

GEODYNAMIQUE ACTUELLE DE DIFFERENTS SOLS A VEGETATION NATURELLE OU CULTIVES D'AFRIQUE DE L'OUEST

F. Lelong, Orléans; E. Roose, G. Aubert, R. Fauck, Paris; G. Pedro, Versailles

SUMMARY

In connexion with a large research program on the **present day dynamic** of ferralitic and tropical ferruginous soils of West Africa, experimental plots (200-300 m²) were instrumented at eight stations representative of different bioclimatic conditions (subequatorial to tropical climates) and of different land uses with the following equipments: rain gauges, lysimeters, erosion-runoff and lessivage oblique plot (ERLO). 6,000 samples of rainfalls, throughfalls, runoff and drainage waters were collected in these plots and the chemical and solid loads were analysed during 4 to 11 years of field observations and measurements.

This method permitted to quantify approximatively the meteorologic **inputs**, the discharge (runoff and drainage) and the dissolved and solid materials transported from the plots (**outputs**). The biological and hydrological transfers inside the plots (**internal cycles**), and the pool of elements included in the top horizon of the soil and in the aerial vegetation were also evaluated.

Considering that each plot with its vegetation and the 2 m depth soil section represents an **homogeneous soil-vegetation "pedosystem"**, the comparison of geodynamical budgets (input-outputs) and of internal cycles between the different plots shows clearly the influence of the climate and of the land use upon the present day evolution of the pedosystems.

The results are reported for 3 stations which are representative respectively of the sub-equatorial, transition tropical and dry tropical areas, covered with either natural vegetation or cultivated plants. They emphasize:

- the moderate amount of the outputs and the approximative balance between inputs and outputs in the natural pedosystems; oppositely the very important amount of outputs - (because the enormous increase of erosion) - and the striking lack of balance between inputs and outputs in cultivated pedosystems; so these pedosystems evolve quickly.

- the high value of the ratio internal cycles versus outputs in the natural pedosystems and the low value of this ratio in cultivated pedosystems.

- the role of solid transports in the different pedosystems studied is important but the main process of solid transport differs according to the vegetation and the land use; the process of **clay** (or colloïd) **lessivage** prevails in the soil profiles of natural pedosystems with sound vegetation, in contrast to the process of **surface erosion** which prevails in cultivated pedosystems and in areas with degraded vegetation. Soil profile morphology is strongly influenced by these different processes.

RESUME

Dans le cadre d'un vaste programme de recherche sur l'**évolution actuelle** de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique de l'Ouest, huit stations représentatives de différentes conditions bioclimatiques (sub-équatoriales à tropicales sèches) et de différentes utilisations du sol ont été étudiées au moyen de parcelles expérimentales de 200 à 300 m² équipées comme suit: pluviographes, lysimètres, cases de ruissellement et de lessivage oblique (ERLO). 6.000 échantillons de pluies, pluvioloessivats, ruissellements et eaux de drainage ont été collectés; leurs charges chimiques et solides ont été analysées pendant 4 à 11 ans d'observations et de mesures de terrain.

9 AVRIL 1985

ISSN 0341 - 8162

O. R. S. T. O. M. Fonds Documentaire

© Copyright 1984 by CATENA VERLAG, D-3302 Cremlingen-Destedt, W. Germany

Cote : B

17.237

ex 1

Ces dispositifs permettent de quantifier les **apports météoriques**, les divers écoulements superficiels et souterrains et d'évaluer les charges en solution et solide qu'ils transportent: exportations (**sorties**), transferts à l'intérieur des parcelles (**cycles internes**). Les éléments stockés dans l'horizon superficiel du sol et dans la végétation aérienne ont été également évalués.

Considérant que chaque parcelle, avec sa végétation et une tranche de 2 m de sol, constitue un "pédosystème" à sol et végétation homogènes, l'analyse comparée des bilans géodynamiques (entrées-sorties) et des cycles internes entre les différentes parcelles montre clairement l'influence du climat et de l'utilisation du sol sur l'évolution actuelle des pédosystèmes.

Les résultats sont données pour 3 stations représentatives des climats subéquatorial, tropical de transition et tropical sec, comportant des parcelles à végétation naturelle et des parcelles cultivées. Ces résultats montrent:

- la valeur modérée des pertes et l'équilibre approximatif entre les gains et les pertes dans les pédosystèmes naturels; au contraire la valeur très importante des pertes—(par suite de l'augmentation énorme de l'érosion)— et le déséquilibre flagrant entre les gains et les pertes dans les pédosystèmes cultivés. Aussi ceux-ci évoluent très vite.
- la valeur élevée du rapport cycles internes sur pertes dans les pédosystèmes naturels et sa très forte réduction dans les pédosystèmes dégradés et cultivés.
- le rôle des transports de matières particulières très important dans les différents pédosystèmes étudiés; cependant le processus principal de transport solide diffère selon la végétation et l'usage du sol; c'est le lessivage des argiles (ou colloïdes) qui prévaut dans les pédosystèmes naturels, avec un couvert végétal en bon état, alors que c'est l'érosion superficielle qui prévaut dans les pédosystèmes cultivés ou à végétation dégradée. La morphologie des profils de sol reflète nettement cette distinction.

1. INTRODUCTION

Les transferts de matières impliqués dans l'altération superficielle des roches et l'évolution des sols peuvent être évalués de deux manières indépendantes:

- **par la méthode de bilans chimico-minéralogiques** à partir d'échantillons de sols représentatifs de l'évolution chimico-minéralogique, le long de profils verticaux sur roches mères homogènes. La connaissance de cette évolution permet, moyennant certaines hypothèses (raisonnement isofer et isoalumine (HARRISON 1933), raisonnement isovolume (MILLOT & BONIFAS 1955), raisonnement isoquartz (LELONG 1969)) de chiffrer les pertes et les gains de matière correspondant au développement des différents horizons. C'est en suivant cette démarche que l'on a pu (HARRISON 1933, MILLOT & BONIFAS 1955, LENEUF 1959, DELVIGNE 1965, LELONG 1969, BOULET 1974) caractériser **ponctuellement**, type de sol par type de sol, les grandes tendances de l'altération superficielle. Cependant cette méthode n'indique que des **tendances moyennes** sur de longues périodes, intégrant des phénomènes très variables dans le temps; en outre elle ne donne pas d'information directe sur les agents et mécanismes responsables des transferts de matière (transport hydrique en solution ou particulaire, transport par les agents biologiques ...).

- **par la méthode hydrochimique**, en comparant les flux de matière (ions, matières solides...) entrant et sortant d'un volume donné de terrains. En pratique cette méthode s'applique normalement à l'échelle de bassins versants, systèmes naturels de drainage permettant de contrôler à l'exutoire la quasi-totalité des écoulements (LIKENS et coll. 1977, FELLER et coll. 1979, DUPRAZ et coll. 1982). Cette méthode nécessite de mesurer à la fois les débits d'eau écoulés et la composition des charges en solution et particulières qu'elles véhiculent. Si l'on admet que l'agent hydrique est le vecteur principal des déplacements de matière, la méthode hydrochimique permet de définir **globalement**, à l'échelle du système de drainage, les **tendances évolutives actuelles** à l'échelle de l'année ou des saisons. Mais dans de tels bilans, sont intégrés les effets conjugués de phénomènes variés — altération des roches, érosion mécanique, développement de la biomasse, humification des litières — s'exerçant sur de vastes sur-

faces, avec des conditions de topographie, de sol et de végétation variées. Il est donc difficile d'en déduire les transferts de matière réellement en oeuvre à l'échelle d'une unité écologique fonctionnelle, à sol et végétation homogènes.

L'objectif de la présente étude est de quantifier les flux de matière à l'échelle de telles unités (parcelles expérimentales), en milieu intertropical d'Afrique de l'Ouest, soit sous végétation naturelle, soit sous diverses cultures, pour mieux comprendre la dynamique actuelle de sols représentatifs de ce milieu et les modifications apportées à cette dynamique par l'utilisation agricole du sol. Elle a été réalisée dans le cadre d'un large programme de recherche mené par l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer avec la collaboration du Groupement d'Etude et de Recherche d'Agronomie, sur l'évolution actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique de l'Ouest (ROOSE 1980).

2. CONDITIONS DE TERRAIN

Huit stations expérimentales, représentatives de grands types d'écosystème de la zone intertropicale ont été choisies le long d'une séquence bioclimatique (Fig. 1) depuis la zone forestière subéquatoriale de basse Côte d'Ivoire, près d'Abidjan, jusqu'à la zone tropicale sèche des savanes présahariennes, près de Ouagadougou (Haute-Volta). Les caractéristiques écologiques de ces stations – climat, végétation naturelle, géomorphologie, sol, roches mères – sont résumées dans le tableau 1.

Les sols de ces stations appartiennent à deux types: dans les zones équatoriales et tropicales humides, il s'agit de sols ferrallitiques*) profonds à faible différenciation morphologique verticale; dans la zone tropicale sèche, il s'agit de sols ferrugineux tropicaux**) moins épais et à profil vertical contrasté (horizon A sableux, horizon B argilo-sablo-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 oxy-hydroxydes de fer); leur composition chimique et minéralogique est très voisine mais les propriétés physiques et le comportement hydrologique des horizons de surface en particulier diffèrent sensiblement en fonction des caractères bioclimatiques.

3. METHODES

3.1. LE DISPOSITIF EXPERIMENTAL DE MESURES

Les stations expérimentales consistent en des parcelles bien circonscrites de quelques centaines de m² de surface, implantées à mi-pente de versant; chacune délimite un domaine de sol à végétation et topographie homogènes, que nous appellerons "pédosystème élémentaire". L'équipement des stations permet de quantifier les apports des précipitations, du pluviollessivage à travers la strate végétale, et les volumes 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 cm², installés à 150 cm du sol.

– **Le pluviollessivage** a été capté à 25 cm au-dessus du sol dans des bacs en plastique ou dans des entonnoirs fixés sur des bouteilles en plastique.

* Oxisols dans la classification U.S.A. et ferrosols dans la classification F.A.O.

** Tropustalfs dans la classification U.S.A. et chromic luvisols dans la classification F.A.O.

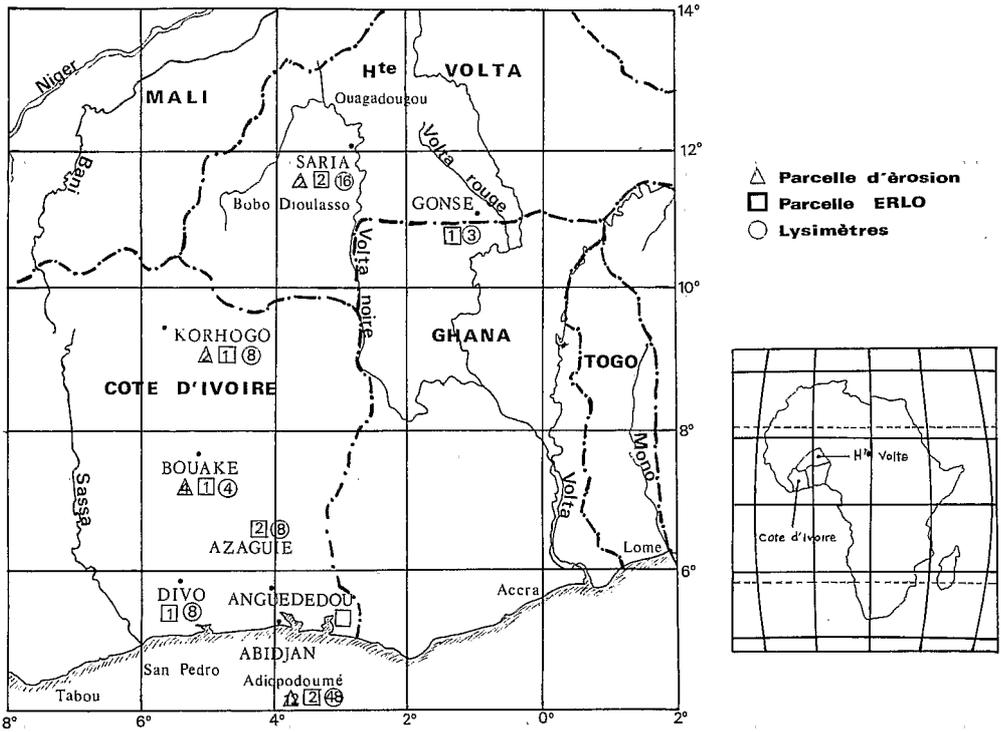


Fig. 1: Localisation géographique des stations expérimentales et liste des organismes coopérants. Les chiffres indiquent le nombre de parcelles par station.

Les organismes de recherche ayant participé à ce programme sont: (1) Station de GONSE: Centre technique forestier tropical (CTFT); (2) Station de SARIA et de BOUAKE: Institut de recherches agronomiques tropicales (IRAT); (3) Station de DIVO: Institut Français du cacao et du café (IFCC); (4) Station d'ANGUEDEDOU: Institut de recherche sur le caoutchouc (IRCA).

Tab. 1: CARACTERISTIQUES ECOLOGIQUES DES STATIONS ETUDIEES.

Stations	Adiopodoumé	Anguédegou	Azaguie	Divo	Bouaké	Korhogo	Saria	Gonsé
Climat	Subéquatorial (deux saisons de pluies)					Tropical de transition	Tropical pur	
Pluies (mm)	2150	2100	1750	1550	1200	1350	830	860
E.T.P. (mm)	1250	1300	1314	1280	1300	1660	1885	1905
Indice d'érosivité (WISCHMEIER 1962)	1260	1000	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			Forêt semi décidue	Savane arborée Guinéo-soudanienne	Savane arbustive Soudano-sahélienne		
Forme du paysage	Plateau incisé		Collines en lanières	Larges croupes		Relief résiduel 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 (continental terminal)		Schistes chloriteux	Granites	Granites (filons de pegmatites)		Granites (filons de quartz)	Granites
	Mio-pliocène		Précambrien					

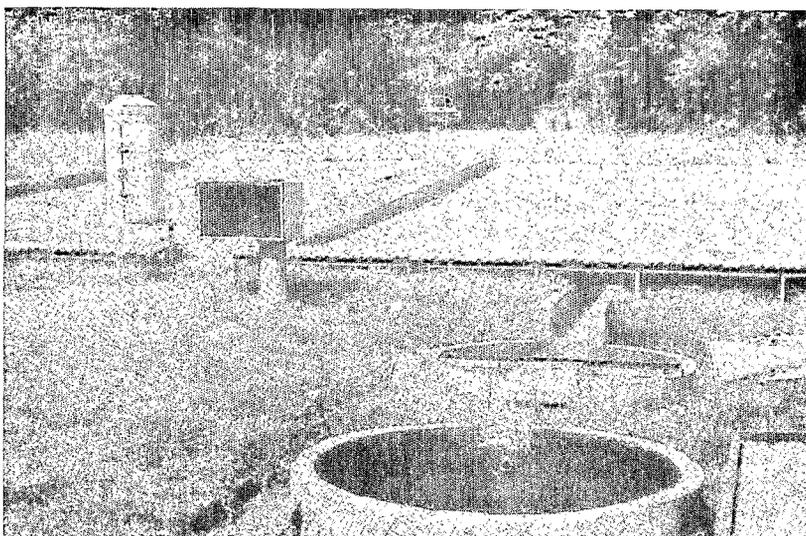


Photo 1: Parcelles d'érosion de la station d'Adiopodoumé (d'après ROOSE 1980). Elles comportent des dispositifs de mesure des pluies, du ruissellement et de l'érosion; on remarque le canal de réception des eaux de ruissellement et les deux cuves de décantation reliées par un partiteur: ce système permet de recueillir une fraction représentative des volumes ruisselés et des charges solides en suspension qu'ils entraînent.

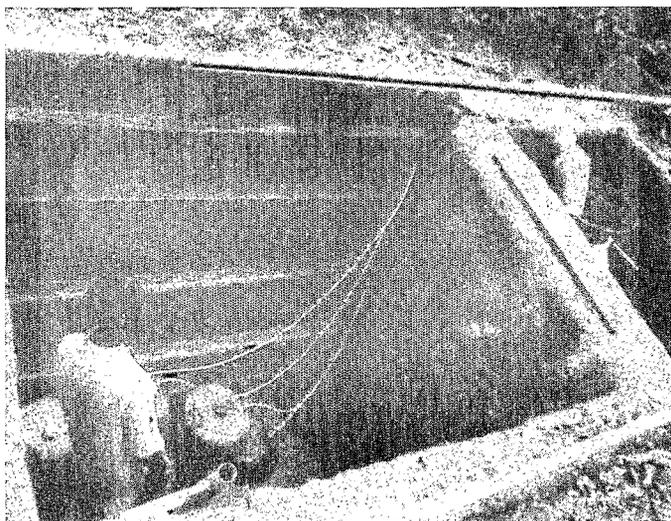


Photo 2: Case d'Erosion, Ruissellement et Lessivage oblique (E.R.L.O.) de la Station de Divo (d'après ROOSE, 1980).

On remarque les gouttières réceptives du drainage oblique reliées à des fûts en plastique de 60 l par des tuyaux en nylon. A droite on voit le manchon en plastique qui conduit les eaux de ruissellement à un piège à sédiments et à un fût-partiteur déversant 1/17 du débit dans un second fût de stockage (210 l). La parcelle soumise à la mesure s'étend sur le versant situé en arrière des gouttières; la largeur de la parcelle expérimentale correspond à celle de la tranchée.

– **Le ruissellement** a été collecté, avec les matières solubles et solides qu'il transporte, sur des parcelles d'érosion de 200 à 300 m², 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 (voir photo 1); 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 & DES TUREAUX 1970).

– **Le drainage oblique** a été capté à l'aval de parcelles ERLO*), grâce à un système de gouttières enfoncées à 4 profondeurs différentes dans la paroi de la fosse délimitant la partie aval de la parcelle, comme le montre la photo 2 (ROOSE 1980).

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 & ROOSE 1980).

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, etc. ...), 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 Korhogo et 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 élémentaires 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 m²). A l'échelle de tels pédosystèmes, 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.

3.2. 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'évapotranspiration réelle (ETR) 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 les valeurs du drainage profond D (au-delà de 1,80 m de profondeur), à partir de l'évapotranspiration potentielle (ETP) calculé d'après la formule de TURC (1961) et des valeurs mesurées des précipitations P et du ruissellement R, suivant la formule générale:

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

* parcelle de mesure D'érosion, de Ruissellement et de Lessivage Oblique.

Δr 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 $D = P - (R + ETP)$.

Les valeurs de ETR et D brut ainsi obtenues ont été corrigées 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 en milieu non forestier montre un écart inférieur à 10%; le drainage calculé semble légèrement sous estimé par le calcul à l'échelle mensuelle. Cette approximation est cependant acceptable dans la mesure où l'on vise une analyse comparative de systèmes bioclimatologiquement très contrastés.

3.3. ANALYSE DES CHARGES SOLIDES ET EN SOLUTION DANS LES DIFFERENTES EAUX

A chaque averse, des volumes de pluie, de pluviolessivates, 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,
- 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 6.000 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, NH_4
- les anions majeurs: SO_4 , Cl, NO_3 , parfois HCO_3
- les nutriments: azote total, carbone organique, PO_4 total
- les sesquioxydes: Fe, Al, SiO_2 .

Les méthodes de dosage utilisées sont celles décrites par NALOVIC (1968), puis GOUZY (1973). L'anion majeur manquant HCO_3^- a été évalué par le calcul de l'équilibre ionique.

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; 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 litres) par floculation avec une solution de sulfate d'alumine (2 cm³ 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 SiO₂, Fe₂O₃ amorphes extractibles dans divers réactifs spécifiques (SOUCHIER 1980, communication écrite personnelle).

3.4. EVALUATION DES TRANSFERTS BIOLOGIQUES

Les transferts biologiques visibles sont de trois natures: retombées de litières végétales, exportation par les cultures et remontées de terre par la mésofaune.

– 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 les savanes de Korhogo et Saria a été évaluée à plusieurs reprises sur le terrain en saison sèche par des prélèvements dans des cadres de 1 à 4 m² (5 à 10 répétitions). La litière fraîche a été recueillie chaque semaine sous forêt voisine de la station d'Adiopodoumé dans des cadres disposés au-dessus du sol (BERNHARD 1970, HUTTEL & BERNHARD-RESERVAT 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 m² en fonction de la taille des édifices (ROOSE 1975, 1980). Les évaluations ont été suivies pendant plus de trois années sur les mêmes parcelles (Saria) ou réalisées en fin d'expérimentation (Adiopodoumé et Korhogo). 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 turricules.

3.5. EVALUATION DES STOCKS DE MATIERES

Les stocks de matières pris en compte dans les pédosystèmes correspondent:

– aux éléments chimiques stockés dans les arbres ou dans les parties permanentes de la végétation aérienne,

– 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 & BERNHARD-RESERVAT (1975) dans une forêt voisine. Pour les végétations naturelles des autres stations, les données sont rares, mais à Korhogo comme à Saria et Gonsé, 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 insoluble d'attaques triacides sur échantillon total de sol.

4. RESULTATS

4.1. BILANS HYDRIQUES

On a représenté sur le tableau 2, station par station, les termes du bilan hydrologique correspondant à une année de précipitations moyennes sous végétation naturelle et sous cultures.

Les variations des termes du bilan hydrique le long de la séquence bioclimatique étudiée, **sous végétation naturelle**, sont illustrées par la Figure 2. Celle-ci représente, en ordonnées pour chaque station (en abscisses), les hauteurs d'eau cumulées du bilan hydrique annuel.

$$P = R + D + ETR$$

L'ETR inclut la part d'évapotranspiration dûe au pompage des réserves d'eau du sol (cette part correspond à l'écart entre les lignes 3 et 4 du graphique). On a distingué aussi sur ce schéma les deux régimes climatiques, le régime équatorial, qui concerne Adiopodoumé, Azaguié, Divo et Bouaké, et le régime tropical qui concerne les autres stations: la plus grande concentration des pluies au cours de l'année, dans le second cas, explique le décalage de l'ETR vers le bas, correspondant à une diminution de plus de 100 mm par an; on note en outre dans la zone tropicale la plus faible valeur de la part des variations des réserves d'eau du sol, en relation avec la présence de sols moins épais et d'un système racinaire moins profond que dans la zone équatoriale.

Le schéma montre que le terme ruissellement du bilan reste très faible dans les différents pédosystèmes étudiés, comportant une végétation naturelle en bon état, qu'il s'agisse de grande forêt ou de savane arbustive: moins de 50 mm en année moyenne, pour toutes les stations. L'ETR diminue, en allant du Sud au Nord vers la zone tropicale sèche, mais plus lentement que les précipitations, de sorte que le drainage profond tend vers zéro pour des hauteurs de précipitations de l'ordre de 800 à 900 mm en région à climat équatorial à 2 saisons de pluies, avec des sols épais à forte réserve hydrique, et de 600 à 700 mm en région à climat tropical et avec des sols à plus faibles réserves hydriques. Ces hauteurs correspondent donc au seuil de précipitations annuelles nécessaires à l'alimentation "directe" des aquifères souterrains (ARCHAMBAULT 1963).

Tab. 2: BILANS HYDRIQUES CALCULES SUR DES PARCELLES A VEGETATION NATURELLE (A GAUCHE) ET CULTIVEES (A DROITE), POUR DES ANNEES PLUVIOMETRIQUES MOYENNES, EXCEDENTAIRES (FREQUENCE 1/10) ET DEFICITAIRES (FREQUENCE 1/10), EN TROIS STATIONS EXPERIMENTALES D'AFRIQUE OCCIDENTALE

	PARCELLES A VEGETATION NATURELLE									
	Pluies		E.T.P.		Ruissellement		E.T.R.		Drainage	
	mm	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	
ADIOPODOUME										
Année à										
- pluies déficitaires (1/10)	1636	1285	79	16,4	1	1128	68,9	491,6	30,1	
- pluies moyennes	2131	1429	59	22	1	1230	57,7	879	41,3	
- pluies excédentaires (1/10)	2776	1107	40	28	1	952	34,3	1796	64,7	
KORHOGO										
Année à										
- pluies déficitaires (1/10)	1004	1751	174	20	2	828	82,5	156	15,5	
- pluies moyennes	1353	1660	123	40,6	3	1064	78,7	248	18,3	
- pluies excédentaires (1/10)	1723	1643	95	86,2	5	1169	67,8	468	27,2	
SARIA										
Année à										
- pluies déficitaires (1/10)	617	2096	340	25	4	572	93	20	3	
- pluies moyennes	826	1905	231	41	5	649	78	136	17	
- pluies excédentaires (1/10)	1076	1713	159	86	8	586	54	404	38	

Pour les parcelles cultivées, le terme ruissellement augmente considérablement, il représente 20 à 25% du bilan hydrique pour les stations d'Adiopodoumé, Korhogo et Saria, portant des cultures en maïs et sorgho. Cette augmentation se répercute sur les autres termes du bilan: l'ETR diminue nettement, surtout en région tropicale, ce qui constitue un facteur limitant pour les productions végétales mais le drainage profond (et l'alimentation des nappes) peut également être amoindri (ROOSE, LELONG & COLOMBANI 1983); ces tendances générales doivent en fait être modulées dans chaque région climatique en fonction de la nature de la végétation, des types de sol, de leur perméabilité, et de leur capacité de rétention hydrique.

4.2. CONCENTRATIONS DES CHARGES TRANSPORTEES EN SOLUTION ET DES CHARGES SOLIDES

L'analyse des concentrations de matière contenue dans les différentes catégories d'eau, est conduite en vue de déterminer les flux de matière transportée par l'eau. Le flux instantané $f(i,x)$ d'un élément x dans un volume écoulé v_i , à suite d'une averse i , est égal à:

$$f(i,x) = v_i \cdot c_{i,x}$$

$c_{i,x}$ étant la concentration de l'élément x dans le volume écoulé v_i .

PARCELLES CULTIVEES

	Pluies		E.T.P.		Ruissellement		E.T.R.		Drainage	
	mm	mm	%	mm	%	mm	%	MM	%	
ADIOPODOUME										
Année à										
- pluies déficitaires (1/10)	1636	1285	79	360	22	863	52,8	413	25,2	
- pluies moyennes	2131	1249	59	532	25	966	45,3	633	29,7	
- pluies excédentaires (1/10)	2776	1107	40	750	27	779	28,1	1247	44,9	
KORHOGO										
Année à										
- pluies déficitaires (1/10)	1004	1751	174	151	15	702	70	151	15	
- pluies moyennes	1353	1660	123	271	20	876	64,8	206	15,2	
- pluies excédentaires (1/10)	1723	1643	95	431	25	979	56,8	313	18,2	
SARIA										
Année à										
- pluies déficitaires (1/10)	617	2096	340	123	20	494	80	0	0	
- pluies moyennes	826	1905	231	206	25	594	72	21	2,5	
- pluies excédentaires (1/10)	1076	1713	159	323	30	562	52	191	18	

Le flux annuel F_x , pour n averses, est:

$$F_x = \sum_1^n f(i,x) = V \frac{\sum_1^n v_i c_{i,x}}{V} = V \frac{\sum v_i c_{i,x}}{\sum v_i}$$

V étant le volume total écoulé annuellement.

Le terme

$$\frac{\sum_1^n v_i c_{i,x}}{\sum v_i}$$

représente la **concentration moyenne pondérée par le volume**, symbolisée par l'expression c_{mpv} . Elle correspond à la concentration moyenne que l'on aurait obtenu en reconstituant le mélange homogène de la somme annuelle des volumes écoulés.

L'intérêt de cette concentration c_{mpv} par rapport aux moyennes arithmétiques simples, est de tenir compte des variations de concentration selon les débits écoulés. Le calcul des flux avec des moyennes arithmétiques conduit en effet à surestimer les flux pour les éléments dont les concentrations diminuent quand les débits écoulés augmentent et inversement; l'écart peut être important quand les corrélations concentrations-débits sont nettes.

L'analyse statistique des relations concentrations-débits a été effectuée pour les différentes catégories d'eau recueillies à la station d'Adiopodoumé. En général, on observe une

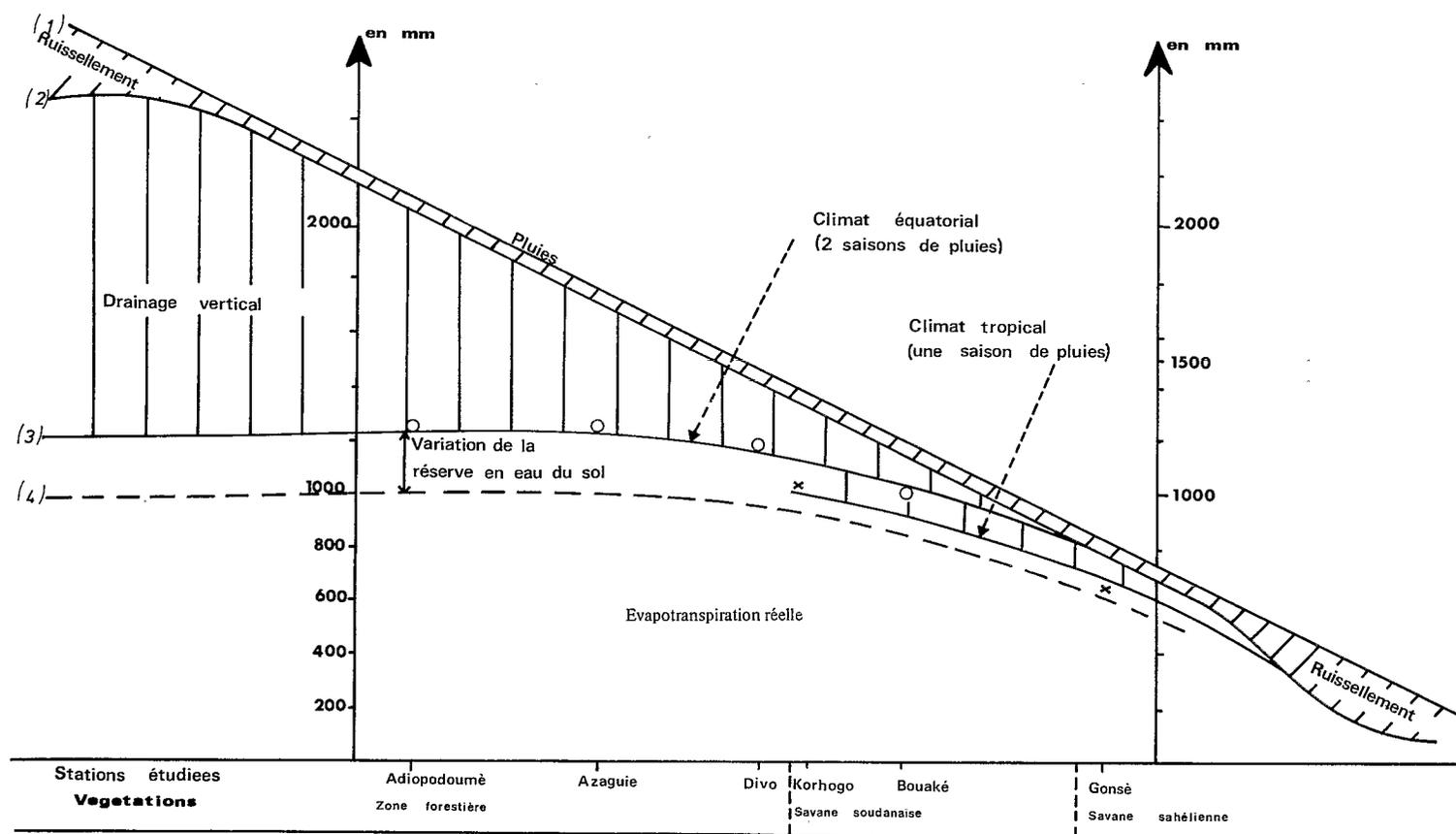


Fig. 2: Variation du bilan hydrique en fonction des conditions bioclimatiques.

– abscisses: localisation des stations le long de la séquence bioclimatique étudiée.

– ordonnées: hauteurs annuelles cumulées d'eau: précipitations totales = évapotranspiration + drainage vertical + ruissellement. Les valeurs correspondent à une année à pluies moyennes (voir tableau 2).

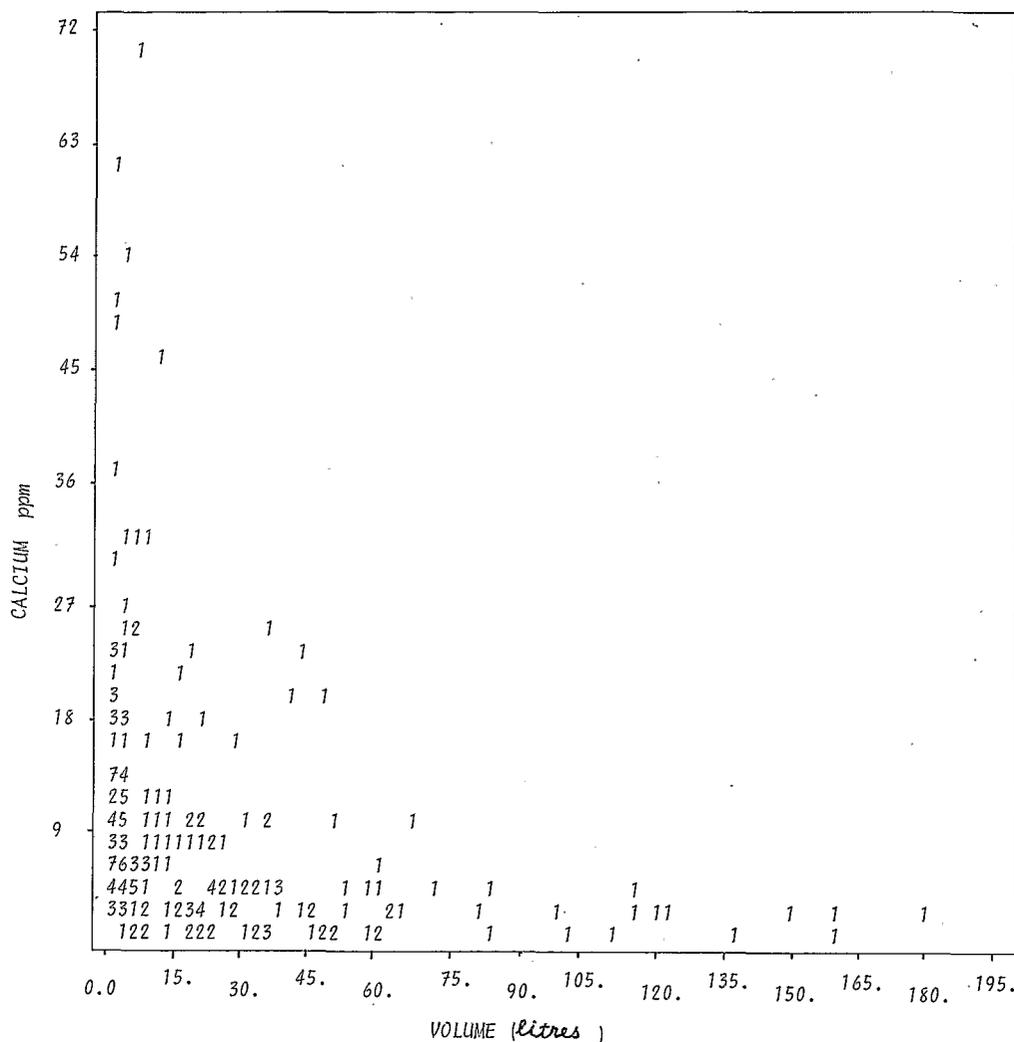


Fig. 3: Variations des teneurs de calcium en solution en fonction du volume de drainage (mesurées à Adiopodoumé). Les chiffres indiquent le nombre d'échantillons pour chaque valeur entière des variables.

certaine tendance à la dilution quand les débits écoulés augmentent; c'est notamment le cas pour l'azote total, les cations et surtout Ca^{++} (cf. Fig. 3), mais pour d'autres éléments, notamment Si, les concentrations paraissent indépendantes des débits ou encore elles peuvent être légèrement croissantes avec le débit (ainsi pour Al). Pour réduire au maximum l'erreur introduite par ce phénomène dans le calcul des flux, on a donc pris soin d'utiliser systématiquement les valeurs de concentrations moyennes pondérées par les volumes. Ce sont donc ces valeurs c_{mpv} qui sont données et discutées ci-après.

Tab. 3: CONCENTRATIONS MOYENNES PONDEREES PAR LES VOLUMES (Cmpv) DES ELEMENTS CHIMIQUES DISSOUS DE DIFFERENTES CATEGORIES D'EAU EN TROIS STATIONS EXPERIMENTALES D'AFRIQUE OCCIDENTALE. HCO_3^- est estimé à partir de la balance ionique.

	Pluies		Pluiolessivats		Ruissellement		Drainage niveau sup.		Drainage niveau inf.		Eau de nappe	
	ppm	meq/l	ppm	meq/l	ppm	meq/l	ppm	meq/l	ppm	meq/l	ppm	meq/l
ADIOPODOUME (Forêt dense)												
Ca ⁺⁺	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 ⁺⁺	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 ⁺	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 ⁺	0,82	0,03	1,75	0,08	2,90	0,08	2,60	0,11	3,10	0,13	2,40	0,10
NH ₄ ⁺	0,24	0,01	0,27	0,015	0,70	0,04	0,30	0,02	4,40	0,02	0,16	0,01
∑(C ⁺)	-	0,24	-	0,56	-	0,76	-	0,53	-	1,25	-	0,27
SO ₄	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 ⁻	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 ₃ ⁻	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 ₄ H ₂ ⁻	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 ₃ ⁻	(7,3)	0,12	(21,3)	0,35	(34,1)	0,56	(17,1)	0,28	(54,3)	0,89	(7,3)	0,12
∑(A ⁻)	-	0,24	-	0,56	-	0,76	-	0,53	-	1,25	-	0,27
SiO ₂	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	-
KORHOGO (Savane arborée)												
Ca ⁺⁺	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 ⁺⁺	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 ⁺	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 ⁺	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 ₄ ⁺	0,26	0,01	0,10	0,01	0,13	0,01	0,14	0,01	0,28	0,02	0,09	0,01
∑(C ⁺)	-	0,14	-	0,20	-	0,22	-	0,29	-	0,60	-	0,24
SO ₄	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 ⁻	0,30	0,01	0,80	0,02	1,30	0,04	2,50	0,07	2,50	0,07	0,3	0,01
HO ₃ ⁻	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 ₄ H ₂ ⁻	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 ₃ ⁻	(6,10)	0,10	(7,9)	0,13	(7,9)	0,13	(7,9)	0,13	(23,)	0,39	(10,4)	0,17
∑(A ⁻)	-	0,14	-	0,20	-	0,22	-	0,29	-	0,60	-	0,24
SiO ₂	0,7	-	1,4	-	3,1	-	6,8	-	6,3	-	19,2	-
Organic C	1,	-	3,	-	5,	-	3,	-	3,0	-	1,2	-
Total N	0,9	-	1,1	-	2,0	-	1,2	-	2,1	-	0,8	-
SARIA (Savane)												
Ca ⁺⁺	2,14	0,10	2,60	0,13	2,30	0,11	7,70	0,39	-	-	3,40	0,17
Mg ⁺⁺	0,30	0,02	0,40	0,03	0,50	0,04	2,40	0,20	-	-	0,60	0,05
K ⁺	0,40	0,01	1,20	0,03	1,10	0,03	2,90	0,07	-	-	1,30	0,03
Na ⁺	0,10	0,004	0,14	0,01	0,40	0,017	4,70	0,20	-	-	-	-
NH ₄ ⁺	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
∑(C ⁺)	-	0,13	-	0,20	-	0,35	-	0,85	-	-	-	0,51
SO ₄	1,10	0,03	1,70	0,04	2,10	0,04	3,4	0,07	-	-	1,60	0,03
Cl ⁻	0,30	0,01	0,60	0,02	0,80	0,02	2,3	0,06	-	-	1,80	0,05
NO ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PO ₄ H ₂ ⁻	0,77	0,01	0,40	0,01	0,91	0,01	0,13	0,001	-	-	0,15	0,002
HCO ₃ ⁻	(4,9)	0,08	(7,9)	0,13	(17,1)	0,28	(43,9)	0,72	-	-	(26,3)	0,43
∑(A ⁻)	-	0,13	-	0,20	-	0,35	-	0,85	-	-	-	0,51
SiO ₂	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	-

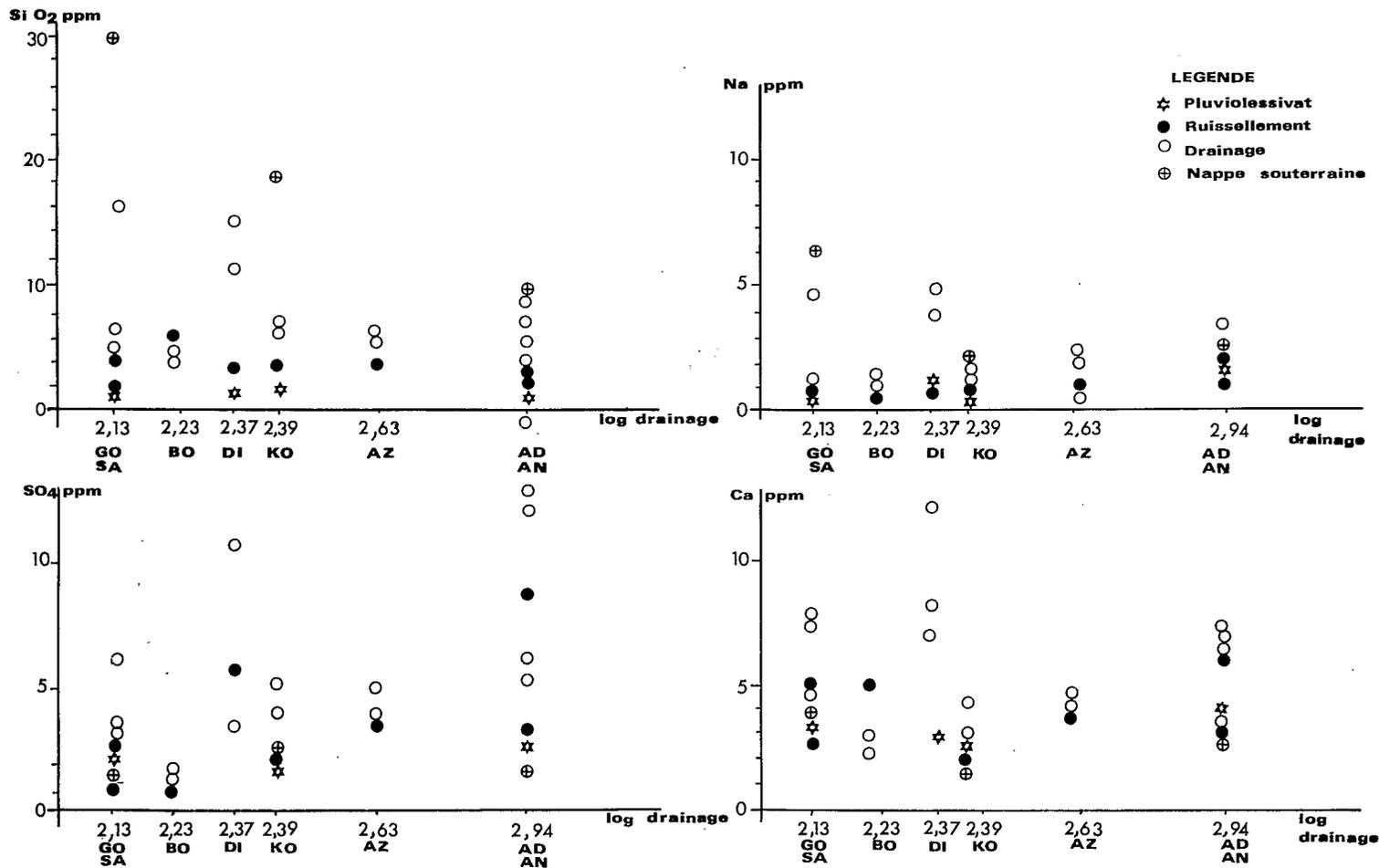


Fig. 4: Variations des teneurs de SiO₂, SO₄, Na et Ca en solution dans différentes catégories d'eau (ruissellement, drainage et eau souterraine) en fonction du logarithme du drainage (tiré de ROOSE & LELONG 1981). Les noms des stations sont indiqués comme suit: Go, Sa = Gonsé, Saria; Bo = Bouaké; Di = Divo; Ko = Korhogo; Az = Azaguié; Ad, An = Adiopodoumé, Anguédégou (voir fig. 1).

Tab. 4: COMPOSITION GRANULOMETRIQUE ET CHIMIQUE DES DEUX FRACTIONS DE MATERIAUX ERODES (SEDIMENTS TRACTES = S.T., SEDIMENTS EN SUSPENSION = S.S.) ET DE LEUR SOMME (EROSION TOTALE = E.T.), AINSI QUE D'EDIFICES BIOLOGIQUES (E.B.) ET DU SOL EN PLACE. LE COEFFICIENT DE SELECTIVITE (COLONNES 6 ET 11) EST LE RAPPORT: TENEUR DANS L'EROSION TOTALE SUR TENEUR DANS LE PROFIL DE SOL. ADIOPODOUME 1964-75 (d'après ROOSE 1980).

NATURE ET MASSE TOTALE DES FRACTIONS SOLIDES en kg · ha ⁻¹ · an ⁻¹	E.B.	EROSION HYDRIQUE DANS LA PARCELLE FORESTIERE (pente 11%)					Coeff. de sélectivité 6 (= 4/5)
		S.T.	S.S.	E.T.	Sol	(0-7cm)	
		1	2	3	4		
4000		10	40	50			
<hr/>							
Fractions granulométriques							
argiles	%	15,2	14,4	50,7	43,4	11,7	3,7
limons fins		2,7	3,4	32,0	26,3	2,6	10,1
limons grossiers		3,2	2,1	5,1	4,5	2,0	2,2
sables fins		39,7	19,5	10,1	12,0	23,5	0,5
sables grossiers		39,2	60,6	2,1	13,8	60,2	0,2
<hr/>							
Fractions organiques							
Carbone	‰	30,5	83,5	304,9	260,6	23,8	10,9
Azote		2,75	5,44	25,6	21,56	1,51	14,2
Acides humiques		4,87	1,9	29,5	23,98	2,87	8,4
Acides fulviques		8,47	4,9	30,4	25,30	2,28	11,1
<hr/>							
Cations échangeables							
Ca	meq/100 g	1,23	8,3	11,1	10,5	0,45	23,4
Mg		1,54	6,5	5,1	5,38	0,90	6,0
K		0,13	0,63	0,6	0,61	0,11	5,5
Na		0,05	0,18	0,5	0,44	0,03	14,5
<hr/>							
Éléments totaux							
P ₂ O ₅ total	‰	0,60	0,87	1,77	1,59	0,71	2,2
P ₂ O ₅ Olsen	‰	0,12	0,36	0,40	0,39	0,07	5,6
SiO ₂ combiné	%	5,8	4,7	7,6	7,0	6,2	1,13
Al ₂ O ₃ total	%	4,5	2,4	4,5	3,8	4,1	0,9
Fe ₂ O ₃ total	%	2,52	1,6	3,5	3,1	2,4	1,3
Fe ₂ O ₃ libre	%	1,52	1,5	-	-	1,3	-
TiO ₂	%	0,38	0,25	0,63	0,55	0,8	0,7
Ca total	meq/100 g	1,65	12,1	12,3	12,26	0,68	18,0
Mg	"	2,85	4,5	5,5	5,3	1,56	3,4
K	"	0,50	1,32	1,3	1,3	0,54	2,4
Na	"	0,26	0,50	0,6	0,58	0,42	1,4

4.2.1. Les concentrations en solution

Le tableau 3 présente, à titre d'exemple, les valeurs des concentrations moyennes pondérées par les volumes c_{mpv} , pour les différentes catégories d'eau de trois stations, **sous végétation naturelle**, représentant respectivement le milieu équatorial (forêt dense), le milieu tropical humide (savane arbustive) et le milieu tropical sec (savane).

Toutes ces eaux ont des concentrations ioniques faibles, comprises entre 0,25 mequ.l⁻¹ et 2,5 mequ.l⁻¹. Ces concentrations augmentent presque toujours régulièrement des eaux de précipitations aux eaux de drainage profond au fur et à mesure que s'accroît le temps de contact avec le pédosystème sol-végétation. Mais les niveaux de concentration dans chaque type

NATURE ET MASSE TOTALE DES FRACTIONS SOLIDES en kg · ha ⁻¹ · an ⁻¹		EROSION HYDRIQUE DANS LA PARCELLE CULTIVEE (pente 7%)				
		S.T.	S.S.	E.T.	Sol	Coeff. de sélectivité
		80.000	10.000	90.000	(0-10cm)	
		7	8	9	10	11 (= 9/10)
Fractions granulométriques						
argiles	%	8,5	59,3	14,1	11,4	1,24
limons fins		1,4	21,9	3,7	2,8	1,32
limons grossiers		1,0	10,9	2,1	2,2	0,95
sables fins		17,6	8,8	16,6	29,5	0,56
sables grossiers		71,5	0	63,5	54,1	1,17
Fractions organiques						
Carbone	‰	13,12	75,16	20,01	10,8	1,85
Azote		1,15	5,14	1,59	0,84	1,89
Acides humides		-	-	-	1,45	-
Acides fulviques		-	-	-	1,46	-
Cations échangeables						
Ca	meq/100 g	1,91	1,99	1,92	0,82	2,34
Mg		0,42	1,81	0,57	0,46	1,25
K		0,28	0,56	0,31	0,14	2,22
Na		0,08	0,60	0,14	0,01	14
Éléments totaux						
P ₂ O ₅ total	‰	0,73	1,00	0,76	0,64	1,2
P ₂ O ₅ Olsen	‰	-	-	-	0,15	-
SiO ₂ combiné	%	-	-	-	-	-
Al ₂ O ₃ total	%	-	-	-	-	-
Fe ₂ total	%	-	-	-	-	-
Fe ₂ O ₃ libre	%	-	-	-	-	-
TiO ₂	%	-	-	-	-	-
Ca total	meq/100 g	2,42	4,30	2,63	2,08	1,26
Mg	"	1,01	8,66	1,86	1,70	1,09
K	"	0,49	7,12	1,23	1,20	1,03
Na	"	0,38	1,54	0,51	0,50	1,02

d'eau ne varient pas significativement d'une station à l'autre, en dépit des différences marquées de bilan hydrique (cf. fig. 4). Par contre la plupart des éléments chimiques (sauf Si et Na) montrent une diminution de leur concentration entre le niveau de drainage profond et le niveau sous-jacent de la nappe souterraine. Au niveau du sous-sol, les solutés semblent donc être immobilisés et/ou pompés biologiquement et cela de façon comparable dans toutes les stations malgré les forts contrastes des conditions bioclimatiques (ROOSE & LELONG 1981).

Les teneurs en carbone organique, généralement comprises entre 1 et 10 ppm, paraissent un peu moins élevées que les teneurs estimées en carbone minéral (HCO₃ atteint 40 à 50 mg/l dans les eaux de drainage), sauf dans les eaux de pluviollessivage et de ruissellement

où le carbone organique est relativement concentré.

En milieu cultivé, les concentrations ne sont guère modifiées tant que la demande (capacité d'absorption des éléments par les plantes et le sol) et l'offre d'éléments (fertilisation et minéralisation des matières organiques) sont équilibrées. Par contre, si le sol est dénudé (baisse du pouvoir de fixation) ou la fertilisation trop importante ou mal adaptée à la demande (déséquilibre), les teneurs en SO_4 , Cl (si engrais) et NO_3 (fumier, matière organique du sol), Ca, Mg et K augmentent considérablement dans les eaux de drainage; cependant les teneurs en PO_4 , Fe, Al et Si ne sont guère influencées et restent faibles dans les eaux de surface (ROOSE 1980).

4.2.2. Les charges solides

Le tableau 4 présente à titre d'exemple les compositions granulométriques et chimiques moyennes des deux fractions ("terre de fond" et suspensions), et de leur somme (terres érodées) transportées par les eaux de ruissellement à la station de Adiopodoumé (valeurs moyennes obtenues de 1965 à 1975) pour deux parcelles, l'une à végétation naturelle et l'autre cultivée (maïs). Les compositions des sols en place de ces parcelles sont également données par comparaison ainsi que la composition des terres remontées par la mésofaune (termitières, turricules de vers de terre). On met ainsi en évidence la **sélectivité de l'érosion** (colonne 6 et 11) vis-à-vis de certains constituants, notamment les fractions granulométriques fines (jusqu'à 20 ou 50 microns), les éléments organiques (C, N, P) et les cations échangeables (Ca, Mg, K, Na). La sélectivité est généralement plus prononcée dans les suspensions que dans les terres de fond.

La comparaison des parcelles de végétation naturelle et de cultures montre l'augmentation considérable de l'érosion totale et de la part des terres de fond dans le total érodé en milieu cultivé.

Les résultats obtenus dans les autres stations vont dans le même sens. Partout l'érosion augmente énormément quand le couvert végétal qui protège le sol est dégradé ou disparaît,

Tab. 5: COMPOSITION CHIMIQUE APPROXIMATIVE DES MATIERES SOLIDES TRANSPORTÉES PAR LES EAUX DE DRAINAGE DU SOL.

	%
SiO ₂ combinée	30
Al ₂ O ₃	25
Fe ₂ O ₃	3
Quartz	20
Carbone	7
Azote	0,7
Phosphore	0,07
Calcium	0,20
Magnésium	0,10
Potassium	0,02
Sodium	0,02
H ₂ O(+)	12
Total	98,11

La concentration moyenne pondérée par les volume (Cmpv) de ces matières dans les eaux de drainage profond est de $112 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ à Adiopodoumé, $269 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ à Korhogo et $150 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ à Saria.

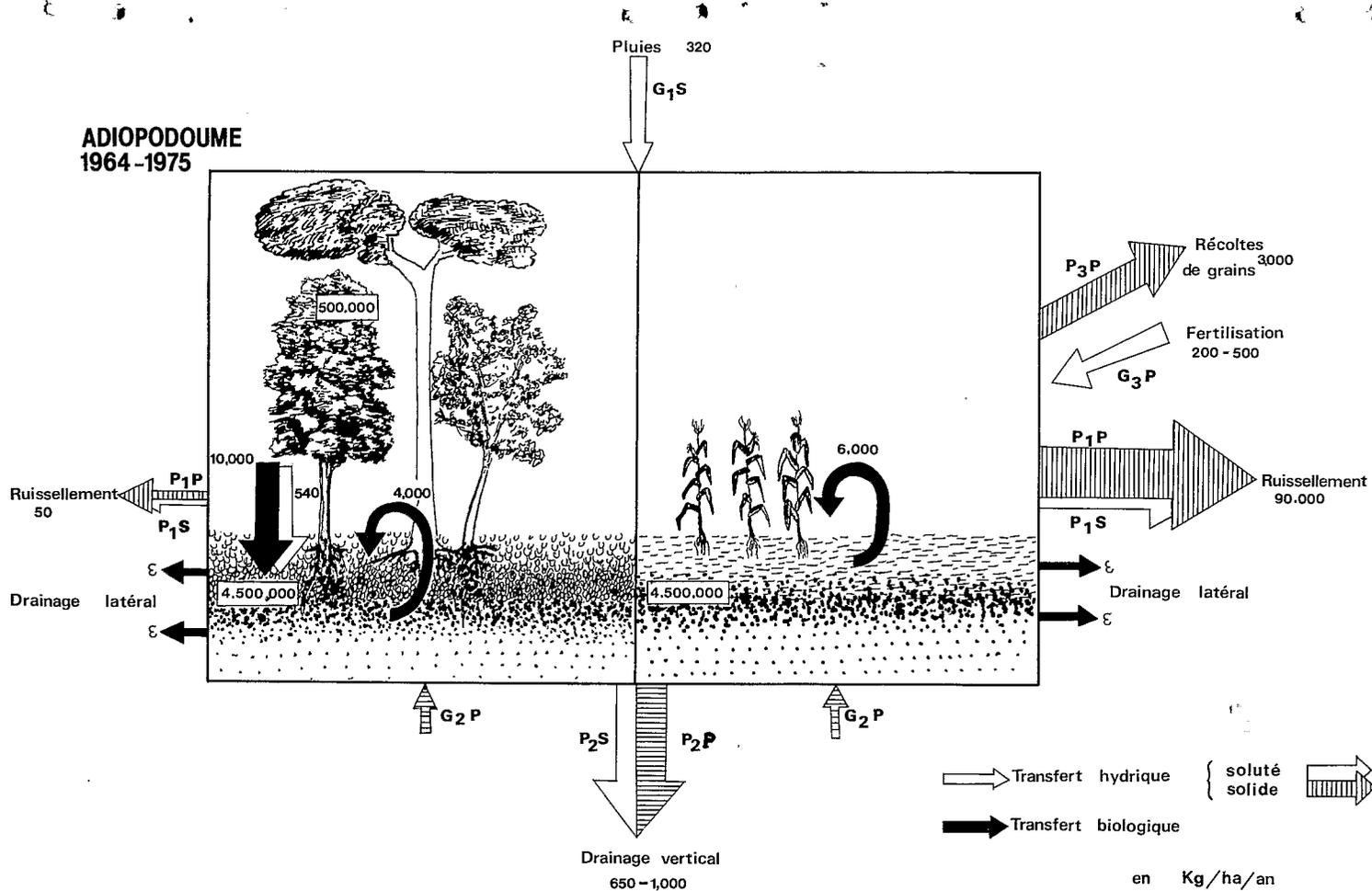


Fig. 5: Schématisation des différents flux de matière entrants et sortants et des flux ou cycles internes dans les pédosystèmes à végétation naturelle ou cultivée.

Les valeurs numériques correspondent aux divers flux de matières totales, évalués à Adiopodoumé (1964-1975), cf. tableau 6. Les flèches blanches indiquent les flux en solution, les flèches striées indiquent les transports par l'eau à l'état solide et les flèches noires indiquent les transferts par les agents biologiques (retombées végétales, remontées par la mésosfaune). Les stocks immobilisés dans la végétation et dans la tranche superficielle du sol (0 à 0,30 m) sont donnés dans des rectangles.

Tab. 6: BILANS GEODYNAMIQUES (en $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$) DE PARCELLES DE SOLS A VEGETATION NATURELLE OU CULTIVEES. STATION D'ADIOPOGOUME (1964-1975), COTE D'IVOIRE DU SUD (d'après ROOSE 1980, modifié). CHIFFRES ENTRE PARENTHESES = VALEURS OBTENUES PAR DIFFERENCE.

VEGETATION NATURELLE: FORET DENSE								
APPORTS			PERTES				\sum	Total %
Hauteur d'eau mm	Pluies 2100	Transf. biol. prof.	Erosion solide 10	Erosion soluté 10	Drainage solide 880	Drainage soluté 880		
	1	2	3	4	5	6	7	8
C	27	?	13	1,2	70	74	158	47
N	29		1,1	0,47	7	29	38	79
P	2,2		0,03	0,08	0,7	2,1	2,9	74
Ca	38	?	0,21	0,59	2	47	49	95
Mg	8,4		0,04	0,28	1	30	32	97
K	6,3		0,06	0,50	0,2	69	70	99
Na	17		0,01	0,20	0,2	25	26	99
SiO ₂	15	?	6,8	0,37	300	68	375	18
Al ₂ O ₃	1,7		6,4	0,03	250	2,8	259	1
Fe ₂ O ₃	0,8		2,3	0,08	30	2,5	35	7
SO ₄	25	?	—	0,33	—	50	50	100
Cl	44		—	0,29	—	48	49	100
HCO ₃	107		—	2,9	—	198	201	100
Quartz	—		(20)	0	(200)	0	(220)	0
Total	322	Fort	50	7,3	861	646	1565	42

Notes communes aux tableaux 6, 7 et 8

Le volume de pluies (colonnes 1 et 9), de ruissellement (colonnes 3, 4, 13 et 14) et de drainage (colonnes 5, 6, 15 et 16), est exprimé en mm à la ligne supérieure du tableau.

Colonne 1 et 9: les pluies sont captées 1,5 m au-dessus du sol.

Colonne 2 et 10: les remontées biologiques profondes (provenant de plus de 2 m de profondeur) n'ont pas été évaluées; elles sont probablement importantes sous végétation naturelle mais très réduites sous cultures sarclées.

Colonne 3 et 13: L'érosion solide est la somme des sédiments tractés grossiers et des sédiments fins en suspension dans le ruissellement (cf. le tableau 4 pour Adiopodoumé). Les valeurs de l'érosion solide obtenues pour la savane herbacée dégradée de Saria sont par excès par suite de la dégradation de la végétation naturelle; en milieu non dégradé cette érosion serait probablement limitée à 100-150 kg/ha/an.

comme cela se produit lors de l'utilisation agricole (ROOSE 1980).

Les matières en suspension contenues dans les eaux de drainage n'ont pas fait l'objet d'analyses complètes. Mais sachant qu'il s'agit de mélanges d'argiles (kaolinite, trace d'illite) et de sesquioxides amorphes (Al, Fe, SiO₂) avec un peu de quartz et des teneurs de carbone et d'azote assez élevées, leur composition peut être reconstituée approximativement (tableau 5).

4.3. ESQUISSES DE BILANS DE MATIERE

La dynamique actuelle de ces pédosystèmes peut être décrite de façon quantitative pour

CULTURES: MAIS FERTILISE

APPORTS				PERTES						
Pluies	Transf. biol. prof.	Fertili- sation	Total	Erosion		Drainage		Export. grains	\sum	Total %
2100				solide	soluté	solide	soluté		13+14+15+16	14+16 18
9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
27	?	0	27	1801	65	51	7,0	1300	1924	3,7
29		120	149	143	39	5,1	51	54	238	38
2,2		20	22	30	3,5	0,5	0,3	9	34	11
38	?	12	50	47	23	1,4	125	1,5	196	75
8,4		6	14	20	15	0,7	26	3	61	66
6,3		36	42	43	10	0,1	3,1	12	56	24
17		0	17	9,2	5,8	0,1	19	0,3	34	73
15	?	-	15	4520	18	220	35	3,9	4793	1,1
1,7		-	1,7	2370	1,5	183	1,9	0,6	2556	0,1
0,8		-	0,8	1630	3,9	22	1,9	0,5	1658	0,4
25	?	?	?	-	58	-	239	-	297	100
44		?	?	-	21	-	34	-	55	100
107		?	?	-	65	-	100	-	165	100
-		-	-	(79385)	0	(146)	-	-	(79531)	0
322	Faible	?	?	90000	327	630	642	3000	94599	1,2

Colonnes 5 et 15: les flux sont calculés à partir de la composition chimique approximative des particules fines recueillies avec les eaux de drainage dans les parcelles ERLO (voir tableau 5).

Colonnes 7 et 18: les pertes totales incluent les charges solides entraînées par les eaux de drainage profond mais non les éléments exportés avec les récoltes.

Colonne 11: la fertilisation est apportée sur les parcelles cultivées comme suit: P, Ca et Mg sont appliqués avant le semis, N et K en deux doses lors du billonnage.

Colonne 17: les valeurs d'exportation correspondent seulement aux teneurs dans les grains secs produits et non aux teneurs dans les résidus (pailles ...) qui sont comptés dans les cycles internes (cf. tableaux 9, 10 et 11).

Les valeurs entre parenthèses (colonnes 3, 5, 7, 13, 15 et 18) sont estimées par différence.

les parcelles à végétation naturelle comme pour les parcelles cultivées, en établissant les bilans annuels des pertes et des gains, c'est-à-dire les flux sortant et entrant au cours d'un cycle annuel, dans les limites fixées aux pédosystèmes (Fig. 5).

- Sont considérés comme gains les apports en solution dans les eaux de précipitation (g_{1s})* les apports par remontée biologique profonde (g_{2p})* (provenant de plus de 2 m de profondeur) et éventuellement, dans les parcelles cultivées, les apports dus à la fertilisation chimique (g_{3p}).

- Sont considérées comme pertes, d'une part les charges en solution dans les eaux de ruissellement (p_{1s})* de drainage vertical et oblique (p_{2s}), d'autre part les charges particulières transportées en surface par les eaux de ruissellement (p_{1p})* (terres de fond et suspension) et

* g_s = gain soluté; g_p = gain particulaire; p_s = perte soluté; p_p = perte particulaire

Tab. 7: BILANS GEODYNAMIQUES (en $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$) DE PARCELLES DE SOLS A VEGETATION NATURELLE OU CULTIVÉES. STATION DE KORHOGO (1967-1975), COTE D'IVOIRE DU NORD (d'après ROOSE 1980, modifié). CHIFFRES ENTRE PARENTHESES = VALEURS OBTENUES PAR DIFFERENCE.

VEGETATION NATURELLE: SAVANE (DEGRADEE)								
Hauteur d'eau mm	APPORTS		PERTES				Σ 3+4+5+6	Total %
	Pluies	Transf. biol. prof.	Erosion		Drainage			
	1350		solide 40	soluté 40	solide 250	soluté 250	7	4+6 7
	1	2	3	4	5	6	7	8
C	15	?	5,5	2,1	50	13	70	22
N	12		0,46	0,81	5	5,9	12	56
P	1,3		0,12	0,10	0,5	1,2	1,9	68
Ca	26	?	0,06	0,8	1,3	11	13	91
Mg	1,4		0,12	0,24	0,6	5,2	6,2	88
K	4,1		0,18	0,54	0,1	21	22	98
Na	2,0		0,06	0,14	0,1	2,6	2,9	94
SiO ₂	9,5	?	26	1,3	200	18	245	7,9
Al ₂ O ₃	0,9		22	0,15	168	2,7	193	1,5
Fe ₂ O ₃	1,8		6	0,12	20	0,58	27	2,6
SO ₄	13,5	?	—	0,97	—	16	17	100
Cl	4,1		—	0,53	—	8,9	9,4	100
HCO ₃	64,8		—	3,7	—	37	41	100
Quartz	—		(38)	0	(130)	0	(168)	—
Total	173	Fort	100	12	576	143	831	18,7

par les eaux de drainage (p₂p) (suspension). Dans les parcelles cultivées, les quantités de matière exportées avec les récoltes sont également comptées comme pertes (p₃p).

Ces différents termes des bilans apparaissent dans les tableaux 6 à 8, schématisant la dynamique actuelle dans trois stations prises comme exemple et montrant pour chacune d'elles l'influence de deux types de végétation (végétation naturelle et cultures). Ces tableaux indiquent la ventilation, élément chimique par élément chimique, des différents flux considérés. Toutes les valeurs présentées sont exprimées en kg/ha/an: ce sont les flux **moyens** interannuels correspondant à une année pluviométriquement moyenne (cf. bilan hydrique, tableau 2).

Ces tableaux ne sont que des schémas, encore incomplets; ainsi, les apports atmosphériques solides (aérosols) ou gazeux n'ont pas pu être mesurés, ni même évalués; de même les remontées biologiques profondes, g₂p, qui peuvent enrichir la tranche de 2 m superficielle du sol aux dépens des horizons plus profonds, n'ont pas pu être quantifiées. En ce qui concerne les pertes, on n'a pas reporté les valeurs correspondant aux transports solides et en solution, dûs aux eaux de drainage oblique; en effet, la part des volumes impliqués par la totalité des écoulements obliques dans le bilan hydrique annuel reste toujours faible, inférieure ou égale à 0,5%; les flux de matière correspondants sont donc négligeables. Par contre, les flux de matières solides en suspension dans les eaux de drainage vertical ont été comptabilisés (en prenant comme teneurs de matières en suspension celles collectées dans les niveaux les plus

CULTURES: MAIS FERTILISE

APPORTS				PERTES						
Pluies	Transf. biol. prof.	Fertili- sation	Total	Erosion solide	Erosion soluté	Drainage solide	Drainage soluté	Export. grains	\sum	Total %
1350				337	337	210	210		13+14+15+16	14+16 18
9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
15	?	0	15	64	18	42	2,5	800	126	16
12		90	102	4,4	6,7	4,2	4,2	38	19	58
1,3		20	21	1,2	0,81	0,4	0,29	6	2,7	41
26	?	30	56	4,0	7,0	1,1	7,6	4	20	73
1,4		15	16	2,7	2,0	0,5	1,3	2	6,5	51
4,1		70	74	6,5	4,5	0,1	1,5	9,6	13	46
2,0		0	2	2,3	1,2	0,1	0,9	0,2	4,5	47
9,5	?	—	9,5	811	10	168	12	1,2	1001	2,2
0,9		—	0,9	754	1,3	141	0,46	0,2	897	0,2
1,8		—	1,8	376	1,0	17	0,74	0,6	395	0,4
13,5	?	?	?	—	8,1	—	26	—	34	100
4,1		?	?	—	1,7	—	5,2	—	6,9	100
64,8		?	?	—	27	—	30	—	57	100
—	—	—	—	(3474)	0	(110)	0	—	(3584)	0
173	Faible	?	?	5500	89	482	93	2000	6164	3

profonds des cases ERLO* à 1,80 m sous la surface), car les débits drainant verticalement peuvent être importants; cependant les matières en suspension (M.e.s.) contenues dans les eaux de drainage n'ont pas été mesurées sous parcelle cultivée et on a admis en première approximation que leurs teneurs dans les eaux et leur composition (voir tableau 5) sont les mêmes que sous végétation naturelle.

En dépit de ces réserves, qui limitent la valeur absolue de chaque bilan considéré séparément, la comparaison des bilans station par station selon la nature du couvert végétal et pour un type d'utilisation donné du sol, le long de la séquence bioclimatique, met clairement en évidence le rôle de l'utilisation du sol et les facteurs climatiques généraux dans la dynamique pédologique actuelle.

4.4. STOCKS ET CYCLES INTERNES

Les tableaux 9, 10 et 11 regroupent, pour les trois stations prises comme exemple, les valeurs des quantités de matière, élément chimique par élément chimique, immobilisées dans chaque pédosystème sous forme de matière minérale ou organique permanente ("stocks")

* Ces teneurs sont un peu plus élevées que celles obtenues à profondeur égale dans les lysimètres: il semble qu'une part des matières en suspension reste piégée au fond de ceux-ci.

Tab. 8: BILANS GEODYNAMIQUES (en $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$) POUR DES PARCELLES DE SOLS A VEGETATION NATURELLE OU CULTIVEES. STATION DE SARIA (1971-1974), HAUTE-VOLTA CENTRALE (d'après ROOSE 1980, modifié). CHIFFRES ENTRE PARENTHESES = VALEURS OBTENUES PAR DIFFERENCE.

VEGETATION NATURELLE: SAVANE (DEGRADEE)								
APPORTS			PERTES					
Hauteur d'eau mm	Pluies 860	Transf. biol. prof.	Erosion		Drainage		\sum 3+4+5+6	Total % 4+6 7
			solide 42	soluté 42	solide 136	soluté 136		
	1	2	3	4	5	6	7	8
C	11	?	8,5	1,1	14	1,5	25	10
N	5,4		0,5	0,5	1,4	2,5	4,9	61
P	2,1		0,17	0,12	0,1	0,06	0,5	36
Ca	18	?	0,4	1,0	0,4	10,7	12	97
Mg	2,7		0,2	0,2	0,2	3,3	3,9	89
K	3,4		1,2	0,5	0,04	3,8	5,5	78
Na	1,0		0,2	0,2	0,4	6,4	6,8	97
SiO ₂	5,5	?	40	0,45	60	22	123	18
Al ₂ O ₃	0,3		30	0,02	50	0,2	80	0,3
Fe ₂ O ₃	0,3		11	0,06	6	0,1	17	1
SO ₄	13,5	?	-	0,9	-	4,6	5,5	100
Cl	3,2		-	0,3	-	3,1	3,4	100
HCO ₃	41,2		-	7,2	-	60	67	100
Quartz	0		(418)	0	(40)	0	(458)	0
Total	109,2	Fort.	510	12,5	172	118	812	16

ou impliquées dans des transferts internes au pédosystème ("cycles internes"). Ces tableaux sont incomplets car les remontées de la mésafaune et les transferts correspondant aux pluiolessivage n'ont pas été mesurées dans les parcelles cultivées.

Cependant la confrontation des chiffres des schémas de bilans avec les valeurs des stocks et des cycles internes permet de préciser le fonctionnement actuel des pédosystèmes et, comme on le verra, d'apprécier la vitesse de certains processus pédogénétiques actuellement en oeuvre dans ces sols.

5. DISCUSSION

5.1. COMPARAISON DES BILANS DES ECOSYSTEMES A COUVERT VEGETAL NATUREL

Les schémas de bilan correspondant aux parcelles à végétation naturelle (tableaux 6, 7, 8) montrent que, en milieu naturel peu ou pas perturbé:

- pour C, N, P, les pertes de matière (colonne 7) ne dépassent pas beaucoup les apports par les précipitations (colonne 1). Compte tenu des remontées biologiques profondes (colonne 2) et des apports par voie aérienne non comptabilisés, on peut considérer que les bilans sont **équilibrés** ou même excédentaires, ce qui signifie que pour ces éléments les écosys-

CULTURES: MAIS FERTILISE

APPORTS				PERTES						
Pluies	Transf. biol. prof.	Fertili- sation	Total	solide	Erosion soluté	solide	Drainage soluté	Export. grains	\sum	Total %
860				208	208	21	21		13+14+15+16	14+16 18
9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
11	?	0	11	150	5,4	2,2	0,3	900	158	3,6
5,4		97	102	11	3,5	0,2	1,6	40	17	30
2,1		22	24	2,5	1,3	0,02	0,02	6,4	3,8	35
18	?	-	18	6,1	8,4	0,06	2,7	0,2	17	65
2,7		-	2,7	6,9	2,4	0,03	0,7	3,2	10	31
3,4		50	53	38	8,6	0,01	0,6	6,8	47	20
1,0		-	1,0	5,5	1,0	0,01	1,1	0,3	8,0	26
5,5	?	-	5,5	1307	5,1	9,3	3,2	-	1325	0,6
0,3		-	0,3	1055	1,1	7,7	0,1	-	1064	0,1
0,3		-	0,3	238	1,0	0,9	0,1	-	240	0,5
13,5	?	36	49	-	23,2	-	0,4	-	24	100
3,2		?	?	-	9,0	-	0,4	-	9,4	100
42,1		-	?	-	36	-	9,2	-	45	100
0		0	-	(4480)	0	(6,2)	0	-	(4486)	0
109,2	Faible		?	7300	106	28	20	2000	7454	1,7

tèmes sont stables ou même qu'ils évoluent dans le sens de l'accumulation (augmentation des stocks).

- pour les cations, SiO_2 , Fe_2O_3 et Al_2O_3 , les pertes sont sensiblement plus fortes que les gains notamment pour K, Mg et Si. Mais elles restent modérées en valeur absolue et comme on le verra bien inférieures aux "cycles internes" qui renouvellent en continu les réserves minérales du sol.

- le bilan de Cl, élément mobile et peu impliqué dans les cycles biologiques est sensiblement équilibré.

Ces résultats se retrouvent dans les trois types de bioclimat, sous savane sèche comme sous forêt, car la diminution des apports de précipitations est compensée par la diminution des pertes par drainage. Ils peuvent être comparés avec les bilans chimiques établis par différents auteurs, sur des écosystèmes forestiers de diverses régions humides, par méthode hydrochimique à l'échelle de bassins versants, dont la synthèse a été faite récemment par FELLER & KIMMINS (1979); il apparaît un excédent de pertes très général pour les cations, de l'ordre de quelques kg à quelques dizaines de kg par an et par hectare, accompagnées de gains d'azote et souvent de phosphore. On voit que les mêmes tendances se retrouvent à l'échelle des parcelles expérimentales étudiées ici; d'un pédosystème à l'autre, l'importance des pertes semble être sensiblement proportionnelle à l'intensité du drainage, la composition chimique des solutions du sol étant relativement peu variable d'un bioclimat à l'autre (ROOSE & LELONG 1981).

Tab. 9: STOCKS (en $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) ET CYCLE INTERNES (en $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$) DANS DES PARCELLES DE SOLS A VEGETATION NATURELLE OU CULTIVES. STATION D'ADIOPODOUME (1964-1975), COTE D'IVOIRE MERIDIONALE (d'après ROOSE 1980, modifié).

(a) D'après HUTTEL et coll. (1975); (b) Phosphore total; (c) Phosphore OLSEN; (d) Cations échangeables.

VEGETATION NATURELLE: FORET DENSE					
	STOCKS			CYCLES INTERNES	
	Végétation permanente (a)	Sol (0-0,30 m)	Litière	Transferts mesofaune	Pluvio- lessivage (1800 mm)
	1	2	3	4	5
C	250000	46000	5000	122	106
N	1400	4300	218	11	16
P	100	1125 (b) 81 (c)	10	1,0	2,8
Ca	1200	167 (d)	68	1,3	30
Mg	530	151 (d)	38	1,4	31
K	600	66 (d)	59	0,78	64
Na	-	27 (d)	-	0,24	15
SiO ₂	-	308500	-	232	8,4
Al ₂ O ₃	-	217900	-	180	-
Fe ₂ O ₃	-	137100	-	101	-
SO ₄	-	-	-	-	25
Cl	-	-	-	-	44
HCO ₃	-	-	-	-	276
Quartz	-	(3200000)	-	(3350)	-
Total	510000	3900000	10000	4000	618

Par ailleurs, la part principale des pertes correspond dans les trois cas aux **transports de matières solides** (suspensions), entraînées par les eaux de drainage profond, et cela même dans le pédosystème équatorial où les pertes par dissolution chimique (lixiviation) sont connues comme étant très élevées. Par conséquent, dans les trois pédosystèmes considérés, évoluant sous couvert végétal naturel, le principal processus de différenciation pédologique actuellement en oeuvre est le **lessivage**, processus dont l'intensité ne semble pas pouvoir être égalée ou dépassée par la lixiviation, sauf peut-être sous climat équatorial hyper humide. Les processus évolutifs sont des processus de transfert essentiellement **vertical**.

Ce processus de lessivage n'implique pas nécessairement la formation de profils de sols "lessivés", avec une différenciation texturale marquée (présence d'un horizon B illuvial net). Les particules fines, entraînées par les eaux de drainage et maintenues dispersées sans doute par des enrobements de matières organiques, peuvent en effet migrer loin en profondeur et se déposer sous forme diffuse dans les horizons d'argiles tachetées ou encore être évacuées par l'écoulement des eaux de nappe; c'est le phénomène "d'appauvrissement généralisé" défini par CHAUVEL (1977).

5.2. EFFETS DE L'UTILISATION AGRICOLE DU SOL

Dans les parcelles cultivées, la forte augmentation du ruissellement s'accompagne d'une

CULTURE: MAIS FERTILISE					
	STOCKS		CYCLES INTERNES		
	Végétation permanente	Sol (0-0,30 m)	Residus de cultures	Transferts mesofaune	Pluviolessivage
	6	7	8	9	10
C	0	23310	2400	?	?
N		2310	48		
P		2093 (b) 313 (c)	13		
Ca	0	324 (d)	15	?	?
Mg		202 (d)	8,4		
K		70 (d)	54		
Na		10 (d)	0,6		
SiO ₂	0	308500	15	?	?
Al ₂ O ₃		217900	3,6		
Fe ₂ O ₃		137100	6		
SO ₄	0	-	18	?	?
Cl		-	-		
HCO ₃		-	-		
Quartz		(3800000)			
Total	0	4500000	6000	Faibles	?

majoration considérable de l'érosion solide (colonne 13). Par rapport au milieu naturel, l'érosion est multipliée par 15 à Saria, par 50 à Sorhogo et par plus de 1000 à Adiopodoumé; les autres termes des bilans peu modifiés, deviennent relativement secondaires.

Le processus évolutif de loin le plus important devient, dans les pédosystèmes cultivés, **l'érosion mécanique** sous forme d'enlèvement sélectif des fractions fines en suspension dans les eaux de ruissellement (phénomène "d'appauvrissement" défini par FAUCK en 1972) comme sous végétation naturelle, mais surtout de décapage superficiel du sol. Il en résulte une diminution de la sélectivité de l'érosion sous culture, en relation avec la diminution ou la dégradation du couvert végétal. Parallèlement les remontées biologiques de terres fines, elles aussi sélectivement enrichies, deviennent moins intenses.

Par rapport au milieu naturel, la dynamique pédologique est radicalement changée; les transferts sous culture deviennent essentiellement **latéraux** et leur intensité dépasse considérablement celle des processus observés sous végétation naturelle.

5.3. IMPORTANCE DES TRANSPORTS DE MATIERES SOLIDES

L'évolution actuelle de sols sous végétation naturelle ou cultivés représentatifs des conditions de climat équatorial, tropical humide ou tropical sec, peut être schématisée en quantifiant (tableau 12) les processus évolutifs principaux qui sont en oeuvre (lessivage vertical de

Tab. 10: STOCKS (en $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) ET CYCLES INTERNES (en $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$) DANS DES PARCELLES DE SOLS A VEGETATION NATURELLE OU CULTIVES. STATION DE KORHOGO (1967-1975), COTE D'IVOIRE SEPTENTRIONALE (d'après ROOSE 1980, modifié).

(a) Phosphore total; (b) Phosphore OLSEN; (c) Cations échangeables.

VEGETATION NATURELLE: SAVANE (DEGRADEE)					
STOCKS		CYCLES INTERNES			
Végétation permanente	Sol (0-0,30 m)	Litière	Transferts mesofaune	Pluviolessivage (1300 mm)	
1	2	3	4	5	
C	?	22280	2600	98	34
N		1208	10	5,2	2,3
P		533 (a) 58 (b)	1,5	2,1	0,3
Ca	?	466 (c)	15	4,3	5,2
Mg		216 (c)	10	2,9	3,8
K		173 (c)	15	8	13
Na		13 (c)	0,5	1	0,6
SiO ₂	?	762000	50	643	8,7
Al ₂ O ₃		729000	5	560	—
Fe ₂ O ₃		315800	3,7	200	—
SO ₄	?	—	7,5	—	8,6
Cl		—	—	—	6,3
HCO ₃		—	—	—	37,9
Quartz		(3200000)	—	—	0
	Très faibles	5 00000	5000	5000	121

particules, lixiviation et érosion mécanique); les chiffres représentent les masses par hectare et par an, impliquées par chaque grand processus pédologique.

Dans tous les cas d'études, on voit que les processus de **transports de matière à l'état solide** sont les plus importants par les quantités de matière qu'ils mettent en jeu; cela est vrai surtout dans les parcelles cultivées, où le sol temporairement mis à nu est exposé aux phénomènes de battance, sous l'effet de l'énergie cinétique des pluies, et à l'action érosive des eaux de ruissellement.

Cette conclusion est inattendue: dans la plupart des travaux anciens ou récents consacrés à la pédogenèse des régions intertropicales, les phénomènes d'altération sont étudiés essentiellement d'un point de vue minéralogique et géochimique (MILLOT 1964, LENEUF 1959, DELVIGNE 1965, LELONG 1969, BOCQUIER 1971, BOULET 1974, LEVEQUE 1975, WACKERMAN 1975, LEPRUN 1979, PION 1979, BLOT 1980), et les phénomènes de transferts particuliers (par voie hydrique ou biologique) sont rarement abordés. C'est sans doute la raison pour laquelle le rôle des transferts particuliers dans la différenciation pédologique est sans doute souvent sous-estimé.

Les colonnes (8 et 19) des tableaux 6, 7, 8 qui indiquent la part des pertes de matière sous forme dissoute montrent bien l'ampleur du phénomène. Si l'on tient compte des colloïdes transportés par les eaux de drainage, les pertes en solution sont minoritaires même dans la parcelle forestière équatoriale (milieu réputé fortement lixiviant); le pourcentage de matière dissoutes ne représente alors que 42%; ce pourcentage s'abaisse à 19% pour la parcelle de Korho-

CULTURE: MAIS FERTILISE					
	STOCKS		CYCLES INTERNES		
	Végétation permanentes	Sol (0-0,30 m)	Residus de cultures	Transferts mesofaune	Pluvio- lessivage
	6	7	8	9	10
C	0	22280	2400	?	?
N		1208	50		
P		533 (a) 5 (b)	5		
Ca	0	466 (a)	10	?	?
Mg		216 (a)	10		
K		173 (a)	45		
Na		13 (a)	0,5		
SiO ₂	0	762000	5,5	?	?
Al ₂ O ₃		729000	9		
Fe ₂ O ₃		315800	5		
SO ₄	0	—	3	?	?
Cl		—	—		
HCO ₃		—	—		
Quartz		(3500000)	—		
	0	5300000	5000	Faibles	?

go et à 16% pour la parcelle de Saria. Il est vrai que pour ces deux dernières parcelles, il ne s'agit pas de savane naturelle, mais seulement de jachères, relativement récentes. Dans les sols cultivés, l'importance des transports en solution diminue énormément, elle se limite à 1,2%, 3% et 1,7% respectivement dans les trois milieux étudiés.

La géodynamique actuelle de ces sols est essentiellement de nature mécanique (transports particuliers) et cela d'autant plus que le couvert végétal est plus dégradé.

5.4. COMPARAISON DES BILANS AVEC LES CYCLES INTERNES ET AVEC LES STOCKS (Fig. 6)

En comparant les résultats des tableaux 6 et 9, 7 et 10, 8 et 11, on remarque que dans les **pédosystèmes à végétation "naturelle"**, l'importance des pertes est relativement réduite, non seulement par rapport aux stocks immobilisés dans le sol, mais même par rapport aux apports renouvelés du pluviollessivage et des transports biologiques (chutes de litières, remontées par la mésofaune) qui fournissent chaque année au sol des éléments minéraux et nutritifs rapidement utilisables. Les flux de matière impliqués dans ces cycles internes sont globalement et pour chaque élément sensiblement plus élevés que les flux entrant ou sortant; grâce à ces transferts, l'horizon de surface du sol reçoit chaque année une plus grande quantité d'éléments chimiques (sauf parfois en Si et Al) qu'il n'en exporte sous forme solide ou en solution: cela

Tab. 11: STOCKS (en $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) ET CYCLES INTERNES (en $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$) DANS DES PARCELLES DE SOLS A VEGETATION NATURELLE OU CULTIVES. STATION DE SARIA (1971-1974), HAUTE-VOLTA CENTRALE (d'après ROOSE 1980, modifié).
(a) Phosphore total; (b) Phosphore OLSEN; (c) Cations échangeables.

VEGETATION NATURELLE: SAVANE (DEGRADEE)					
	STOCKS		CYCLES INTERNES		
	Végétation permanente	Sol (0-0,30 m)	Litière	Trnsnferts mesofaune	Pluvio- lessivage (800 mm)
	1	2	3	4	5
C	?	14454	1300	5,8	20
N		1130	5,4	0,3	0
P		280 (a) 40 (b)	0,54	0,1	1
Ca	?	1071 (c)	9,4	0,4	2,8
Mg		319 (c)	10,7	0,3	0,5
K		129 (c)	10,8	0,5	6,2
Na		32 (c)	-	0,1	0,2
SiO ₂	?	534000	2,7	-	0,9
Al ₂ O ₃		464000	4,1	-	-
Fe ₂ O ₃		127000	2,7	5,3	-
SO ₄	?	-	0,8	-	0,1
Cl		-	-	-	0,8
HCO ₃		-	-	-	21,1
Quartz		(3900000)	-	-	-
	Très faible	5100000	2700	400	52

permet la croissance végétale et une relative accumulation des éléments nutritifs dans l'horizon superficiel. La très forte intensité des cycles biogéochimique (turn-over) peut expliquer le plafonnement des pertes à la fois chimiques (ROOSE & LELONG 1981) et solides.

Au contraire **dans les milieux dégradés ou cultivés**, l'augmentation énorme des pertes par érosion s'accompagne de la baisse d'intensité des cycles internes, même si les résidus de culture sont conservés et restitués au sol comme cela est indiqué dans la colonne (8) des tableaux 9,10 et 11; les remontées de terre par la mésofaune sont en effet probablement beaucoup plus réduites que sous végétation naturelle. Au total les pertes sont loin d'être équilibrées et les pédosystèmes évoluent dans les sens d'un épuisement en tous les éléments minéraux et nutritifs nécessaire à la croissance végétale et à l'activité biologique; en outre, l'érosion sélective (enlèvement préférentiel des fractions fines et colloïdales relativement riches en éléments nutritifs) entraîne le phénomène d'appauvrissement, la structure des horizons superficiels se dégrade, ce qui explique l'apparition de phénomènes de battance et le développement du ruissellement.

Ce processus d'appauvrissement est très rapide en milieu cultivé. En supposant la tranche superficielle du sol (0 à 0,30 m) initialement homogène du point de vue textural, on calcule facilement, connaissant les quantités de fractions fines exportés par l'érosion chaque année (cf. colonne 3 des tableaux 6, 7 et 8) qu'il suffit de quelques centaines d'années à Adiopodoumé, un peu plus de mille ans à Korhogo et seulement cent cinquante ans à Saria pour expliquer l'existence de l'horizon appauvri actuel. La rapidité de ce processus, contraste avec la lenteur

CULTURE: SORGHO FERTILISE					
STOCKS			CYCLES INTERNES		
	Végétation permanente	Sol (0-0,30)	Residus m)de culture	Transferts mesofaune	Pluvio- lessivage
	6	7	8	9	10
C	0	18840	2300	?	?
N		1578	15		
P		416 (a) 20 (b)	1,8		
Ca	0	1063 (c)	3,6	?	?
Mg		294 (c)	9,3		
K		148 (c)	58,5		
Na		32 (c)	-		
SiO ₂	0	534000	36	?	?
Al ₂ O ₃		464000	2,3		
Fe ₂ O ₃		127000	2,7		
SO ₄	0	-	2,3	?	?
Cl		-	-		
HCO ₃	-	-			
Quartz		(3700000)			
	0	4900000	4500	Faibles	?

des processus d'altération (LENEUF 1959, TARDY 1969, TROY 1978), de l'ordre de 50.000 à 200.000 ans, durée nécessaire pour altérer complètement 1 an de roche sous climat tropical humide.

6. CONCLUSION

Les résultats acquis en mesurant la plupart des transferts solides et en solution pendant 4 à 11 années consécutives sur des parcelles expérimentales (100 à 300 m²) représentatives de différents pédosystèmes "naturels" (forêt, savane, jachère sèche) ou cultivés (maïs, sorgho) représentatifs d'Afrique de l'Ouest montrent:

1 Dans les parcelles couvertes de végétation naturelle, peu dégradée ou reconstituées (forêt, savane, jachère), l'évolution actuelle du sol correspond à des exportations de matières en solution ou particulaires d'importance absolue limitée, de l'ordre de quelques centaines de kg/ha/an; le processus de différenciation pédologique le plus intense semble être le lessivage de colloïdes, sauf dans les savanes sèches passablement dégradées où l'érosion mécanique peut devenir relativement plus importante, et dans la forêt hyper humide où la lixiviation chimique devient le processus dominant. La différenciation pédologique résulte de transferts de matière surtout verticaux.

2 Dans les parcelles mises en culture, l'érosion mécanique par les eaux de ruissellement

Tab. 12: QUANTIFICATION DES PROCESSUS PRINCIPAUX DE DIFFERENCIATION PEDOLOGIQUE ACTUELLE.
LES CHIFFRES INDIQUENT LES FLUX (en $\text{kg}/\text{ha}^{-1}/\text{an}^{-1}$) CORRESPONDANT AUX PROCESUS DE DIFFERENCIATION INDICUES.

	PARCELLE A VEGETATION NATURELLE			PARCELLE CULTIVEE		
ADIOPODOUME Climat équatorial	lessivage \approx lixiviation \gg érosion mécanique			érosion \gg lessivage \approx lixiviation mécanique		
	861	646	50	90.000	630	642
KORHOGO Climat tropical	lessivage $>$ lixiviation \approx érosion mécanique			érosion \gg lessivage $>$ lixiviation mécanique		
	576	143	100	5.500	482	93
SARIA Climat tropical sec	érosion $>$ lessivage \approx lixiviation mécanique			érosion \gg lessivage \approx lixiviation mécanique		
	510	172	118	7.300	28	20

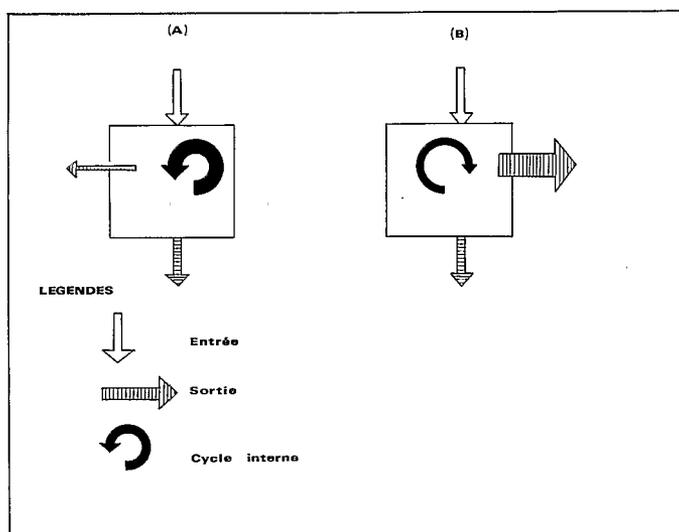


Fig. 6: Importance relative des flux entrants et sortants, et des cycles internes dans les pédo-systèmes étudiés.

(A) à gauche, milieu naturel: équilibre entrées-sorties, importance relative des cycles internes.
(B): à droite, milieu cultivé: déséquilibre entrées-sorties, faible importance relative des cycles internes.

augmente considérablement (20 à 1.000 fois selon les stations); ce processus devient le processus majeur de la dynamique actuelle des sols. La différenciation pédologique résulte de transferts de matière surtout horizontaux.

3 La part des transports de matières solides, déjà importante dans les parcelles à végétation naturelle, y compris en milieu forestier humide réputé très hydrolysant, devient largement prépondérante dans les parcelles cultivées: les phénomènes d'appauvrissement de l'ho-

rizon de surface, par érosion sélective des fractions fines ou même par décapage complet de l'horizon superficiel, se produit alors avec une grande rapidité (quelques siècles) par rapport aux phénomènes d'altération.

4 Quoique difficiles à estimer, les cycles internes (remontées de terre par la mésofaune, retombées des feuilles et débris végétaux) mettent en jeu dans les parcelles couvertes de **végétation naturelle**, des quantités de matières largement supérieures aux quantités exportées par drainage ou par érosion; le turn-over est très important par rapport aux flux de matières sortants: le sol est renouvelé et reste potentiellement très productif. Dans les **parcelles cultivées** l'augmentation énorme des pertes par érosion et la diminution des cycles internes provoquent, outre l'épuisement rapide des réserves minérales du sol, la diminution de la stabilité structurale et l'apparition de phénomènes de battance, d'érosion sélective des fractions fines ou même de décapage et de ravinement de l'horizon superficiel.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été soutenu par l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (O.R.S.T.O.M.) avec l'appui technique et financier des organismes dont la liste est indiquée sur la figure 1.

REFERENCES

- ARCHAMBAULT, J. (1960): Les eaux souterraines d'Afrique Occidentale. Berger-Levrault Ed. Nancy, 137 p.
- BERNHARD, F. (1970): Etude de la litière et de la contribution au cycle des éléments minéraux en forêt ombrophile de Côte d'Ivoire. *Oecol. Plant.* **5**, 247-266.
- BLOT, A. (1980): L'altération climatique des massifs de granite du Sénégal. *ORSTOM, Trav. et Doc.* no. **114**, 434 p.
- BOCQUIER, G. (1971): Genèse et évolution de deux toposéquences de sols tropicaux du Tchad. Interprétation biogéodynamique. Thèse Sci., Strasbourg, et *Mém. ORSTOM*, **62** (1973), 350 p.
- BOIS, J.F. & ROOSE, E.J. (1980): Quelques réflexions sur les résultats de nature systématique d'humidité à la sonde à neutrons dans un sol ferrallitique de Côte d'Ivoire. *Cahier ORSTOM, Sér. Hydrologie*, **15**, 4, 351-363.
- BOULET, R. (1974): Toposéquences de sols tropicaux en Haute-Volta. Equilibres dynamiques et bioclimats. Thèse Sci., Strasbourg, et *Mém. ORSTOM*, **85**, 272 p.
- CHAUVEL, A. (1977): Recherches sur la transformation des sols ferrallitiques dans la zone tropicale à saisons contrastées. *Travaux de Documents de l'ORSTOM*, **62**, 532 p.
- DELVIGNE, J. (1965): Pédogenèse en zone tropicale - La formation des minéraux secondaires en milieu ferrallitique. *ORSTOM, Mémoires no. 13*, 177 p.
- DUPRAZ, C., LELONG, F., TROY, J.P. (1982): Comparative study of the effects of vegetation on the hydrological and hydrochemical flows in three minor catchments of Mont Lozère (France) - Methodological aspects and first results. *Comm. Intern. Coll. Hydrology, Berne* 21-23 sept. 82.
- FAUCK, R. (1972): Les sols rouges sur sables et sur grès d'Afrique Occidentale. *Mém. ORSTOM, Paris*, **61**, 257 p.
- FELLER, M.C. & KIMMINS, J.P. (1979): Chemical characteristics of small streams near Haney in Southwestern British Columbia. *Water Resources Research*, Vol. **15** no. **2**, 247.
- FOURNIER, F. (1954): La parcelle expérimentale. Extrait Rapport Mission OELE "Etude des sols" aux USA (T.A. 38.63), *ORSTOM, Bondy*.
- GOUZY, M. (1973): Méthodes d'analyses utilisées dans le laboratoire d'analyses du Centre ORSTOM d'Adiopodoumé. Rapport multigraphié, *ORSTOM, Abidjan*, 432 p.
- HARRISON, J.B. (1933): The catamorphism of igneous rocks under humid tropical conditions. *Imp. Bur. Soil Sci. Harpenden*, 79 p.
- HUTTEL, C. & BERNHARD-RESERVAT, F. (1975): Recherche sur l'écosystème de la forêt subéquatoriale de Basse Côte d'Ivoire. *Revue Ecologie appliquée*, **29**, 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, 11-24.
- LELONG, F. (1969): Nature et Genèse des produits d'altération de roches cristallines sous climat tropical humide (Guyana française). Thèse Fac. Sci. Nancy, 182 p. et Mémoire Sci. de la Terre, **14**, 188 p.
- LENEUF, N. (1959): L'altération des granites calco-alcalines et des granodiorites en Côte d'Ivoire forestière et les sols qui en sont dérivés. O.R.S.T.M., Paris, 210 p.
- LEPRUN, J.C. (1979): Les cuirasses ferrugineuses et les pays cristallins de l'Afrique Occidentale sèche. Genèse. Transformations. Dégradation.
- LEVEQUE, A. (1975): Pédogenèse sur le socle granitogneissique du Togo. Différenciation des sols et remaniements superficiels. Thèse Sci., Univ. L. Pasteur, Strasbourg, 301 p.
- LIKENS, G.E., BORMANN, F.M., PIERCE, R.S., EATON, J.S. & JOHNSON, N.M. (1967): Biochemistry of a forested ecosystem. Springer Verlag, New-York, 146 p.
- MILLOT, G. & BONIFAS, M. (1955): transformations isovolumétriques dans le phénomène de latéritisation et bauxitisation. *Bull. Serv. Carte Géol. Als. Lorr.*, **8**, 3-20.
- MILLOT, G. (1964): Géologie des argiles. Masson et Cie Ed., Paris, 499 p.
- MUTTEL, C. & BERNHARD-RESERVAT, 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. *Ecol. appl.*, **29**, 203-228.
- NALOVIC, L. (1968): Les méthodes d'analyse des sols et des eaux utilisées dans le laboratoire du Centre ORSTOM d'Adiopodoumé. Rapport multigraphié, ORSTOM, Abidjan, 123 p.
- PION, J.C. (1979): L'altération des massifs cristallins basiques en zone tropicale sèche. Etude de quelques toposéquences en Haute-Volta. Thèse Sci. Univ. L. Pasteur, Strasbourg, 222 p.
- ROOSE, E.J. & DES TUREAUX, M. (1970): Deux méthodes de nature du drainage vertical dans les sols en place. *Agron. Tropicale*, **25**, **12**, 1079-1087.
- ROOSE, E.J. (1975): Contribution à l'étude de l'influence de la mésosfaune sur la pédogenèse actuelle en milieu tropical. Rapport 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 et cultivées. Thèse Doc. Sci. Université d'Orléans, 587 p.
- ROOSE, E.J. & LELONG, F. (1973): Les facteurs de l'érosion hydrique en Afrique tropicale. *Revue physique et Géologie dynamique*, **XVIII**, **4**, 367-374.
- ROOSE, E.J. & LELONG, F. (1981): Factors of the chemical composition of seepage and groundwaters in the intertropical zone (West Africa). *Journal of Hydrology*, **54**, 1-22.
- ROOSE, E.T., LELONG, F. & COLOMBANI, J. (1983): Influence du bioclimat et de l'aménagement des sols sur les éléments du bilan hydrique en Afrique de l'ouest. *Hydro. Sci. J.*, **28**, 283-308.
- TARDY, Y. (1969): Géochimie des altérations. Etude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique. Thèse Univ. Strasbourg et Mem. Serv. Carte Géol. Als. Corr. **31**, 199 p.
- TROY, J.L. (1979): Pédogenèse sur roches charnockitiques en région tropicale humide de montagne dans le Sud de l'Inde. Thèse Univ. Nancy. 390 p.
- TURC, L. (1961): Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle. *Ann. Agro.*, **12**, **1**, 13-49.
- WACKERMANN, J.M. (1975): L'altération des massifs cristallins basiques en zone tropicale semi-humide. Etude minéralogique et géochimique des arènes du Sénégal oriental. Conséquences pour la cartographie et la prospection. Thèse Sci. Strasbourg, 373 p.
- WISCHMEIER, W.H. (1962): Rainfall erosion potential. *Agr. Eng.*, **43**, 212-215.

Addresses of authors:

F. Lelong, Laboratoire de Géologie Appliquée, Domaine Universitaire
45046 Orléans-Cedex, France.
E. Roose, G. Aubert, R. Fauck, ORSTOM, 24 rue Bayard,
75008 Paris, France.
G. Pedro, I.N.R.A., Laboratoire des Sols, CNRA, route de Saint Cyr,
78000 Versailles, France.

CATENA

AN INTERDISCIPLINARY JOURNAL OF

SOIL SCIENCE

HYDROLOGY - GEOMORPHOLOGY

FOCUSING ON

GEOECOLOGY AND LANDSCAPE EVOLUTION

EDITORS:

F. Ahnert, Aachen
 G. Bartels, Köln
 L. Berry, Worcester, Mass.
 J. J. Bigarella, Curitiba
 H.-P. Blume, Kiel
 J. Bouma, Wageningen
 B. Bunting, Hamilton, Ont.
 P. A. Burrough, Utrecht
 K. Butzer, Austin
 R. B. Bryan, Toronto
 G. Castany, Orléans
 J. Demek, Brno
 I. Douglas, Manchester
 G. H. Dury, Cambridge
 A. R. Eschner, Syracuse, N. Y.
 H. Faure, Marseille
 H. Fölster, Göttingen
 O. Fränzle, Kiel
 R. Herrmann, Bayreuth
 K. Hirakawa, Yamanashi
 J. v. Hoyningen-Huene, Braunschweig
 A. C. Imeson, Amsterdam
 P. D. Jungerius, Amsterdam
 J. Kukla, Palisades
 L. B. Leopold, Berkeley
 J. A. Mabbutt, Kensington

B. Messerli, Bern
 B. Meyer, Göttingen
 P. Michel, Strasbourg
 R. B. Morrison, Denver
 D. Newson, Wallingford
 R. Paepe, Brüssel
 M. Pesci, Budapest
 J. de Ploey, Leuven
 R. Pullan, Liverpool
 R. V. Ruhe, Bloomington, Ind.
 A. Ruellan, Paris
 M. Sarntheim, Kiel
 A. P. Schick, Jerusalem
 A. Semmel, Frankfurt
 O. Slaymaker, Vancouver
 L. Starkel, Krakow
 O. Strelbel, Hannover
 U. Streit, Münster
 J. B. Thornes, London
 A. Velichko, Moskva
 J. Vogt, Strasbourg
 R. Webster, Harpenden
 D. H. Yaalon, Jerusalem
 A. Young, Nairobi/Norwich

CHIEF EDITOR:

H. Rohdenburg, Braunschweig

CATENA VERLAG