumulation de matière, et d'étudier leurs variations en relation avec les conditions lithologiques et bioclimatiques. Les biologistes s'intéressent de leur côté à l'évaluation des cycles internes de matières, à l'intérieur des écosystèmes (prélèvements par la végétation, retombées par les litières, pluviolésivats ..., voir par exemple REICHLER, 1981), à partir de mesures ou expérimentations sur parcelles expérimentales de petites dimensions (quelques m<sup>2</sup> à quelques centaines de m<sup>2</sup>).

Mais ces approches, menées sur des terrains différents à des échelles très distinctes (bassin-versant, parcelle) et ne portant pas toujours sur les mêmes éléments chimiques, peuvent rarement faire l'objet d'une synthèse ; s'il est probable que les quantités de matières impliquées dans les cycles internes sont relativement élevées par rapport aux flux entrant et sortant (MEYBECK, 1983), la quantification de ces flux, écosystème par écosystème, reste à faire ; pour cela les mesures effectuées à l'échelle de bassins-versants sont souvent mal adaptées, car à l'échelle de ces bassins il est rare d'avoir des unités écologiques à sol-végétation-topographie homogène.

A l'occasion d'un vaste programme sur l'évolution pédologique actuelle de sols d'Afrique de l'Ouest, mené pendant plus de dix ans par l'Office de Recherche Scientifique et Technique Outre Mer (ORSTOM) avec la collaboration des Instituts du Groupement d'Etudes et de Recherches pour le Développement de l'Agriculture Tropicale (GERDAT), de très nombreuses mesures hydrologiques et analyses hydrochimiques ont été effectuées sur diverses parcelles expérimentales choisies pour représenter des types de sol et de végétation bien représentatifs de cette région et pour préciser l'influence de l'utilisation du sol (végétation naturelle ou mise en culture) sur la dynamique des transports. Les abondantes données recueillies à cette occasion permettent d'esquisser dans le présent travail des schémas de cycles biogéochimiques relatifs à des unités écologiques peu ou pas perturbées (végétation proche de la végétation naturelle), caractérisées par des conditions de sol-végétation-topographie homogènes.

## I — CONDITIONS DE TERRAIN

Trois stations expérimentales, représentatives de divers types d'écosystèmes terrestres de la zone intertropicale, ont été choisies parmi celles étudiées entre 1964 et 1975 par l'ORSTOM pour illustrer trois contextes bioclimatiques représentatifs de l'Afrique de l'Ouest : la station ORSTOM d'Adiopodoumé, située dans la zone subéquatoriale forestière près d'Abidjan (Côte-d'Ivoire) (photo 1) ; la station de Korhogo, située dans la zone tropicale de transition au Nord de la Côte-d'Ivoire ; la station de Saria, gérée par l'IRAT, située dans la zone tropicale sèche, près de Ouagadougou (Haute-Volta) (photo 2).

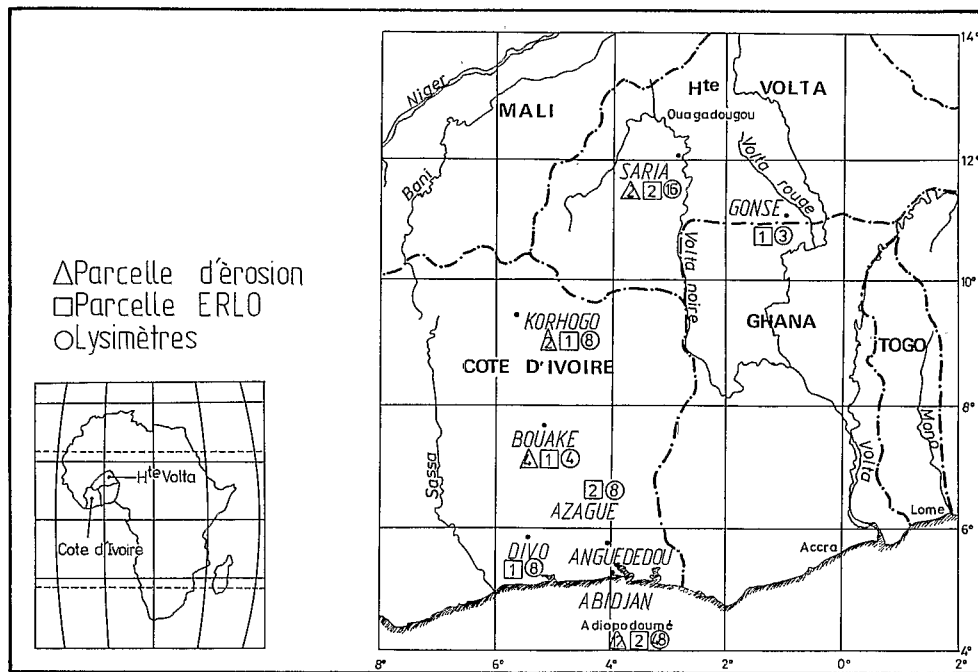


Photo 1 — Parcelle expérimentale en forêt équatoriale ; station d'Adiopodoumé (Côte-d'Ivoire). Noter : la forêt dense humide secondarisée ; la litière de feuilles et la végétation basse, qui protègent le sol contre l'érosion.  
*Experimental plot in equatorial forest, at Adiopodoumé (Ivory Coast). Note the vegetal litter and the small vegetation which protects the soil against erosion.*

Photo E. Roose

La localisation de ces stations et des autres stations étudiées par l'ORSTOM est indiquée sur la figure 1 ; les caractéristiques écologiques — climat, végétation naturelle, géomorphologie, sols, roche-mère — des trois stations considérées ici sont résumées sur le tableau I.

Les sols de ces stations appartiennent à deux groupes : dans la zone équatoriale et tropicale humide, il s'agit de sols ferrallitiques profonds à faible différenciation morphologique verticale ; dans la zone tropicale sèche, il



Les organismes de recherche ayant participé à ce programme sont : (1) station de Gonsé : Centre Technique Forestier Tropical (CTFT) ; (2) stations de Saria et de Bouaké : Institut de Recherches Agronomiques Tropicales (IRAT) ; (3) station de Divo : Institut Français du Cacao et du Café (IFCC) ; (4) station d'Anguédou : Institut de Recherche sur le Caoutchouc (IRCA). Les chiffres inscrits dans les figures indiquent le nombre de parcelles de mesures de chaque station.

Fig. 1 — Localisation géographique des stations expérimentales et liste des organismes coopérants.

*Location of the experimented stations and list of the cooperating organisms.*

s'agit de sols ferrugineux tropicaux moins épais et à profil vertical contrasté (horizon A sableux, horizon B argilo-sableux-graveleux plus ou moins cuirassé, horizon C à altérites argileuses). Tous ces sols dérivent de vieilles couvertures d'altération très pauvres en espèces minéralogiques (altérites à quartz, kaolinite et oxyhydroxydes de fer) ; leur composition chimique et minéralogique est très voisine mais les propriétés physiques (texture, structure) et le comportement hydrologique des horizons de surface en particulier diffèrent sensiblement en fonction des caractères bioclimatiques actuels.

## II — MÉTHODES ET RÉSULTATS BRUTS

### 1. Le dispositif expérimental de mesures

Les stations expérimentales consistent en des parcelles bien circonscrites de quelques centaines de m<sup>2</sup> de

Photo 2 — Parcelle expérimentale en savane tropicale ; station de Saria (Haute-Volta). Noter : le nombre réduit d'arbres (savane arborée dégradée) ; l'importance du couvert végétal de graminées (parcelle mise en jachère et protégée contre les feux de brousse).  
*Experimental plot in tropical savannah at Saria (Upper Volta). Note the low development of trees and the high importance of graminaceous plants.*

Photo 3 — Parcelle ERLO (mesure de l'Erosion, du Ruissellement et du Lessivage Oblique) ; station de Divo (Côte-d'Ivoire). La photo montre à l'aval de la parcelle expérimentale la fosse de mesures avec la gouttière superficielle recueillant les eaux de ruissellement et quatre gouttières souterraines recueillant les eaux de drainage oblique.  
*ERLO plot (for measuring Erosion, Runoff and Oblique Lessivage) ; at Divo (Ivory Coast). The vertical plane of the trench shows one surface gutter for collecting overland flows and four underground for collecting oblique drainage waters.*

Photos E. Roose

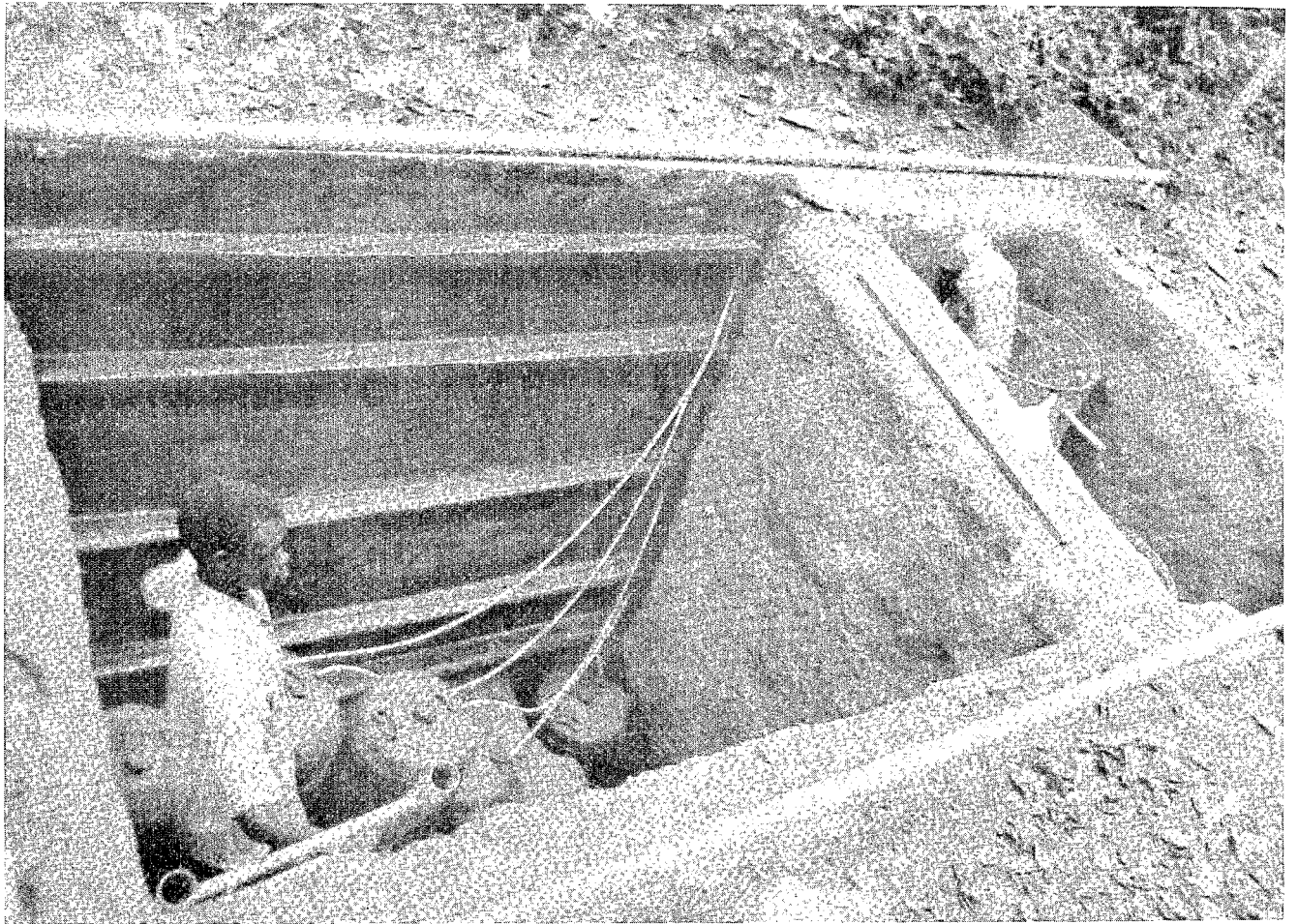
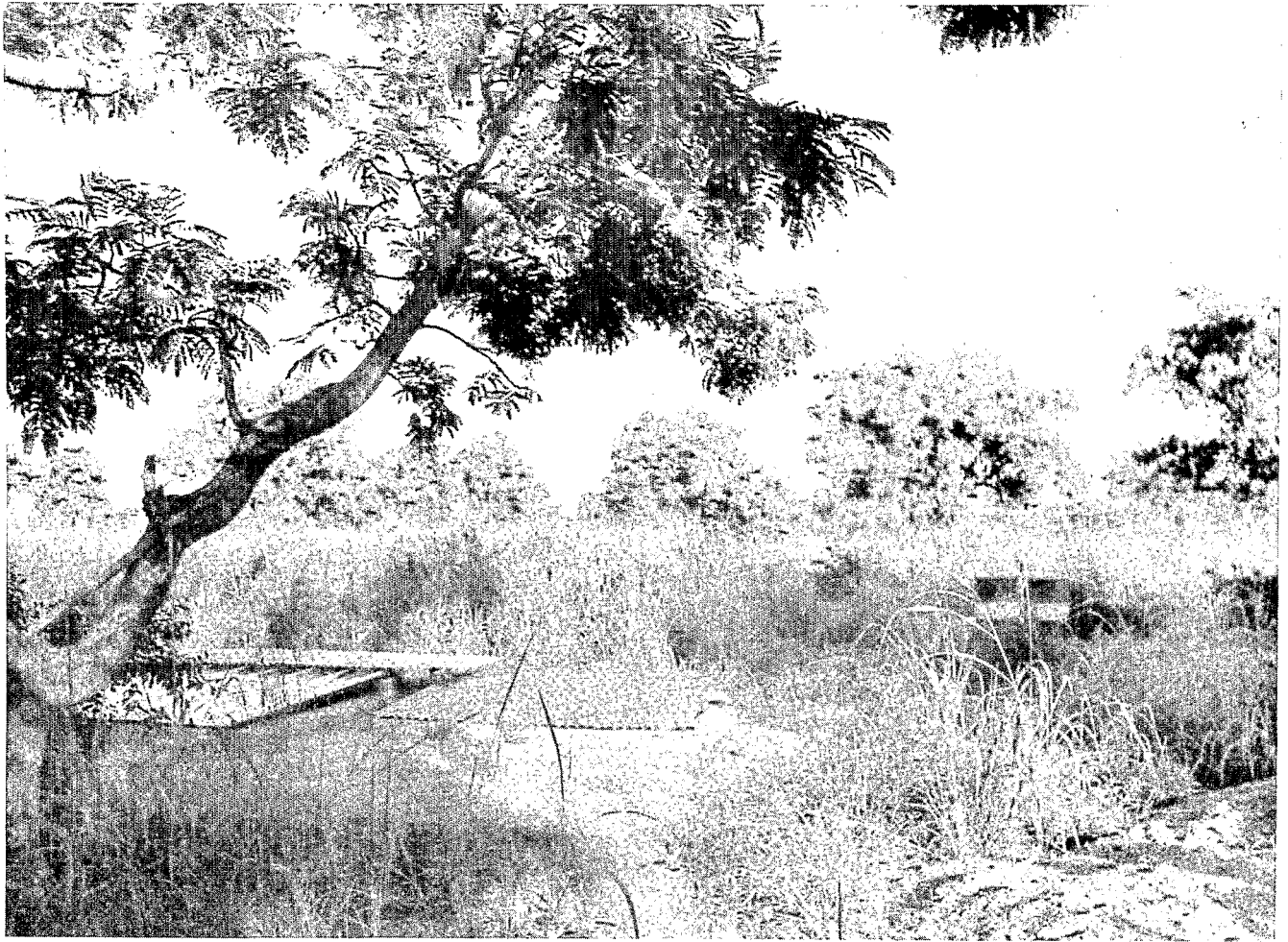


Tableau I  
*Caractéristiques écologiques des stations étudiées*  
*Les résultats reportés ici concernent seulement les stations d'Adiopodoumé, de Korhogo et de Saria*  
 Ecological characterization of the experimental stations  
 The results concerning only three stations, Adiopodoumé, Korhogo and Saria are reported in this work

Stations	Adiopodoumé	Anguédégou	Azaguie	Divo	Bouaké	Korhogo	Saria	Gonsé
Climat	----- Subéquatorial (deux saisons de pluies) -----					Tropical de transition		Tropical pur
. Pluies (mm)	2,150	2,100	1,750	1,550	1,200	1,350	830	860
. E.T.P. (mm)	1,250	1,300	1,314	1,280	1,300	1,660	1,885	1,905
. Indice d'érosivité (Wichmeier, 1962)	1,260	1,000	885	825	512	676	450	430
. Température °C	26°2	26°2	26°2	26°0	26°1	27°0	28°0	28°1
Végétation	----- Forêt dense humide ----- ----- sempervirente -----				semi décidue	Savane arborée Guinéo-soudanienne		Savane arbustive Soudano-sahélienne
Forme du paysage	--- Plateau incisé ---		Collines en lanières	Larges croupes		Relief rési- duel et long glacis	Relief résiduel et très long glacis	
. inclinaison des pentes	jusqu'à 65 %	jusqu'à 39 %	14 %	10 %	4 %	3 %	0,7 %	0,5 %
. longueur des pentes	20-500 m	100-500 m	180 m	300 m	700 m	750-1000 m	2000 m	3000 m
Sols	Ferrallitiques très désaturés			Ferrallitiques moyennement désaturés			Ferrugineux tropicaux	
Roche-mère	Sables argileux (conti- nental terminal)		Schistes chloriteux	Granites	Granites (filons de pegmatites)	Granites (filons de quartz)	Granites	
	----- Mio-pliocène -----				Précambrien			

surface, implantées à mi-pente de versant ; chacune délimite un « pédosystème » à sol-végétation-topographie homogènes. L'équipement des stations permet de quantifier les apports des précipitations, du pluviollessivage à travers la strate végétale, et les volumes d'eau écoulés (eaux de ruissellement, eaux de drainage vertical, eaux de drainage oblique).

*Les précipitations* ont été mesurées à l'aide de pluviomètres et de pluviographes à augets basculants (CERF), à bague de 400 cm<sup>2</sup>, installés à 150 cm du sol, à l'écart de l'influence de la végétation.

*Le pluviollessivage* a été capté au-dessus du sol sous les frondaisons des arbres, dans des entonnoirs fixés sur des bouteilles en plastique, ou sous la végétation basse, dans des bâches en plastique posées à même le sol.

*Le ruissellement* a été collecté, avec les matières solubles et solides qu'il transporte, sur des parcelles d'érosion de 100 à 300 m<sup>2</sup>, de forme rectangulaire, délimitées à l'amont et latéralement par des tôles fichées en terre ; les eaux de ruissellement sont recueillies à l'aval par une gouttière, puis dans une cuve de décantation installée en contrebas dans une fosse ; les matières solides s'y déposent et un système de partiteurs permet d'échantillonner une proportion donnée des volumes écoulés (FOURNIER, 1954 ; ROOSE, 1980).

*Le drainage vertical* fut recueilli dans des lysimètres de 63 cm de diamètre et de 40 à 180 cm de profondeur, isolant des colonnes de terre non remaniée (ROOSE et des TUREAUX, 1970).

*Le drainage oblique* a été capté à l'aval de parcelles ERLO, grâce à un système de gouttières enfoncées à quatre profondeurs différentes dans la paroi de la fosse délimitant la partie aval de la parcelle entre la surface du sol et 2 m de profondeur, comme le montre la photo 3 (ROOSE, 1967).

On a déterminé aussi les variations saisonnières d'humidité des profils de sols au moyen de profils hydriques, établis à la sonde à neutrons ou à partir d'échantillons prélevés à la tarière, à différentes saisons (BOIS et ROOSE, 1978).

Dans chaque station, on a ainsi équipé en parallèle deux ou plusieurs parcelles expérimentales, représentant le milieu originel avec sa végétation naturelle (forêt, savane ...) ou le milieu aménagé (cultures de maïs, sorgho ...), en vue de préciser l'impact de la mise en culture sur l'évolution actuelle du sol. Il faut noter que les parcelles « naturelles » de Saria ne portent pas une végétation de savane primaire, mais correspondent à d'anciens champs de culture, presque totalement déboisés et laissés à l'état de jachères.

Les « pédosystèmes » considérés dans ce travail peuvent donc être définis comme des tranches de sol de 2 m d'épaisseur (limite de pénétration de la majorité des racines), avec leur végétation, de surface égale à la surface des parcelles expérimentales (200 à 300 m<sup>2</sup>). A l'échelle d'un tel pédosystème, on intègre les hétérogénéités ponctuelles dues à la structure pédologique, tout en individualisant des *unités sol-végétation-topographie homogènes*, ce qui est rarement possible à l'échelle d'un bassin versant. La situation des parcelles à mi-pente est la plus représentative des conditions topographiques dominantes dans les toposéquences de sol. Le suivi de ces parcelles expérimentales a duré de 4 à 11 ans, selon les stations, durée nécessaire pour que les perturbations temporaires apportées par l'installation du dispositif expérimental disparaissent.

## 2. Etablissement des bilans hydriques

Les mesures de drainage dans les lysimètres n'ont pas toujours donné (sauf sous cultures, prairies et savanes dépourvues de végétation arborée) de résultats quantitatifs satisfaisants par suite de l'hétérogénéité des pluies sous le couvert forestier ou par suite de la non prise en compte dans ces lysimètres de l'évapo-transpiration due à la grande végétation. De plus, les mesures ont été faites entre 1964 et 1975, selon les stations, pendant des années où les pluies furent le plus souvent fortement déficitaires par rapport à la normale. Pour obtenir des bilans hydriques moyens, on a donc dû estimer par le calcul des valeurs du drainage profond D (au-delà de 1,80 m de profondeur), à partir de l'ETP calculé d'après la formule de TURC (1961) et des valeurs mesurées des précipitations P et du ruissellement R, suivant la formule générale :

$$P = R + ETR + D + \Delta r$$

$\Delta r$  représentant les variations saisonnières de la réserve hydrique du sol.

Le calcul est effectué avec un pas de temps mensuel : en période sèche  $ETP > P$ ,  $ETR = P - R$ , il n'y a pas de drainage profond, conformément aux observations ; en période humide, on admet que  $ETR = ETP$  et le drainage brut  $D = P - (R + ETP)$ .

Tableau II  
Bilans hydriques calculés sur des parcelles à végétation naturelle pour des années pluviométriques moyennes, excédentaires (fréquence 1/10) et déficitaires (fréquence 1/10) en trois stations expérimentales d'Afrique de l'Ouest

Hydric budget calculated in plots with natural vegetation for mean rainfall year, excess rainfall year (frequency 1/10) and deficit rainfall year (frequency 1/10) at three experimental stations of West Africa

	Pluies	E.T.P.	Ruissel- lement		E.T.R.		Drainage	
	mm	mm	mm	%	mm	%	mm	%
<u>ADIOPODOUME</u>								
Année à pluies déficitaires (1/10)	1636	1285	16	1	1128	69	492	30
Année à pluies moyennes	2131	1429	22	1	1230	58	879	41
Année à pluies excédentaires (1/10)	2776	1107	28	1	952	34	1796	65
<u>KORHOGO</u>								
Année à pluie déficitaires (1/10)	1004	1751	20	2	828	82	156	15
Année à pluies moyennes	1353	1660	41	3	1064	79	248	18
Année à pluies excédentaires (1/10)	1723	1643	86	5	1169	68	468	27
<u>SARIA</u>								
Année à pluies déficitaires (1/10)	617	2096	25	4	572	93	20	3
Année à pluies moyennes	826	1905	41	5	649	78	136	17
Année à pluies excédentaires (1/10)	1076	1713	86	8	586	54	404	38

Les valeurs brutes de ETR et D ainsi obtenues ont été corrigées (tabl. II) pour tenir compte des variations saisonnières de réserve hydrique du sol : le pompage des réserves par les racines en saison sèche ajoute un terme complémentaire à l'ETR ; le déficit d'humidité ainsi créé dans le sol doit être compensé par les premiers apports de pluie avant la reprise du drainage profond, ce qui diminue celui-ci d'autant.

La comparaison des bilans hydriques annuels ainsi calculés (en sommant les bilans mensuels) et des bilans mesurés montre un écart inférieur à 10 % ; le drainage calculé semble légèrement sous-estimé par le calcul à pas de temps mensuel. Cette approximation est cependant acceptable dans la mesure où l'on vise une analyse comparative de systèmes bioclimatologiquement très contrastés. On voit sur le tableau II que le ruissellement ne représente qu'une faible part des bilans hydriques, que le drainage profond diminue régulièrement avec les hauteurs de précipitations du Sud au Nord et qu'il devient négligeable pour des pluies annuelles de 600 à 700 mm.

### 3. Analyse des charges solides et en solution dans les différentes eaux

A chaque averse, des volumes de pluie, de pluviolessivats, de ruissellement, de drainage vertical et oblique ont été recueillis. Les échantillons correspondant à chaque catégorie d'eau représentent : les pluies cumulées de chaque averse, les pluviolessivats correspondants, une fraction représentative (séparée par le système de partiteurs) des volumes ruisselés sur les parcelles d'érosion, ainsi que les matières solides entraînées par le ruissellement, et la totalité de l'eau de drainage vertical recueillie dans les lysimètres et de drainage oblique collectée à l'aval des parcelles ERLO.

Les échantillons d'eau, prélevés dans des bouteilles en plastique préalablement rincées avec l'eau à analyser, remplies à ras bord, ont été conservés à l'abri de la lumière et transportés au laboratoire pour analyse aussi rapidement que possible (un jour à huit semaines selon l'éloignement de la station). Au total, plus de 2000 échantillons ont été soumis à l'analyse (16 dosages ou mesures par échantillon). Après une filtration rapide des échantillons servant à éliminer les flottants, on a procédé à l'analyse des charges en solution et des charges solides de chaque catégorie d'eau.

Les charges en solution ont été dosées à partir d'un faible volume aliquote (1000 ml environ) après filtration (filtre 0,45  $\mu$ m). Les paramètres analysés, outre le pH et la résistivité, sont : les cations majeurs Ca, Mg, K, Na,  $\text{NH}_4$ , les anions majeurs  $\text{SO}_4$ , Cl,  $\text{NO}_3$ , parfois  $\text{HCO}_3$ , les nutriments azote total, carbone organique,  $\text{PO}_4$  total, les sesquioxides Fe, Al,  $\text{SiO}_2$ . Les méthodes utilisées sont celles décrites par NALOVIC (1968) puis GOUZY (1973). Les concentrations en solution dans les diverses catégories d'eau analysées sont données dans les tableaux III a, b et c. Il s'agit de concentrations moyennes annuelles pondérées par les volumes, pour tenir compte des relations débits-concentrations existant pour certains éléments et limiter les erreurs dans les calculs de flux annuels (produits des hauteurs d'eau par les concentrations pondérées par les volumes, voir ROOSE, 1980). On voit que ces concentrations restent faibles et qu'elles augmentent régulièrement en suivant le transit de l'eau depuis l'entrée (précipitations) jusqu'à l'horizon profond (— 2 m) où le drainage inférieur a été collecté, mais qu'elles diminuent ensuite nettement (sauf pour Na et Si) entre cet horizon et la nappe d'eau qui baigne le sous-sol profond.

Les charges solides proviennent soit de l'érosion par les eaux de ruissellement à la surface du sol, soit de l'entraînement par les eaux de drainage percolant à travers le profil.

Les terres érodées comprennent des particules fines restant en suspension et des particules plus grossières (sables et agrégats, appelés terres de fond, tractés à la surface du sol), recueillies dans des cuves de décantation à

Tableau III — Concentrations moyennes annuelles pondérées par les volumes des éléments chimiques dissous dans les différentes catégories d'eau analysées pour trois stations expérimentales d'Afrique de l'Ouest.  $\text{HCO}_3^-$  est estimé en équilibrant le bilan des ions.  $\Sigma$  (anions) =  $\Sigma$  (cations). (a) station d'Adiopodoumé (forêt dense) ; (b) station de Korhogo (savane) ; (c) station de Saria (savane)

Volume balanced mean concentrations of dissolved species in different types of water for three experimental stations of West Africa.  $\text{HCO}_3^-$  is estimated from ionic balance.  $\Sigma$  (anions) =  $\Sigma$  (cations). (a) station of Adiopodoumé (dense forest) ; (b) station of Korhogo (savannah) ; (c) station of Saria (dry savannah)



(a)

	Pluies		Pluvioléssivats		Ruissellement		Drainage niveau sup.		Drainage niveau inf.		Nappe	
	ppm	meq/l	ppm	meq/l	ppm	meq/l	ppm	meq/l	ppm	meq/l	ppm	meq/l
Ca <sup>++</sup>	1,80	0,09	3,80	0,19	5,60	0,25	3,70	0,18	6,90	0,34	2,40	0,12
Mg <sup>++</sup>	0,40	0,03	2,20	0,18	2,70	0,23	1,80	0,15	5,10	0,42	0,50	0,04
K <sup>+</sup>	0,30	0,08	3,90	0,10	4,80	0,13	2,60	0,07	13,10	0,34	0,10	0,003
Na <sup>+</sup>	0,32	0,03	1,75	0,08	2,90	0,08	2,60	0,11	3,10	0,13	2,40	0,10
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0,24	0,01	0,27	0,015	0,70	0,04	0,30	0,02	0,40	0,02	0,16	0,01
Σ(C <sup>+</sup> )	-	0,24	-	0,56	-	0,76	-	0,53	-	1,25	-	0,27
SO <sub>4</sub> <sup>---</sup>	1,20	0,02	2,50	0,05	3,10	0,07	5,10	0,11	6,20	0,13	1,40	0,03
Cl <sup>-</sup>	2,10	0,06	4,90	0,14	2,80	0,09	4,40	0,12	6,60	0,19	3,90	0,11
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,26	0,04	0,74	0,01	1,17	0,02	0,77	0,01	1,60	0,03	0,17	0,003
PO <sub>4</sub> H <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0,32	0,003	0,87	0,01	2,23	0,02	0,67	0,01	0,77	0,01	1,25	0,01
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	(7,3)	0,12	(21,3)	0,35	(34,1)	0,56	(17,1)	0,28	(54,3)	0,89	(7,3)	0,12
Σ(A <sup>-</sup> )	-	0,24	-	0,56	-	0,76	-	0,53	-	1,25	-	0,27
SiO <sub>2</sub>	0,7	-	1,3	-	3,5	-	7,2	-	8,3	-	8,4	-
Organic C	1,3	-	7,4	-	11,2	-	8,7	-	8,1	-	1,0	-
Total N	1,4	-	2,5	-	4,5	-	3,3	-	3,4	-	1,6	-

(b)

	Pluies		Pluvioléssivats		Ruissellement		Drainage niveau sup.		Drainage niveau inf.		Nappe	
	ppm	meq/l	ppm	meq/l	ppm	meq/l	ppm	meq/l	ppm	meq/l	ppm	meq/l
Ca <sup>++</sup>	1,90	0,10	2,40	0,12	2,10	0,11	2,60	0,13	4,10	0,21	1,70	0,09
Mg <sup>++</sup>	0,10	0,01	0,40	0,03	0,60	0,05	0,90	0,08	1,80	0,15	0,40	0,03
K <sup>+</sup>	0,30	0,01	1,30	0,03	1,30	0,03	1,80	0,05	7,10	0,18	1,00	0,03
Na <sup>+</sup>	0,15	0,01	0,20	0,01	0,35	0,02	0,44	0,02	0,90	0,04	1,80	0,08
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0,26	0,01	0,10	0,01	0,13	0,01	0,14	0,01	0,28	0,02	0,09	0,01
Σ(C <sup>+</sup> )	-	0,14	-	0,20	-	0,22	-	0,29	-	0,60	-	0,24
SO <sub>4</sub> <sup>---</sup>	1,00	0,02	1,70	0,04	2,10	0,04	4,00	0,08	5,20	0,11	2,3	0,05
Cl <sup>-</sup>	0,30	0,01	0,80	0,02	1,30	0,04	2,50	0,07	2,50	0,07	0,3	0,01
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,48	0,01	0,91	0,01	0,20	0,003	0,25	0,003	1,00	0,02	0,03	0,0005
PO <sub>4</sub> H <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0,30	0,005	0,38	0,005	0,74	0,01	0,57	0,01	0,90	0,01	0,92	0,01
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	(6,10)	0,10	(7,9)	0,13	(7,9)	0,13	(7,9)	0,13	(23,8)	0,39	(10,4)	0,17
Σ(A <sup>-</sup> )	-	0,14	-	0,20	-	0,22	-	0,29	-	0,60	-	0,24
SiO <sub>2</sub>	0,7	-	1,4	-	3,1	-	6,8	-	6,3	-	19,2	-
Organic C	1,1	-	3,8	-	5,2	-	3,4	-	3,0	-	1,2	-
Total N	0,9	-	1,1	-	2,0	-	1,2	-	2,1	-	0,8	-

(c)

	Pluies		Pluvioléssivats		Ruissellement		Drainage niveau sup.		Drainage niveau inf.		Nappe	
	ppm	meq/l	ppm	meq/l	ppm	meq/l	ppm	meq/l	ppm	meq/l	ppm	meq/l
Ca <sup>++</sup>	2,14	0,10	2,60	0,13	2,30	0,11	7,70	0,38	-	-	3,40	0,17
Mg <sup>++</sup>	0,30	0,02	0,40	0,03	0,50	0,04	2,40	0,20	-	-	0,60	0,05
K <sup>+</sup>	0,40	0,01	1,20	0,03	1,10	0,03	2,90	0,07	-	-	1,30	0,03
Na <sup>+</sup>	0,10	0,004	0,14	0,01	0,40	0,17	4,70	0,20	-	-	6,00	0,26
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Σ(C <sup>+</sup> )	-	0,13	-	0,20	-	0,35	-	0,85	-	-	-	0,51
SO <sub>4</sub> <sup>---</sup>	1,10	0,03	1,70	0,04	2,10	0,04	3,4	0,07	-	-	1,60	0,03
Cl <sup>-</sup>	0,30	0,01	0,60	0,02	0,80	0,02	2,3	0,06	-	-	1,80	0,05
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PO <sub>4</sub> H <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0,77	0,01	0,40	0,01	0,91	0,01	0,13	0,001	-	-	0,15	0,002
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	(4,9)	0,08	(7,9)	0,13	(17,1)	0,28	(43,9)	0,72	-	-	(26,3)	0,43
Σ(A <sup>-</sup> )	-	0,13	-	0,20	-	0,35	-	0,85	-	-	-	0,51
SiO <sub>2</sub>	0,7	-	0,8	-	1,1	-	16,3	-	-	-	35,6	-
Organic C	1,3	-	3,9	-	2,5	-	1,1	-	-	-	0,7	-
Total N	0,6	-	0,6	-	1,1	-	1,9	-	-	-	1,3	-

l'aval des parcelles d'érosion ; ces deux fractions ont été pesées et analysées séparément. L'extraction des matières en suspension a été réalisée à partir de gros volumes d'eau ruisselée (200 l) par floculation avec une solution de sulfate d'alumine (2 cm<sup>3</sup> de solution à 5 % de sel par litre de suspension à floculer), siphonage de l'eau surnageante et séchage à l'étuve des sédiments fins (ROOSE, 1980).

Les particules fines extraites des eaux de drainage vertical et oblique ont été floculées de la même manière, à partir des volumes restants (0,5 à 150 l) après les prélèvements effectués pour l'analyse chimique. Etant donné les faibles quantités recueillies (quelques dizaines de grammes cumulés sur 5 ans), on n'a pu réaliser que quelques analyses minéralogiques (diffractométrie aux rayons X) et quelques dosages chimiques partiels : carbone et azote organiques, SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> amorphes extractibles dans divers réactifs spécifiques (SOUCHIER, 1980, communication écrite personnelle).

Le tableau IV présente, à titre d'exemple, les caractéristiques granulométriques et chimiques des fractions

Tableau IV

*Compositions granulométriques et chimiques moyennes des fractions de matériaux particuliers entraînés par le ruissellement à la surface du sol et, pour comparaison, du sol en place et d'édifices biologiques construits à la surface du sol (termitières).*

*Parcelle forestière d'Adiopodoumé, pente 11 %*

Mean granulometric and chemical compositions of solid materials transported by surface flows and, for comparison, of soil surface horizon and of biologically constructed edifices.  
Forested plot, 11 % slope, Adiopodoumé

NATURE ET MASSE TOTALE DES FRACTIONS SOLIDES Masse en kg.ha. <sup>-1</sup> an <sup>-1</sup>	EROSION HYDRIQUE					
	S.T.	S.S.	E.T.	SOL	E.B.	Coefficient de sélectivité
	10	40	50	0-0,7 m		
	1	2	3	4	5	6 (=3/4)
<u>Fractions granulométriques</u>						
Argiles %	14,4	50,7	43,4	11,7	15,2	3,7
Limons fins	3,4	32,0	26,3	2,6	2,7	10,1
Limons grossiers	2,1	5,1	4,5	2,0	3,2	2,2
Sables fins	19,5	10,1	12,0	23,5	39,7	0,5
Sables grossiers	60,6	2,1	13,8	60,2	39,2	0,2
<u>Fractions organiques</u>						
Carbone %	83,5	304,9	260,6	23,8	30,5	10,9
Azote	5,44	25,6	21,56	1,51	2,75	14,2
Acides humiques	1,9	29,5	23,98	2,87	4,87	8,4
Acides fulviques	4,9	30,4	25,30	2,28	8,47	11,1
<u>Cations échangeables</u>						
Ca meq/100 g	8,3	11,1	10,5	0,45	1,23	23,4
Mg	6,5	5,1	5,38	0,90	1,54	6,0
K	0,63	0,6	0,61	0,11	0,13	5,5
Na	0,18	0,5	0,44	0,03	0,05	14,5
<u>Eléments totaux</u>						
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> total %	0,87	1,77	1,59	0,71	0,60	2,2
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Olsen %	0,36	0,40	0,39	0,07	0,12	5,6
SiO <sub>2</sub> combinée %	4,7	7,6	7,0	6,2	5,8	1,13
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> total %	2,4	4,5	3,8	4,1	4,5	0,9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> total %	1,6	3,5	3,1	2,4	2,52	1,3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> libre %	1,5	-	-	1,3	1,52	-
TiO <sub>2</sub> %	0,25	0,63	0,55	0,8	0,38	0,7
Ca total meq/100 g	12,1	12,3	12,26	0,68	1,65	18,0
Mg " "	4,5	5,5	5,3	1,56	2,85	3,4
K " "	1,32	1,3	1,3	0,54	0,50	2,4
Na " "	0,50	0,6	0,58	0,42	0,26	1,4

(1) S.T. = sédiments tractés grossiers. (2) S.S. = sédiments en suspension fins. (3) E.T. = S.T. + S.S. = érosion totale. (4) sol en place entre 0 et 0,07 m. (5) E.B. = edifices biologiques. (6) coefficient de sélectivité = rapport de la teneur dans l'érosion totale sur la teneur dans le sol. Le bouclage à 100 des éléments totaux correspond approximativement au quartz non dosé.

(1) S.T. = tracted sediments. (2) S.S. = suspended sediments. (3) E.T. = S.T. + S.S. = total erosion. (4) 0 - 0.07 m soil profile. (5) E.B. = biological edifices. (6) selectivity ratio = content in total erosion/content in soil profile.

transportées par érosion mécanique pour la station d'Adiopodoumé. On remarque sur ce tableau que les sédiments entraînés par érosion et surtout la fraction en suspension sont nettement enrichis, par rapport au sol en place, en colloïdes minéraux (argiles) et organiques (carbone, azote, acides organiques ...) et en éléments minéraux nutritifs (cations échangeables, phosphore ...) qui sont liés à ces constituants. En conséquence, *le sol résiduel est appauvri sélectivement* par l'érosion de ses éléments biologiquement actifs.

#### 4. Evaluation des transferts biologiques

Les transferts biologiques visibles sont de trois natures.

*Les litières végétales* correspondent aux herbes desséchées sous savane ou aux litières de feuilles, fruits et débris de branches tombés à la surface du sol sous forêt. La production annuelle d'herbes par la savane de Saria a été évaluée à plusieurs reprises sur le terrain en saison sèche par des prélèvements dans des cadres de 1 à 4 m<sup>2</sup> (5 à 10 répétitions). La litière forestière a été recueillie chaque semaine sous une forêt voisine de la station d'Adiopodoumé, dans des cadres disposés au-dessus du sol (BERNHARD, 1970 ; HUTTEL et BERNHARD-REVERSAT, 1975).

*Les immobilisations minérales* par les cultures et *les exportations* par les récoltes ont été estimées à partir d'analyses effectuées sur des échantillons représentatifs des parcelles de mesure elles-mêmes (ROOSE, 1980).

*Les remontées de terre fine par la mésofaune.* Les masses de terre transférées au-dessus de la surface du sol par les vers de terre, millepattes, fourmis, termites, ont été évaluées par pesées (turricules et boulettes) ou par comptage et cubage (termitières) par unité de surface représentative, soit 1 à 400 m<sup>2</sup> en fonction de la taille des édifices (ROOSE, 1980). Les évaluations ont été suivies pendant plus de trois années sur les mêmes parcelles (Saria) ou réalisées en fin d'expérimentation (Adiopodoumé). Le tableau IV (colonne 5) indique la composition granulométrique et chimique des terres constituant les édifices construits par la mésofaune (station d'Adiopodoumé) ; ces terres sont elles aussi sélectivement enrichies en fractions colloïdales et organiques. Ces transferts de terre fine visibles à la surface du sol sont importants mais probablement largement inférieurs à ceux qui ont lieu à l'intérieur du profil. Ainsi LAVELLE (1975) a montré qu'une population de vers de la savane de Lamto ingérait 514 t/ha/an de terre mais ne rejetait en surface que 20 à 30 t/ha/an de terricules.

#### 5. Evaluation des stocks de matières

Les stocks de matières immobilisées dans les écosystèmes correspondent : aux éléments chimiques stockés dans les arbres ou dans les parties permanentes de la végétation et aux éléments stockés dans le sol, directement utilisables ou en réserve dans les trente premiers centimètres.

Les premiers ont été estimés pour le milieu forestier d'Adiopodoumé à partir de mesures et des résultats obtenus par HUTTEL et BERNHARD-REVERSAT (1975) dans une forêt voisine. Pour les végétations naturelles des autres stations, les données sont rares, mais à Korhogo et à Saria la strate arbustive est très dégradée sinon absente et les masses d'éléments stockés correspondantes sont faibles ou négligeables.

Les éléments stockés dans le sol ont été évalués pour la tranche superficielle du sol (0 à 0,30 m) au moyen d'analyses chimiques d'échantillons représentatifs (moyenne de 10 échantillons par horizon). Les éléments analysés sont : carbone et azote organique, phosphore total et assimilable (Olsen), bases totales et échangeables, silice totale, fer total et aluminium total. On a également évalué les teneurs en silice libre (quartz) ; cette dernière correspond au résidu pratiquement insoluble d'attaques triacides sur échantillon total de sol. Le tableau IV présente à titre d'exemple la composition de l'horizon superficiel du sol étudié à Adiopodoumé (colonne 4) ; les données complémentaires sont disponibles dans ROOSE (1980).

## III — RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les mesures hydrologiques, hydrochimiques et de transports solides faites plusieurs années successives dans les stations expérimentales permettent d'établir le *schéma de fonctionnement biogéochimique* des pédogenèses étudiées : (1) par la quantification approximative des flux de matière entrant et sortant, élément par élément, pour les éléments chimiques dont les transports ont lieu essentiellement en phase aqueuse (transports de solutés ou particulaires) ; (2) par l'évaluation des flux chimiques et solides existant à l'intérieur des pédosystèmes (« cycles internes » liés aux mouvements de l'eau et à l'activité biologique) ; (3) par la comparaison de ces flux entre eux et par rapport aux stocks contenus dans les divers compartiments des pédosystèmes.

Les résultats illustrant le fonctionnement biogéochimique sont reportés pour trois stations expérimentales choisies à titre d'exemple et représentatives respectivement de la forêt équatoriale (Adiopodoumé), de la savane tropicale (Korhogo) et de la savane sèche (Saria), dans les tableaux V, VI et VII. Les flux chiffrés en  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$  sont obtenus en multipliant les hauteurs d'eau (tirées des bilans hydriques, cf. tableau II) par les concentrations moyennes en solution pondérées par les volumes (cf. tableau III) ou solides (cf. tableaux IV et VIII).

Tableau V  
Transferts et cycles biogéochimiques des éléments, évalués dans la parcelle expérimentale d'Adiopodoumé  
Biogeochemical transfers and cycles of elements in experimental plot at Adiopodoumé,

	Lame d'eau annuelle en mm	Ca	Mg	K	Na	Cl	S	SiO <sub>2</sub>
(1) Entrées Précipitations humides (s)	2.100	38	8	6	17	44	8	15
(2) Retombées végétales								
(a) pluviollessivage (s)	1.800	68	40	70	32	88	15	23
(b) chute de litière (p)	-	68	38	59	?	?	?	100
(3) Remontées de terre par la mésofaune (p)	-	1,3	1,4	0,8	0,2	ε	ε	232
(4) Erosion superficielle								
(a) soluté (s)	10	0,6	0,3	0,5	0,2	0,3	0,1	0,4
(b) solide (p)	10	0,2	0,04	0,1	0,01	ε	ε	7
(5) Drainage (à -2 m)								
(a) soluté (s)	880	47	30	69	25	48	16	68
(b) solide (p)	880	2	1	2	0,2	ε	ε	300
(6) Ecoulement de nappe (s)	800	20	4	1	20	31	4	67
(7) Bilan hydrochimique global (entrées-sorties) = (1)-(6)		+18	+4	+5	-3	+13	+4	-52
(8) Prélèvements biologiques x = (2)-(1)		98	70	123	15	44	7	108
(9) Altération chimique y = 5 (a)-1		9	22	63	8	4	8	53
(10) Indice de recyclage biologique (8) / (6)		4,9	17,5	123	-	-	-	1,6

Les résultats sont exprimés en  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ . La végétation est une forêt humide dense. Les mesures ont été faites de 1964 à 1975.  
(s) correspond à des transports en solution, (p) à des transports particulaires

Results are expressed in  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ . The vegetation is a wet dense forest. Measurements have been made from 1964 to 1975.  
(s) corresponds to solute transports, (p) to particulate transports

Tableau VI — Transferts et cycles biogéochimiques des éléments, évalués dans la parcelle expérimentale de Korhogo. Biogeochemical transfers and cycles of elements in experimental plot at Korhogo

Les résultats sont exprimés en  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ . La végétation est une savane soudanienne dégradée. Les mesures ont été faites de 1967 à 1975.  
(s) correspond à des transports en solution, (p) à des transports particulaires. Results are expressed in  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ . The vegetation is a degraded sudanian savannah. Measurements have been made from 1967 to 1975. (s) corresponds to solute transports, (p) to particulate transports

Tableau VII — Transferts et cycles biogéochimiques des éléments, évalués dans la parcelle expérimentale de Saria. Biogeochemical transfers and cycles of elements in experimental plot at Saria

Les résultats sont exprimés en  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ . La végétation est une savane soudanienne dégradée. Les mesures ont été faites de 1971 à 1974.  
(s) correspond à des transports en solution, (p) à des transports particulaires. Results are expressed in  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ . The vegetation is a degraded sahelo-sudanian savannah. Measurements have been made from 1971 to 1974. (s) corresponds to solute transports, (p) to particulate transports

Tableau VI  
 Transferts et cycles biogéochimiques des éléments, évalués dans la parcelle expérimentale de Korhogo  
 Biogeochemical transfers and cycles of elements in experimental plot at Korhogo

	Lame d'eau annuelle en mm	Ca	Mg	K	Na	Cl	S	SiO <sub>2</sub>
(1) Entrées Précipitations humides (s)	1.350	26	1,4	4,1	2,0	4,1	4,5	9,5
(2) Retombées végétales (a) pluviollessivage (s) (b) chute de litière (p)	1.300 -	31 15	5,2 2,9	17,1 8	2,6 1	10,4 ?	7,4 ?	18,2 50
(3) Remontées de terre par la mésofaune (p)	-	4	3	8	1	ε	ε	643
(4) Erosion superficielle (a) soluté (s) (b) solide (p)	40 40	0,8 0,06	0,2 0,1	0,5 0,2	0,1 0,06	0,5 ε	0,3 ε	1,3 26
(5) Drainage (à -2 m) (a) soluté (s) (b) solide (p)	250 250	11 1,3	5,2 0,6	21 1,3	2,6 0,1	8,9 ε	5,3 ε	18 200
(6) Ecoulement de nappe (s)	250	4,2	1	2,5	4,5	0,8	1,9	48
(7) Bilan hydrochimique global (entrées-sorties) = (1)-(6)		+21,8	+0,4	+1,6	-2,5	+3,3	+2,6	-38,5
(8) Prélèvements biologiques x = (2)-(1)		20	6,7	21	1,6	6,3	2,9	59
(9) Altération chimique y = (5a)-(1)		-15	3,8	16,9	0,6	4,8	0,8	8,5
(10) Indice de recyclage biologique (8)/(6)		4,8	6,7	8,4	0,4	-	-	1,2

Tableau VII  
 Transferts et cycles biogéochimiques des éléments, évalués dans la parcelle expérimentale de Saria  
 Biogeochemical transfers and cycles of elements in experimental plot at Saria

	Lame d'eau annuelle en mm	Ca	Mg	K	Na	Cl	S	SiO <sub>2</sub>
(1) Entrées Précipitations humides (s)	860	18	2,7	3,4	1,0	3,2	4,5	5,5
(2) Retombées végétales (a) pluviollessivage (s) (b) chute de litière (p)	800 -	20,8 9,4	3,2 2,7	9,6 10,8	1,2 ?	4,0 ?	4,6 ?	6,4 2,7
(3) Remontées de terre par la mésofaune (p)	-	0,4	0,3	0,5	0,1	ε	ε	70
(4) Erosion superficielle (a) soluté (s) (b) solide (p)	40 40	1 0,4	0,2 0,2	0,5 1,2	0,2 0,2	0,3 ε	0,3 ε	0,5 40
(5) Drainage (à -2 m) (a) soluté (s) (b) solide (p)	140 140	11 0,4	3,3 0,2	3,8 0,4	6,4 0,04	3,1 ε	1,5 ε	22 60
(6) Ecoulement de nappe (s)	140	4,7	0,8	1,8	8,4	2,5	0,7	50
(7) Bilan hydrochimique global (entrées-sorties) = (1)-(6)		+13,3	+1,9	+1,6	-7,4	+0,7	+3,8	-44
(8) Prélèvements biologiques x = (2)-(1)		12,2	3,2	17	0,2	0,8	0,1	3,6
(9) Altération chimique y = (5a)-(1)		-7	0,6	0,4	5,4	-0,1	-3	+16,5
(10) Indice de recyclage biologique (8)/(6)		2,6	4	9,4	-	-	-	0,7

## 1. Remarques préalables

Avant de discuter ces résultats, il convient de préciser les hypothèses simplificatrices et les approximations qui ont été introduites dans le raisonnement et qui limitent la précision ou risquent de biaiser la valeur de certains résultats.

(a) Tout d'abord l'échelle des mesures (parcelles expérimentales de 100 à 300 m<sup>2</sup>), choisie par commodité, pour intégrer les hétérogénéités dues à la structure pédologique et pour individualiser les pédosystèmes à « sol-végétation-topographie » homogènes, ne permet pas de rendre compte de phénomènes saisissables à plus petite échelle (échelle de bassins-versants par exemple) comme l'érosion linéaire dans les ravines et les thalwegs ou comme l'alluvionnement. Le choix de l'échelle de mesures a aussi une influence sur la valeur des termes du bilan hydrologique (ROOSE *et al.*, 1983). Les cycles biogéochimiques reconstitués ici se rapportent exclusivement à des unités sol-végétation de versant, situées généralement à mi-versant, qui sont à la vérité les unités morphologiques les plus représentatives de paysages de ces régions.

(b) Les bilans de matières entrées-sorties sont faussés par l'impossibilité de mesurer certains apports ou pertes : (1) apports atmosphériques solides (poussières, aérosols) qui peuvent être importants notamment en saison sèche ; mais une partie de ceux-ci, qui sont captés provisoirement par les organes végétaux aériens, est sans doute mise en solution lors des épisodes pluvieux suivants et est donc comptabilisée comme apports en solution dans le pluviollessivage (capteurs toujours ouverts mais filtrés à l'entrée) ; (2) apports par remontées biologiques profondes, dus à l'activité des racines profondes, des vers de terre, termites ..., dont la profondeur de pénétration dans le sol dépasse (LEVEQUE, 1975 ; TROY, 1979 ; ROOSE, 1980) sûrement les 2 m fixés ici comme la limite inférieure des pédosystèmes ; (3) pertes par érosion éolienne ou par volatilisation qui peuvent être intenses, notamment en saison sèche et lors des feux de brousse (environ 80 % de l'azote et du soufre contenus dans la strate herbacée peuvent être volatilisés par les feux).

Les pertes par drainage oblique ont pu être évaluées grâce au dispositif ERLO, mais on les a comptabilisées avec les pertes par drainage vertical : en effet la lame d'eau annuelle qui s'écoule obliquement dans les sols étudiés ne représente qu'un pourcentage négligeable du bilan hydrique (moins de 0,5 % de la hauteur annuelle des précipitations) et les flux dus au drainage oblique ne majorent que de façon insignifiante les flux dus au drainage vertical.

(c) La quantification de certains transferts est imprécise.

Le lessivage vertical des particules fines (argiles, colloïdes organo-minéraux, limons, sables fins ...) par les eaux de drainage à l'intérieur des profils de sol n'est pas correctement mesurable avec des lysimètres, car un certain engorgement à la base de ceux-ci provoque probablement l'immobilisation d'une fraction des particules fines en transit. On a donc dû utiliser les dispositifs ERLO pour estimer la charge solide des eaux de drainage ; ainsi on a recueilli annuellement par hectare environ 1000 kg de particules fines à Adiopodoumé pour 880 m de drainage, soit 110 mg/l, 700 kg à Korhogo pour 250 mm de drainage, soit 270 mg/l, et 200 kg à Saria pour 140 mm de drainage, soit 140 mg/l ; mais les quantités de matières ainsi recueillies sont le plus souvent trop faibles pour effectuer la caractérisation complète de ces matières. D'après quelques analyses minéralogiques et chimiques partielles (cf. ROOSE, 1980, p. 283), on sait qu'il s'agit de produits minéraux riches en kaolinite et en carbone (5 à 10 %), en oxydes de fer et en quartz. Leur composition chimique approximative est indiquée sur le tableau VIII.

Tableau VIII  
Composition chimique approximative des matières solides fines transportées par les eaux de drainage du sol (en %)  
Approximate chemical content of fine solid materials, transported by drainage waters (in %)

Silice combinée	30 %	Azote	0,70 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25	Phosphore	0,07
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3	Calcium	0,20
Quartz	20	Magnésium	0,10
H <sub>2</sub> O combinée	12	Potassium	0,02
Carbone	7	Sodium	0,02
Total : 98,11			

Les remontées biologiques de terre (action des vers de terre, des termites ...) ont été mesurées par pesée des édifices construits en surface par ces organismes ; leur évaluation est fortement par défaut car d'après LAVELLE (1975) une faible fraction (moins du 1/25) seulement de la terre ingérée par les vers de terre est restituée en surface sous forme de turricules superficiels ; la majeure partie des terres remaniées par eux est déposée dans les fentes ou vacuoles souterraines du sol. On a aussi considéré que les remontées biologiques ainsi cubées par défaut provenaient exclusivement de la tranche de 2 m superficiels du sol, donc constituaient des cycles internes, à l'intérieur des pédosystèmes. ROOSE (1976) a pu vérifier à plusieurs reprises ce fait sur le terrain.

(d) Enfin les stocks de matières inclus dans les pédosystèmes ne sont mentionnés qu'à titre indicatif.

Les stocks du sol se rapportent à la seule tranche supérieure de celui-ci (de 0 à 0,3 m) qui est la tranche biochimiquement la plus active où la plupart des éléments nutritifs (C, N, P, bases échangeables) se trouvent concentrés. La roche-mère saine, réserve minérale pratiquement illimitée, est située à plusieurs mètres en dessous de la limite inférieure des pédosystèmes, sous des altérites très appauvries en cations.

Les stocks liés à la végétation permanente ne concernent que la partie aérienne de celle-ci. Ils sont faibles, voire négligeables, dans les savanes dégradées comme celles de Korhogo et de Saria. Les stockages de matière dans les organes souterrains (racines) sont négligés, de même que les recyclages provoqués par la dégradation de ces organes.

## 2. Bilans hydrochimiques globaux « entrées-sorties »

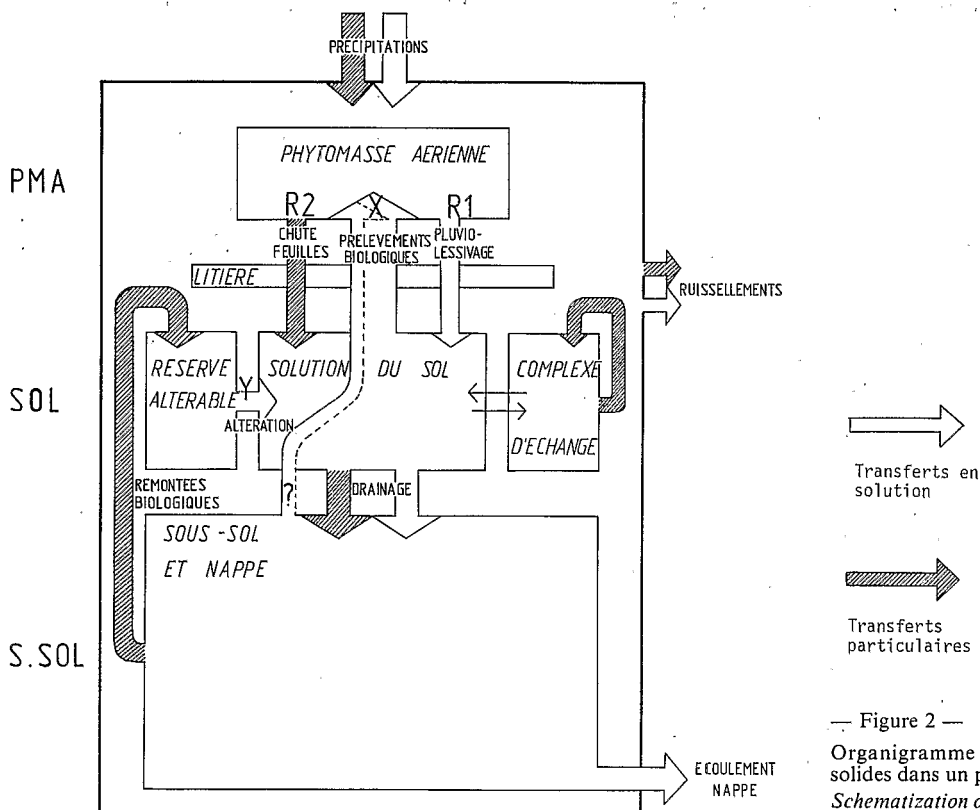
La ligne (7) de ces tableaux donne les valeurs des *bilans hydrochimiques globaux* « entrées-sorties », obtenus en soustrayant les flux exportés par écoulement de nappe (ligne 6) des flux entrant (ligne 1). Les lames annuelles écoulées n'ont pas été mesurées mais simplement déduites des bilans hydriques : on a considéré qu'à Adiopodoumé les racines profondes pompent 80 mm d'eau par an entre le niveau — 2 m de profondeur du sol et le niveau de la nappe (hauteur d'eau déduite des profils hydriques établis par ROOSE, 1980). A Korhogo et à Saria, l'enracinement profond est peu ou pas développé et on a admis que la lame écoulée par la nappe est égale à la lame drainée à 2 m de profondeur. Par ailleurs la composition chimique des eaux de nappe n'est pas connue avec la même précision que celle des autres catégories d'eau analysées. Compte tenu de ces incertitudes et des marges d'erreur, on ne retiendra que les ordres de grandeur de ces bilans hydrochimiques globaux : les valeurs faiblement positives ou négatives obtenues pour la plupart des éléments signifient que les bilans sont sensiblement *équilibrés* ; seul le bilan de la silice semble être significativement déficitaire et celui du calcium excédentaire.

Ce dernier résultat est surprenant pour le pédosystème d'Adiopodoumé soumis à un climat humide et lixiviant ; pour les autres stations, le bilan positif du calcium peut être interprété en admettant l'existence d'une certaine immobilisation de calcaire dans le sous-sol, compte tenu de l'existence de périodes à forts déficits hydriques. Les bilans « entrées-sorties » des autres éléments montrent globalement la stabilité géochimique de ces milieux, sauf pour Si qui semble nettement exporté sous forme chimique par les nappes et les rivières, ce qui confirme la mobilité relative de cet élément sous climat chaud (TARDY, 1969). L'absence de pertes ou de gains notables pour les autres éléments s'accorde assez bien avec les bilans hydrochimiques annuels établis à l'échelle de petits bassins versants forestiers sous climat chaud (MILLER, 1968 ; CLARIDGE, 1970, 1975 ; GUTHRIE *et al.*, 1978, cités par FELLERS et KIMMINS, 1979). A l'échelle globale de tels bassins ou de l'ensemble sol et sous-sol des stations expérimentales, il ne semble pas y avoir d'évolution géochimique et géodynamique notable, tant que le couvert végétal est maintenu.

## 3. Evaluation des cycles internes et de l'altération chimique

Cette quasi-stabilité géochimique globale (sauf pour Si) cache cependant d'intenses transferts de matières à l'intérieur des pédosystèmes. Les données disponibles dans les tableaux V, VI et VII peuvent en effet servir à estimer les échanges de matière qui ont lieu entre les différents compartiments de nos pédosystèmes. La figure 2 permet de suivre le raisonnement : on considère trois compartiments, le compartiment phytomasse aérienne PMA, le compartiment sol SOL et le compartiment sous-sol SSOL (avec éventuellement la nappe d'eau

souterraine). Dans le compartiment sol, trois sous-compartiments sont distingués : la réserve minérale altérable (RES-AL), le complexe d'échange de cations (CAT-ECH), et la solution du sol (SOLU-SOL). Les flux de solutés sont figurés par des flèches blanches et les flux particuliers par des flèches hachurées ; on a représenté pour mémoire certains flux, telles les précipitations sèches ou les remontées biologiques profondes, qui n'ont pas pu être mesurés.



— Figure 2 —

Organigramme des transferts ioniques et solides dans un pédosystème.  
Schematization of the chemical and particulate transfers in a pedosystem.

On peut admettre que dans un pédosystème sol-végétation en équilibre l'état du sol est stationnaire, c'est-à-dire qu'il y a, d'une année sur l'autre, conservation des masses stockées dans les litières et dans le complexe d'échange.

Dans ces conditions, l'équation de conservation de masses appliquée au compartiment phytomasse permet de chiffrer le prélèvement biologique annuel X (flux ascendant provenant de la solution du sol) :

$$X = R_1 + R_2 + \Delta PM - (P_H + P_S) \neq R_1 + R_2 - P_H \quad (1)$$

avec  $R_1$  : restitution au sol par les pluiolessivats ;  $R_2$  : restitution au sol par les chutes de feuilles sous forme solide mais rapidement mobilisables par biodégradation ;  $\Delta PM$  : accumulation annuelle dans la phytomasse ;  $P_H$  : précipitations humides ;  $P_S$  : précipitations sèches.

$\Delta PM$  et  $P_S$  n'ont pas été mesurés mais on sait que l'augmentation de masse végétale annuelle ne consomme que des quantités relativement faibles d'éléments chimiques, de l'ordre de 5 à 10 kg.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> pour Ca et K et de 1 kg pour les autres éléments (NILHGARD, 1972 ; COLE et RAPP, 1981) ; on a peu de données sur les forêts équatoriales. Par ailleurs il est probable qu'une large part des dépôts secs est redissoute dans les pluiolessivats, ce qui donne  $R_1$  par excès ; on admettra que ceci compense la non prise en compte de  $\Delta PM$ . Du reste, il s'agit seulement d'estimer des ordres de grandeur, à quelques dixièmes près, pour situer l'importance relative des phénomènes.



De la même manière, le bilan de conservation de masse appliqué au compartiment sol permet d'évaluer l'altération chimique  $Y$  de la réserve minérale au cours du fonctionnement biogéochimique actuel (flux annuel provenant de la réserve altérable) :

$$Y = D + X - (R_1 + R_2) \neq D - (P_H + P_S) \neq D - P_H \quad (2)$$

$D$  étant le flux chimique entraîné par les eaux de drainage. Là encore, l'évaluation est imprécise puisque les erreurs peuvent s'ajouter. Les flux solides constitués de constituants minéraux insolubles ne sont pas pris en considération.

Les valeurs obtenues pour  $X$  et  $Y$  sont reportées sur les tableaux V, VI et VII, lignes (8) et (9).

*Prélèvements biologiques.* Il apparaît nettement que ces prélèvements concernent principalement Ca, Mg, K, Si. Cela confirme l'importance bien connue de ces éléments dans la nutrition végétale. On voit que l'intensité des prélèvements annuels est directement en relation avec l'intensité de la production biologique ; les prélèvements sont environ dix fois plus forts en milieu équatorial qu'en milieu tropical à tendance sahélienne.

*Altération chimique.* Les valeurs de l'altération chimique calculées sont basses pour tous les éléments sauf K à Adiopodoumé et à Korhogo, et pour  $\text{SiO}_2$  à Adiopodoumé et à Saria. Par ailleurs on constate que pour tous les éléments sauf Na et  $\text{SiO}_2$ , les flux chimiques des eaux d'écoulement de nappe (ligne 6) sont beaucoup moins élevés que les flux entraînés par les eaux de drainage (ligne 5). Cette différence ne peut s'interpréter que par l'immobilisation physico-chimique ou par le prélèvement biologique des éléments en question dans le compartiment inférieur du sous-sol ou par les deux phénomènes (ROOSE et LELONG, 1984). A Adiopodoumé la présence d'enracinement profond plaide en faveur de la seconde hypothèse. Quoi qu'il en soit, compte tenu de l'existence possible de ces prélèvements, les valeurs estimées de l'altération sont par excès puisque la valeur de  $X$  à prendre en compte dans l'équation (2) (part du prélèvement qui provient du compartiment sol) est éventuellement plus faible que celle que nous avons utilisée. L'intensité réelle de l'altération chimique dans les pédosystèmes peut donc être encore plus réduite qu'il n'apparaît dans les chiffres des tableaux. Seuls le silicium et le potassium semblent assez fortement soustraits de la réserve minérale, mais le premier est exporté en proportions comparables alors que le second, curieusement assez mobile dans le compartiment supérieur (sol), serait retenu dans le compartiment inférieur (sous-sol). Pour les autres éléments, l'altération chimique reste très modérée même dans les conditions équatoriales ; les cations nutritifs (K, Ca, Mg) se distinguent des autres éléments (Na, Cl, S) par un recyclage biologique et une rétention plus intenses dans les compartiments sol et sous-sol. On note enfin une altération négative pour le calcium dans les deux stations tropicales, qui signifie probablement une précipitation de calcite dans le sol et le sous-sol (déjà envisagée par TARDY pour Korhogo, 1969).

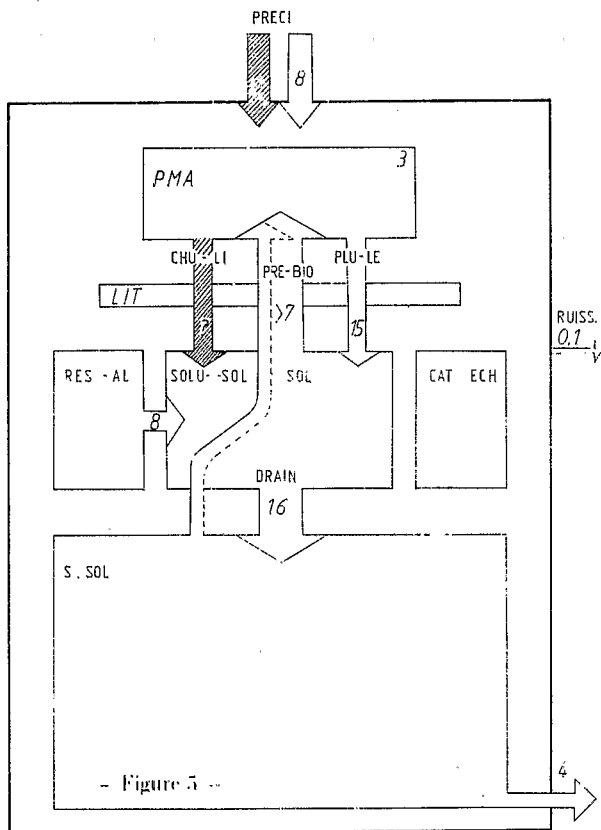
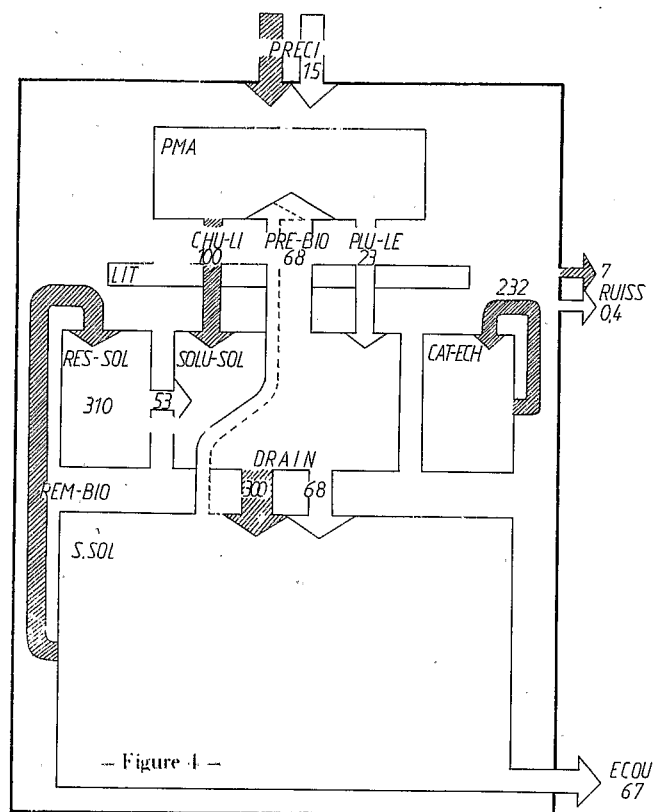
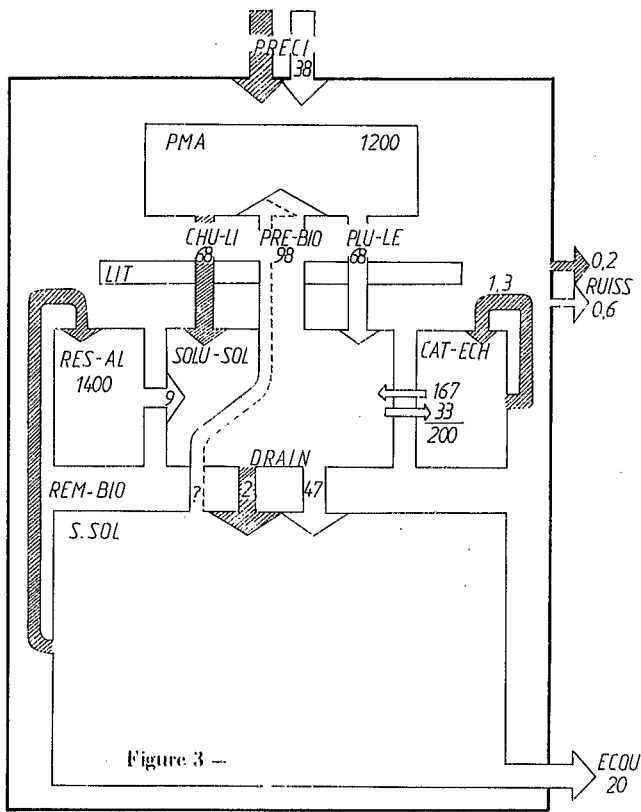
Les cycles biogéochimiques ainsi schématisés sont illustrés sur les figures 3, 4, 5 pour Ca,  $\text{SiO}_2$  et S, éléments à comportement contrasté et différemment impliqués dans les cycles biologiques.

## CONCLUSIONS

Les points principaux qui se dégagent de ces résultats sont, pour les pédosystèmes étudiés :

(1) *Le quasi-équilibre des bilans hydrochimiques globaux « entrées-sorties »* pour tous les éléments sauf  $\text{SiO}_2$  qui est modérément exporté (de l'ordre de 40 à 50  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ ). Cela signifie la quasi-stabilité géochimique de ces milieux dans les conditions actuelles.

(2) *L'importance considérable des « cycles internes »*, liés à l'activité biologique et notamment aux prélèvements et restitutions par la végétation. L'indice de recyclage biologique défini comme le rapport des flux mobilisés annuellement par la végétation aux flux exportés est donné en ligne (10) des tableaux V, VI et VII. Cet indice, très élevé pour K, est également assez fort pour les autres éléments nutritifs (Ca, Mg). Les valeurs sont



Bilan annuel du calcium (fig. 3), de la silice (fig. 4), du soufre (fig. 5) dans le pédosystème forestier d'Adiopodoumé.

Les flux sont exprimés en  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ .

Annual calcium (fig. 3), silica (fig. 4), sulphur (fig. 5) budget in the forested pedosystem of Adiopodoumé.

Fluxes are expressed in  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ .

d'autant plus fortes que le milieu est plus productif. Le silicium est également très impliqué par le cycle biologique, mais son indice est plus faible à cause de l'importance notable de son exportation.

(3) *La similitude de fonctionnement biogéochimique des trois pédosystèmes considérés*, malgré les différences bioclimatiques assez considérables entre le milieu équatorial humide et les milieux tropicaux à savane sèche et à déficit hydrique prononcé. En particulier, les transports solides dus à l'érosion superficielle (ligne 4 des tableaux) montrent des valeurs très faibles et pratiquement négligeables pour tous les éléments sauf  $\text{SiO}_2$  ; de même les transferts solides par drainage interne ne donnent des flux notables que pour  $\text{SiO}_2$ . Le fonctionnement des pédosystèmes est donc pour les éléments considérés à dominante géochimique (sauf pour  $\text{SiO}_2$ ). En outre, les concentrations de solutés des eaux du sol (cf. tabl. III) restent dans une gamme de valeurs assez voisine d'une station à l'autre, malgré des différences de bilan hydrique considérables (lame drainée égale à 40 % des précipitations à Adiopodoumé et à 16 % à Saria) ; cela signifie que le déterminisme des concentrations en solution n'est pas régi de façon exclusive ou principale par la loi de dilution. Deux phénomènes de régulation hydrochimique peuvent intervenir : les équilibres minéraux-solutions et les prélèvements biologiques. L'importance relative des cycles internes souligne le poids du second phénomène.

(4) *Les cycles internes*, très intenses par rapport aux flux entrant ou sortant, sont également *importants par rapport aux stocks d'éléments nutritifs mobilisables* dans le compartiment du sol contenant les cations échangeables, et même par rapport à la réserve correspondant aux minéraux altérables (cf. tabl. IX), car il s'agit de sols très altérés. En conséquence, le fonctionnement biogéochimique équilibré des sols dépend fortement de la restitution annuelle d'éléments engagés dans les cycles biologiques ; lorsque ces apports cessent, par suite par exemple du défrichement ou de l'exportation de la production végétale, les réserves de nutriments mobilisables sont rapidement épuisées et les pédosystèmes perdent vite leur potentialité chimique.

Tableau IX  
Importance relative des flux chimiques (en  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ ) et des stocks ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) dans les pédosystèmes à végétation naturelle d'Adiopodoumé, de Korhogo et de Saria  
Chemical fluxes (in  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ ) and stocks (in  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) in pedosystems with natural vegetation at Adiopodoumé, Korhogo and Saria

	ADIOPODOUME				KORHOGO				SARIA			
	Ca	Mg	K	Na	Ca	Mg	K	Na	Ca	Mg	K	Na
Restitutions biologiques (en $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ )	98	70	123	15	20	6,7	21	1,6	12,2	3,2	17	0,2
Altération chimique (en $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ )	9	22	63	8	-15	-3,8	16,9	0,6	-7	0,6	0,4	5,4
Réserves minérales du complexe absorbant du sol (en $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ )												
- 0 à 0,3 m	167	151	66	27	466	216	173	13	1071	319	129	32
- 0,3 à 2 m	33	15	12	5	-	-	-	-	-	-	-	-
- total	200	166	78	32	-	-	-	-	-	-	-	-
Réserve dans les minéraux altérables (en $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ )	1400	386	400	264	-	-	-	-	-	-	-	-

Les restitutions biologiques sont calculées à partir des tableaux V, VI et VII, en faisant la différence : retombées végétales (ligne 2) — précipitations (ligne 1). Les réserves minérales échangeables et totales sont évaluées à partir des analyses de sol (disponibles dans ROOSE, 1980).

The term « restitution biologique » is calculated from data of tables V, VI and VII, in subtracting the term « précipitations » from the term « retombées végétales ». The mineral exchangeable and total stocks are evaluated from available soil analyses (ROOSE, 1980).

(5) Les mesures de transferts hydrochimiques et biologiques faites simultanément dans les mêmes stations expérimentales *mais sur sols nus ou cultivés* (ROOSE, 1980) montrent un basculement radical du fonctionnement

des pédosystèmes par suite de l'accroissement considérable du ruissellement et de l'érosion superficielle. Les transports particulaires entraînés par le ruissellement augmentent alors 10 à 1000 fois selon les éléments et le contexte bioclimatique : l'évolution pédologique est alors dominée largement par les transferts mécaniques superficiels (« érosion sélective », ROOSE, 1980, et décapage superficiel du sol). Les pertes de matières correspondantes atteignent 10 000 à 100 000 kg. ha<sup>-1</sup>. an<sup>-1</sup> et les taux de dénudation peuvent être de l'ordre de 1 à 10 mm par an, 10 à 1000 fois plus élevés que ceux évalués de la même manière sous végétation naturelle (LELONG *et al.*, 1984).

REMERCIEMENTS — Les auteurs remercient M. MEYBECK qui a lu le manuscrit et dont les remarques ont guidé la rédaction définitive.

*Manuscrit déposé le 12 septembre 1984, accepté le 30 mai 1985*

### BIBLIOGRAPHIE

- BERNHARD F. (1970) — Etude de la litière et de sa contribution au cycle des éléments minéraux en forêt ombrophile de Côte d'Ivoire. *Oecol. Plant.*, Gauthier-Villars, p. 247 - 266.
- 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 ferrallitique forestier de Basse Côte d'Ivoire. *Cah. ORSTOM*, sér. Hydrol., 15, p. 351 - 363.
- CLARIDGE G.G.C. (1970) — Studies in element balances in small catchment at Taita, New-Zealand. *Internat. Assoc., Sci. Hydro. Publ.*, 96, p. 523 - 540.
- CLEAVES E.T., GODFREY A.E. and BRICKER P.O. (1970) — Geochemical balance of a small watershed and its geomorphic implications. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 81, p. 3015 - 3032.
- COLE D.W. et RAPP M. (1981) — Elemental cycling in forest ecosystems. *In* : « Dynamic properties of forest ecosystems », D.E. REICHLÉ (ed.), International Biological Program, Cambridge Univ. Press, p. 341 - 409.
- DUVIGNEAUD P. (1972) — La synthèse écologique. Doin, Paris, 286 p.
- DUVIGNEAUD P., DENAEYER de SMETS S. (1971) — Cycle des éléments biogènes dans les écosystèmes forestiers d'Europe. *In* : « Productivité des écosystèmes forestiers », Coll. UNESCO/PBI, Bruxelles 1969, p. 527 - 542.
- DUCHAUFOUR P. (1977) — Pédogenèse et classification. *In* : « Pédologie », Ed. Masson, Paris, 477 p.
- DUMAZET-WEDRAOGO B. (1983) — Modification de la charge chimique de l'eau au cours de son transit à travers différents écosystèmes à couvert végétal contrasté du Mont-Lozère. Thèse 3ème cycle, Univ. Orléans, 147 p.
- FELLER M.C. et KIMMINS J.P. (1979) — Chemical characteristics of small streams near Haney in Southwestern British Columbia. *Water Resources Research*, 15, 2, p. 247 - 258.
- FOURNIER F. (1954) — La parcelle expérimentale. Extrait du Rapport Mission OELE « Etude des sols » aux USA (TA 38.63), ORSTOM, Bondy.
- GOUZY M. (1973) — Méthodes d'analyses utilisées dans le Laboratoire d'Analyses du Centre ORSTOM d'Adiopodoumé. Rapp. ORSTOM, Abidjan, 432 p.
- HUTTEL C. et BERNHARD-REVERSAT F. (1975) — Recherche sur l'écosystème de la forêt subéquatoriale de Basse Côte d'Ivoire. V. Biomasse végétale et productivité primaire. Cycle de la matière organique. *Rev. Ecol. Appl.*, 29, p. 203 - 228.
- LAVELLE P. (1975) — Consommation annuelle de terre par une population naturelle de vers de terre (*Millsonia anomala* Omodeo) dans la savane de Lamto (Côte d'Ivoire). *Rev. Ecol. Biol. Sol*, 12, 1, p. 11 - 24.
- LELONG F. (1984) — Influence de la végétation sur la mobilisation chimique des éléments dans des bassins versants granitiques du Mont-Lozère (France). Comm. 25ème Congr. Internat. Géographie, Paris 27 - 31 août 1984.

- LELONG F., ROOSE E., AUBERT G., FAUCK R. et PÉDRO G. (1984) — Géodynamique actuelle de différents sols à végétation naturelle ou cultivés d'Afrique de l'Ouest. *Catena*, 11, p. 343 - 376.
- LEVEQUE A. (1975) — Pédogenèse sur le socle granitogneissique du Togo. Différenciation des sols et remaniements superficiels. Thèse Sci., Univ. Strasbourg, ORSTOM Paris, 301 p.
- LIKENS G.E., BORMANN F.H., PIERCE R.S., EATON J.S. et JOHNSON N.M. (1977) — Biochemistry of a forested ecosystem. Springer Verlag, New York, 146 p.
- MEYBECK M. (1983) — Atmospheric inputs and river transport of dissolved substances. Proc. Hamburg Symp. IAHS, p. 173 - 192.
- NALOVIC L. (1968) — Les méthodes d'analyse des sols et des eaux utilisées dans le Laboratoire du Centre ORSTOM d'Adiopodoumé. Rapp. ORSTOM Abidjan, 123 p.
- NILGHARD B. (1972) — Plant biomass primary production and distribution of chemical elements in a beech and a planted spruce forest in South Sweden. *Oidas*, Copenhagen, 23. p. 69 - 81.
- ODUM E.P. (1959) — Fundamentals of Ecology. 2nd ed. W.B. Saunders Co, Philadelphia, P.A., 546 p.
- RANKAMA K. et SAMAMA T.G. (1950) — Geochemistry. The Univ. of Chicago Press, 912 p.
- REICHLÉ D.E. (1981) — Dynamic properties of forest ecosystems. International Biological Program, Cambridge Univ. Press, 682 p.
- ROOSE E.J. (1967) — Erosion, ruissellement et lessivage oblique sous une plantation d'hévéas de basse Côte d'Ivoire. I. Milieu, dispositif et résultats en 1966. Rapp. ORSTOM-IRCA Abidjan, 46 p.
- ROOSE E.J., HENRY des TUREAUX P. (1970) — Deux méthodes de mesure du drainage vertical dans les sols en place. *Agron. Trop.*, 25, 12, p. 1079 - 1087.
- ROOSE E.J. (1976) — Contribution à l'étude de l'influence de la mésosfaune sur la pédogenèse actuelle en milieu tropical. Rapp. ORSTOM Abidjan, 56 p.
- ROOSE E.J. (1980) — Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique Occidentale. Etude expérimentale des transferts hydrologiques et biologiques de matières sous végétations naturelles ou cultivées. Thèse Sci., Univ. Orléans, 587 p.
- ROOSE E.J. et LELONG F. (1981) — Factors of the chemical composition of seepage and groundwaters in the intertropical zone (West Africa). *J. of Hydrology*, 54, p. 1 - 22.
- ROOSE E.J., LELONG F. et COLOMBANI J. (1983) — Influence du bioclimat et de l'aménagement des sols sur les éléments du bilan hydrique en Afrique de l'Ouest. *Hydrological Sci.*, 28, 2, p. 283 - 309.
- TARDY Y. (1969) — Géochimie des altérations. Etude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique. *Mém. Serv. Carte géol. Als. Lorr.*, Strasbourg, 31, 199 p.
- TROY J.P. (1979) — Pédogenèse sur roches charnockitiques en région tropicale humide de montagne dans le Sud de l'Inde. Thèse Sci., Univ. Nancy I, 337 p. + annexes.
- TURC L. (1961) — Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapo-transpiration potentielle. Formule climatique simplifiée et mise à jour. *Ann. Agron.*, 12, 1, p. 13 - 49.