

# INFLUENCE DES APPORTS ATMOSPHERIQUES ET DU PLUVIOLESSIVAGE FORESTIER SUR LA QUALITE DES EAUX DE DEUX BASSINS VERSANTS EN COTE D'IVOIRE

Philippe MATHIEU

Géologue de l'O.R.S.T.O.M.

Centre de N'Djamena

B.P. 65 - N'Djamena (Tchad)

## RÉSUMÉ

Une comparaison est tentée entre les apports au sol en éléments minéraux par les eaux de pluie et les quantités de ces mêmes éléments exportées par les eaux d'écoulement de deux bassins versants tropicaux, l'un en savane, l'autre sous forêt mésophile. Dans l'évaluation des apports dus aux précipitations, le rôle du pluviollessivage de la voûte forestière est pris en considération.

Les résultats font apparaître une très forte contribution des apports atmosphériques qui perturbent profondément les bilans géochimiques des bassins. En savane, ces apports représentent environ 40 % des quantités d'éléments évacuées par les eaux d'écoulement du bassin. En forêt, l'apport cumulé des pluies incidentes et du pluviollessivage est très largement supérieur aux quantités exportées par le réseau (de 150 à plus de 400 % selon les éléments).

En savane, l'absence d'une couverture végétale dense réduit les phénomènes de rétention biologique. De plus, une nappe d'arène dans l'épaisseur de laquelle a été mis en évidence un gradient de concentrations, nourrit en éléments soutirés du socle l'écoulement de base.

En forêt, le milieu biologique intervient fortement sur la migration des éléments en les libérant et en les consommant de manière sélective. Une forte rétention en eau se traduit par de très importants déficits d'écoulement limitant ainsi les possibilités de migration. Un ordre de lessivage croissant est donné en calculant pour chaque élément le rapport entre les quantités déposées sur le bassin forestier et les quantités exportées ; on obtient :

$PO_4 < K < Rb < Cu < SO_4 < Cr = Mn < Al < V < Li < Ni < Fe < Ca < SiO_2 < Sr < Ba < Cl < Mg < Na < Ti$

## ABSTRACT

A comparison has been attempted between the mineral inputs of pluvial origin and the quantities of the same elements washed out by the stream flow of two tropical watersheds, one in the savanna, the other under a rainforest. In evaluating the input due to rainfall, the role of the rain washout of the forest canopy is taken into consideration.

The results reveal a considerable contribution of atmospheric inputs which greatly perturb the geochemical budget of the watersheds. In the savanna this input is equal to approximately 40 % of the elements evacuated by the water outflow. In the forest the cumulated input of the rainfall and the rain washout of the forest canopy is vastly superior to the network's output (150-400 % according to the elements).

In the savanna the absence of dense vegetation reduces biological retention. In addition, a water table in which a gradient of concentrations is apparent, supplies the base flow in elements extracted from the bedrock.

In the rainforest, the bio-environment influences the transfer of elements by selectively liberating and retaining them. A high water retention rate reduces the water outflow thus limiting transfer potential. An increasing mobility scale has been calculated by determining the input/wash out ratio for each element :

$PO_4 < K < Rb < Cu < SO_4 < Cr = Mn < Al < V < Li < Ni < Fe < Ca < SiO_2 < Sr < Ba < Cl < Mg < Na < Ti$

## РЕЗЮМЕ

Был сделан опыт сравнения между поступлением в почву принесенных дождевыми водами элементов и количествами тех же элементов, вынесенных стоком двух тропических водосборов, один из которых находится в саванне, а другой под мезофильным лесом. При оценке осадочных привносов учитывается роль дождевого выщелачивания лесным сводом.

Результаты выявляют значительную величину атмосферных привносов, глубоко нарушающих геохимические балансы водосборов. В саванне эти привносы составляют примерно 40 % количества выносящихся стоком водосбора элементов. В лесу, совокупность падающих дождей и дождевого выщелачивания в значительной степени превосходят выносящиеся гидрографической сетью количества (от 150 до более 400 %, в зависимости от элемента).

В саванне, отсутствие густого растительного покрова ограничивает явления биологического задерживания. Кроме того, гравийный пласт, в толще которого был определен градиент концентраций, питает поступающими из цоля элементами основной сток.

В лесу, биологическая среда сильно влияет на миграцию элементов, выделяя и селективно потребляя их. Значительная удержка воды проявляется повышенными дефицитами стока, ограничивая таким образом возможности миграции. Устанавливается восходящий порядок выщелачивания путём вычисления, для каждого элемента, отношения между поступающими в лесной бассейн и выносящимися количествами; получается следующий ряд:

$$PO_4 < K < Rb < Cu < SO_4 < Cr = Mn < Al < V < Li < Ni < Fe < Ca < SiO_2 < Sr < Ba < Cl < Mg < Na < Ti$$

## INTRODUCTION

Dans le cadre de l'étude des phénomènes actuels d'érosion de transport et de sédimentation en milieu tropical, le bassin versant du fleuve Bandama en Côte d'Ivoire a été choisi. Ce bassin a une superficie de 100 000 km<sup>2</sup>. Ses eaux d'écoulement ont été échantillonnées en différentes stations réparties du nord vers le sud de manière à évaluer qualitativement et quantitativement les transports d'éléments en solution et sous forme particulaire. A cet égard il a été tenu compte de l'origine des apports et de l'influence des différents régimes hydrologiques dus aux variations en latitude du climat et du couvert végétal.

Il a donc été nécessaire de tirer partie des contrastes du milieu naturel en étudiant de manière plus détaillée deux bassins de superficie réduite (fig. 1) représentatifs l'un d'une savane sur substratum granitique au nord (bassin versant du Losérigué), l'autre d'une forêt dense sur substratum schisteux au sud (bassin versant de l'Amitioro).

Sur chacun de ces bassins la composition chimique des eaux météoriques a été étudiée en vue de déterminer leur influence sur la composition des eaux d'écoulement. C'est ce point particulier qui est abordé dans cette note. En milieu forestier l'apport minéral par les eaux de pluie lessivant la voûte forestière avant d'atteindre le sol est pris en considération. C'est ce qui est désigné ci-dessous par le terme de pluviolessivage.

Les prélèvements sur chacun des bassins se sont échelonnés entre 1963 et 1968.

## LES CARACTÈRES PRINCIPAUX DU MILIEU NATUREL

*Morphologie*

Les principaux caractères physiques des deux bassins versants sont rassemblés dans le tableau 1. La superficie des bassins est respectivement de 3,6 km<sup>2</sup> pour le Losérigué et de 170 km<sup>2</sup> pour l'Amitioro. Sur chacun, une station d'étude des eaux de ruissellement représentative d'une surface drainée de quelques hectares est suivie à l'amont (ravineau de 1<sup>er</sup> ordre).

Le réseau hydrographique est peu organisé sur le Losérigué, tandis qu'il est dense et bien ramifié sur le bassin forestier de l'Amitioro. Sur ce bassin, ce modelé serait hérité d'une phase érosive plus active que l'actuelle antérieure à l'invasion forestière contemporaine de la dernière transgression.

*Climat*

Les deux bassins sont soumis à un climat tropical humide et chaud mais subissent diversement les influences océaniques. Le bassin du Losérigué, plus éloigné des côtes du Golfe de Guinée (600 km) subit un climat de type soudano-guinéen avec des précipitations qui sont concentrées en une saison unique étalée de mai à septembre avec un maximum de pluviosité en août.

Le bassin de l'Amitioro est situé plus près de l'océan (80 km). Il subit un climat de type guinéen avec des pluviosités à peu près semblables mais

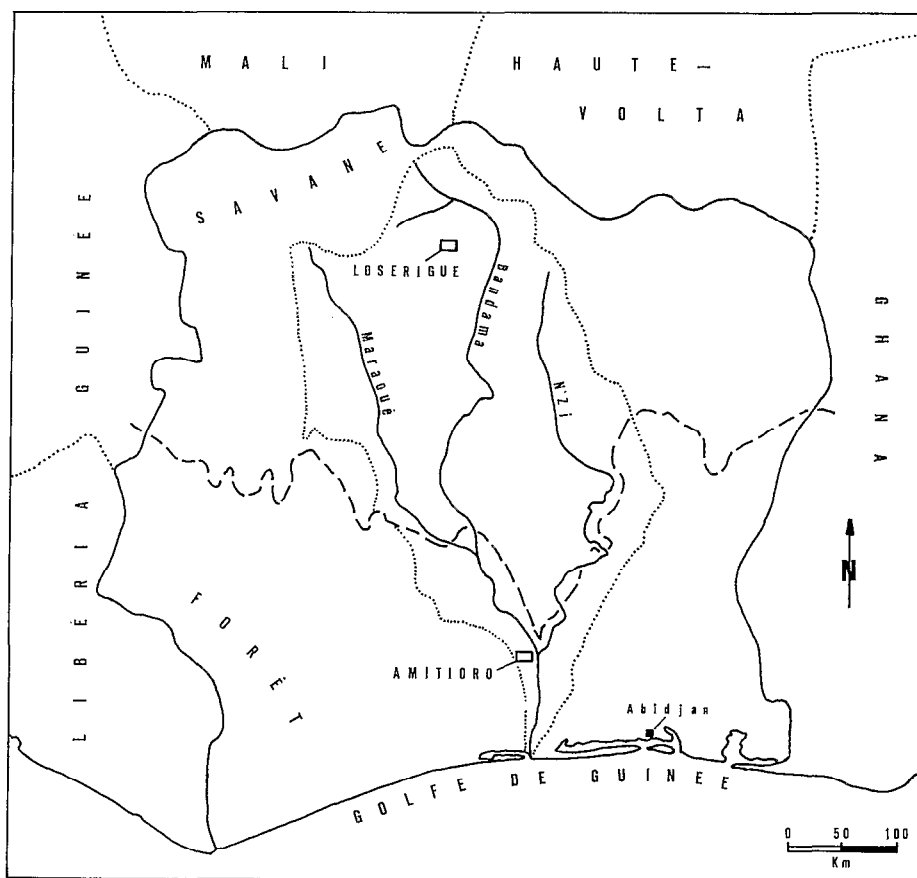


Fig. 1. — Carte de situation. En trait discontinu : limite nord de la forêt dense.

réparties sur deux saisons d'importance inégale (avril à mi-juillet et septembre à novembre).

Les déplacements du front intertropical entraînent des alternances de masses d'air humide d'origine océanique (mousson) et de masses d'air sec d'origine continentale (harmattan). Au sol, le régime d'harmattan peut s'installer pendant 3 à 5 mois dans le domaine soudano-guinéen tandis que dans le domaine guinéen son influence ne persiste que 15 jours à 1 mois. Par contre, sa présence en altitude est souvent décelée en basse Côte d'Ivoire par la formation d'une brume sèche constituée par des particules d'origine saharienne.

#### La végétation

La végétation du bassin nord (Loserigué) est composée d'une savane herbacée à *Andropogon* et *Panicum phrogmiloïdes*. Une partie de la surface du bassin est occupée par des cultures vivrières.

Le bassin de l'Amitiéro appartient au domaine guinéen qui possède un climax de forêt dense humide

semi-décidue du type fondamental à *Cellis sp.* et *Triplochiton scleroxylon*. Suivant les conditions de drainage, deux aspects édaphiques peuvent être distingués : en milieu bien drainé (interfluves) croissent de nombreuses espèces mésophiles, tandis que dans les talwegs et les bas-fonds, milieux à engorgement temporaire, ne subsistent que quelques espèces ripicoles. La forêt de l'Amitiéro est une formation secondaire vieillie.

#### Le socle et les altérations

Le bassin du Loserigué est établi sur des granites calco-alcalins et sur des migmatites d'âge birrimien. Le toit de cette formation qui affleure à l'exutoire formant seuil, s'enfonce progressivement vers l'amont sous une épaisse couche d'altération (20 à 25 m).

Ce bassin se situe à la limite nord des sols ferrallitiques faiblement désaturés. PERRAUD et CHERROUX (1963) ont mis en évidence une double évolution : les sols rouges et ocres de plateaux et de pentes correspondent à d'anciens sols ferrallitiques tronqués

tandis que les sols beiges et gris de pente et de bas de pente évoluent actuellement en sols ferrugineux tropicaux. La masse d'argiles kaoliniques rajeunies sert de roche mère aux sols ferrugineux tropicaux actuels. TARDY (1969) et LENOIR (1972) mettent en évidence l'étroite relation existant entre les niveaux piézométriques et la tendance qu'ont les eaux de drainage à être en équilibre thermodynamique avec les phases argileuses : kaolinique-montmorillonitique en fin de saison sèche, franchement kaolinique en période humide.

Le bassin de l'Amitiéro est situé sur les roches métamorphiques schisteuses qui occupent le panneau sud-est du bassin de Bandama. A l'ouest, la ligne de partage des eaux est marquée par un alignement de collines formées de schistes tufacés, de quartzites et de gondites, les sommets étant constitués par des pointements de « roches vertes ».

La partie centrale du bassin repose sur des schistes et des grauwaaks peu métamorphisés appartenant au birrimien flyschöide.

A l'extrémité est du bassin, quelques batholites granitiques entourés de leur auréole de métamorphisme de contact dominant une zone déprimée dans laquelle se distinguent deux niveaux de haute et de basse terrasses. Aucun affleurement n'apparaît et l'ensemble du bassin est recouvert par un épais manteau d'altérites.

Les sols de ce bassin se différencient, d'après leur position topographique et les conditions de drainage, en sols faiblement ferrallitiques et en sols hydromorphes minéraux. Leur nature est essentiellement limoneuse et ils présentent un fort pouvoir de rétention en eau. La kaolinite domine dans la fraction argileuse mais reste toujours associée à des micas-illites. Le complexe gonflant reconnu sur des diffractogrammes réalisés sur les suspensions des eaux est constitué par des interstratifiés irréguliers chlorite-montmorillonite et illite-montmorillonite mélangés à de la vermiculite.

Les alternances de saisons sèches et humides à l'échelle pluriannuelle et les alternances de basses eaux (écoulement de base) et de hautes eaux (ruissellements) à l'échelle d'une crue produisent des eaux d'écoulement tendant à l'équilibre thermodynamique soit avec une phase kaolinique-montmorillonitique soit avec une phase kaolinique pure.

### Les régimes hydrologiques

Les régimes hydrologiques sont de type tropical de transition sur le Losérigué et équatorial de transition sur l'Amitiéro.

Sur le bassin du Losérigué, les crues sont réparties de mai à septembre. Les étiages sont très prononcés. L'écoulement permanent est assuré par les résurgences d'une nappe d'arène qui est bien délimitée à

l'exutoire par un seuil rocheux. Sur ce bassin, la part des eaux ruisselées est faible puisque le débit de base représente 80 à 90 % de l'écoulement annuel. Les coefficients d'écoulement calculés pendant la période étudiée sont compris entre 33 et 54 %.

Sur le bassin de l'Amitiéro, l'écoulement n'est permanent que de mai à novembre. Ce bassin schisteux ne comporte pas de nappe permanente et l'écoulement est alimenté par des ruissellements qui représentent 80 % des volumes d'eau écoulés et par les vidanges de quelques nappes temporaires localisées. Mais les ruissellements sont très peu abondants, les conditions du milieu n'étant pas favorables : fort pouvoir de rétention en eau des sols, pluviosité modérée, consommation végétale. Les coefficients d'écoulement sont très faibles : de 2,4 à 8,9 % pour la période étudiée.

TABLEAU I  
Principales caractéristiques des bassins

Bassin	LOSERIGUE	AMITIERO
Distance à l'océan (km).	600	80
Type climatique.....	Soudano-guinéen (Zone B) (1)	Guinéen (Zone C 2) (1)
Pluviosité moyenne interannuelle (mm).....	1 406	1 323
Végétation.....	Savane herbacée ( <i>Andropogon</i> et <i>Panicum phragmitoides</i> )	Forêt dense humide semi-décidue (à <i>Celtis sp.</i> et <i>Triplochylon scleroxyton</i> ). Secteur mésophile
Substratum.....	Granites et Migmatites	Schistes (+ « roches vertes »)
Superficie (km <sup>2</sup> ).....	3,6	170
Altitude moyenne (m)...	390	65
Point culminant (m)...	412	177
Altitude exutoire (m)...	369	19
Indice de pente globale (%).....	5	3
Périmètre du bassin (km).....	7,7	51,7
Indice de compacité Ke (Gravelius).....	1,13	1,11

(1) D'après ELDIN (1971).

### LES MÉTHODES

#### Prélèvements

Dans le but d'obtenir plusieurs échantillons d'eau par averse, le dispositif de prélèvement comprend des bacs en plastique de grande superficie (3 m<sup>2</sup>) d'où l'eau de pluie s'écoule par un orifice dans des flacons de polyéthylène. Trois litres d'eau de pluie

peuvent ainsi être récupérés après 1 mm de précipitation. Les bacs sont recouverts entre chaque averse et rincés dans les derniers instants précédant la pluie, soit par de l'eau distillée, soit par le tout début de l'averse. La fréquence des prélèvements est en général de 3 par averse mais elle peut être supérieure.

Les eaux de ruissellement sont échantillonnées à une station située à proximité immédiate des bacs à pluie, à l'amont du bassin. Les eaux n'ont alors drainé qu'une faible superficie. La qualité des eaux de ruissellement est ensuite comparée à celle des eaux de l'écoulement total prélevée à l'exutoire du bassin.

Sur le bassin du Losérigué en savane, on dispose d'analyses d'échantillons d'eau de nappe (TARDY, 1969) et de sources (LENOIR, 1972).

A chaque prélèvement d'eau de pluie ou d'écoulement, les mesures de pH et de résistivité sont faites immédiatement sur place.

#### *Analyses au laboratoire*

Les éléments majeurs suivants ont été dosés :  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^-$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$ .

Parmi les éléments en traces, les dosages ont porté sur Fe, Al, Li, Rb, Sr, Ba, Ti, V, Cr, Mn, Ni et Cu. D'autres éléments ont été recherchés mais leurs concentrations dans les eaux de pluie sont inférieures aux limites de détection. Ce sont : Ga, Bi, Mo, Sn, Co, Cs, B et Pb.

Les chlorures, les sulfates, les phosphates, la silice, le fer et l'aluminium sont dosés par méthode colorimétrique.

Les cations potassium, sodium et calcium sont déterminés par spectrométrie d'émission en flamme, le magnésium par spectrométrie d'absorption atomique.

Les éléments traces sont recherchés et dosés par spectrographie d'arc avec une précision de l'ordre de  $\pm 30\%$  (DEFOSSEZ *et al.*, 1967).

#### RÉSULTATS DES MESURES PHYSIQUES

Les valeurs moyennes de la résistivité et du pH des eaux et leur évolution depuis les eaux de pluie jusqu'aux eaux de surface et souterraines sont rassemblées dans les tableaux 2 et 3.

La minéralisation globale des eaux de pluie exprimée par la valeur de leur résistivité varie dans de fortes proportions. Elle dépend dans une très large mesure de la période d'échantillonnage pendant la saison et durant l'averse (MATHIEU, 1972).

La résistivités moyennes n'indiquent pas de variation notable de la minéralisation globale des eaux de pluie incidentes entre les stations nord et sud. Par contre, l'influence du lessivage pluvial de la végétation forestière apparaît nettement.

En savane, les eaux ayant ruisselé sur une faible superficie ont une résistivité qui en moyenne, est très voisine de celle des pluies incidentes. A l'exutoire du bassin, le cours du Losérigué est alimenté, en permanence, en dehors des crues, par des résurgences de nappe. Le bassin du Losérigué possède en effet une nappe d'arène qui a été décrite et analysée par TARDY et MILLOT (1966), TARDY (1967 et 1969) et LENOIR (1972). Une stratification des eaux a été mise en évidence et LENOIR distingue trois parties : de haut en bas, parties « active », « intermédiaire » et « passive » qui se caractérisent par un écoulement latéral décroissant et par des charges solubles croissantes. La partie « active » tend à conserver la même composition que celle des eaux de pluie. Par contre, la partie « intermédiaire » est plus chargée par collecte des éléments provenant du fond et qui migrent par diffusion verticale ascendante. Les pertes subies par écoulement latéral au niveau de la partie « active » de la nappe ne parviennent néanmoins pas à être totalement compensées par ces apports du fond ce qui empêche les eaux d'atteindre leur stade ultime d'homogénéisation.

La forte minéralisation des eaux de la nappe au contact du socle atteintes par forage (tabl. 2), contraste avec celle des eaux de puits et de sources représentatives de sa partie « active » dont la résistivité reste élevée bien que sensiblement plus faible que celle des pluies incidentes.

Par contre, sur quelques centaines de mètres, entre le niveau des sources et l'exutoire du bassin, la minéralisation globale augmente fortement, s'éloignant de celle des pluies. LENOIR (1972) attribue cette évolution aux apports par la nappe « intermédiaire » qui affleure dans le talweg, en-dessous du niveau des sources enrichissant ainsi les eaux qui s'écoulent à son contact.

Sous forêt, la résistivité des eaux de pluviollessivage qui a fortement diminué par rapport à sa valeur moyenne dans les eaux de pluie incidente décroît encore de façon notable lorsque l'eau de pluie entre en contact avec le sol. Cet accroissement de la minéralisation globale est sensible dès le tout début du ruissellement. Toutefois, il apparaît d'ores et déjà que la contribution de la voûte forestière à la minéralisation des eaux de surface est très importante.

A l'exutoire du bassin, les eaux d'écoulement sont plus minéralisées que les ruissellements amont. Les faibles résistivités qui y sont observées tout particulièrement en périodes de basses eaux sont attribuées à la conjugaison de plusieurs facteurs. En premier lieu une source importante d'éléments minéraux est constituée par la masse d'éléments biogènes libérée des litières ou remontée en surface par voie biologique. En second lieu, les faibles coefficients d'écoulement (compris entre 2,4 et 8,9 % pendant la période considérée) ne permettent qu'une faible

dilution des solutions. Enfin, les eaux d'écoulement sont en partie alimentées par les solutions issues de l'altération des roches basiques délimitant le bassin à l'ouest.

Le pH des eaux de pluie est en moyenne légèrement plus acide au nord qu'au sud (5,03 contre 5,88) avec des valeurs extrêmes de 3,0 et de 7,6. Ces résultats sont en bonne concordance avec ceux de la littérature (notamment BAAS BECKING *et al.*, 1960 ; GRANAT, 1972 ; FØRLAND, 1973). L'ensemble de ces données

indique que le pH des eaux de pluie évolue entre une acidité marquée et une faible alcalinité.

Les changements dans les conditions du milieu naturel en latitude sont probablement responsables de l'évolution des propriétés physico-chimiques des eaux de pluie du sud vers le nord du bassin : diminution de l'influence océanique, rôle du métabolisme végétal susceptible de contaminer l'atmosphère en substances hydrosolubles, particulières ou gazeuses plus important en milieu forestier qu'en savane.

TABLEAU II

Bassin du Losérigué : valeurs moyennes de la résistivité et du pH dans différentes phases du cycle de l'eau sur le bassin

	Pluies incidentes	Ruissellements amont (1)	Nappes (2)			Sources (1)			Écoulements (1)	
			Puits saison sèche	Puits saison humide	Forages saison sèche	Saison sèche	Saison humide	Total	Basses eaux	Hautes eaux
Résistivité $\times 10^3$ ohms. cm.	154	132	63,0	76,0	12,3	72,5	75,0	72,5	36,0	46,7
pH.....	5,03	6,20	5,50	5,50	7,10	7,90	5,10	5,20	6,40	6,60
Effectif.....	107	145	54	59	10	18	48	66	59	183

(1) LENOIR (1972).

(2) TARDY (1969).

TABLEAU III

Bassin de l'Amilioro : valeurs moyennes du pH dans différentes phases du cycle de l'eau sur le bassin

	Pluie incidente	Pluiolessivage	Ruissellements amont	Écoulement (exutoire)		
				basses eaux	hautes eaux	Total
Résistivité $\times 10^3$ ohms. cm.	204	39,5	22,4	5,8	12,9	9,7
pH.....	5,88	6,56	6,11	6,91	6,90	6,90
Effectif.....	149	219	175 118	118	143	261

Au contact de la voûte forestière, le pH s'élève et tend vers la neutralité (6,56 en valeur moyenne). Cette évolution est instantanée et correspond à l'augmentation rapide de la charge minérale des eaux de pluiolessivage.

L'eau de pluie qui alimente les ruissellements a donc un pH initial très différent sur les deux bassins.

En savane, le pH augmente dès les premiers ruissellements observés sur une faible superficie. Cette augmentation se poursuit dans les eaux d'écoulement, à l'exutoire du bassin où le pH moyen

en saison humide (hautes eaux) atteint 6,6. Cette valeur est sensiblement supérieure à celle obtenue pour les eaux de sources à la même période (5,10). Par contre, pendant la saison sèche, les eaux de sources ont un pH élevé voisin de celui des eaux de la nappe au contact du socle (TARDY, 1969 ; LENOIR, 1972).

Sous forêt, l'eau de pluie incidente qui a évolué rapidement au contact de la voûte forestière vers les pH plus alcalins subit une augmentation significative de son acidité en tête de ruissellement. De telles observations ont déjà été faites sous forêt guinéenne par BONIFAS (1959). Cette évolution peut être attribuée à l'activité des organismes autotrophes (végétaux, microorganismes) plus développée ici qu'en savane. Cette activité se traduit par :

— Une augmentation de la pression de gaz carbonique dans l'atmosphère du sol,

— la formation d'acides organiques par destruction de substances plus complexes,

— La formation d'acides minéraux, tels que l'acide sulfurique qui, suivant GORHAM (1958 a et b) serait importante dans les sols forestiers. L'augmentation des teneurs en sulfates dans les eaux de ruissellement concomitante à la baisse du pH a été observée.

Cependant, l'acidification est un phénomène limité aux ruissellements observés en tête du bassin forestier. Lorsque ceux-ci progressent et que les « solutions hypodermiques » qui s'enrichissent fortement en anions et en bases, parviennent aux chenaux d'écoulement, l'alcalinisation devient un processus général. A l'exutoire du bassin, le pH atteint 6,90 sans que l'on puisse faire de distinction entre les hautes et les basses eaux.

PASSAGE DES EAUX DE PLUIE AUX EAUX D'ÉCOULEMENT : ÉVOLUTION DES TENEURS SPÉCIFIQUES

Les eaux de pluie avant d'atteindre le sol ont acquis une certaine composition dont il doit être tenu compte. Indépendamment des apports par les précipitations sèches nous étudierons ici les seuls apports atmosphériques sous forme de substances dissoutes dans les eaux de pluie. De plus à l'apport atmosphérique non négligeable, s'ajoute en milieu forestier celui plus important dû au pluviollessivage.

Les pluies incidentes :

Les tableaux 4 et 5 résument les résultats analytiques obtenus sur les deux bassins. S'il n'apparaît pas de différence notable dans la minéralisation globale des eaux de pluie entre les deux bassins, quelques variations apparaissent dans les teneurs spécifiques. Celles-ci concernent principalement les chlorures, les sulfates et le strontium dont les teneurs dans les pluies incidentes sont plus élevées dans le sud forestier, qu'en savane, au nord. Les concentrations diminuent donc en s'éloignant des côtes du Golfe de Guinée.

Il est vraisemblable que ces variations puissent être attribuées à l'influence océanique ce qui serait conforme aux observations généralement faites selon lesquelles les chlorures des précipitations atmosphériques subissent un fort gradient de concentration au voisinage des côtes (JUNGE et GUSTAFSON, 1957 ; M. SCHOELLER, 1960 ; YAALON et KATZ, 1962). Sur le territoire de l'URSS, SELEZNEVA (1972) rapporte que la contribution des sels marins aux apports

TABLEAU IV

Bassin du Loscrigué : teneurs spécifiques dans différents stades du cycle de l'eau sur le bassin. (SS = saison sèche, SH = saison humide)

	Pluies incidentes		Ruisellements amont Méd. (1)	Nappes (2)					Sources (1)			Écoulements (1)	
	Moy.	Méd.		Puits SS		Puits SH		Forages SS Moy.	SS Méd.	SH Méd.	SS+ SH Méd.	Basses eaux Méd.	Hautes eaux Méd.
				Moy.	Méd.	Moy.	Méd.						
Cl (mg/l).....	0,99	0,65	0,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
SO <sub>4</sub> .....	0,60	0,56	0,7	0,4	0,4	0,6	0,6	1,2	0,4	0,4	0,4	0,7	0,6
PO <sub>4</sub> .....	<0,1	<0,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
SiO <sub>2</sub> .....	1,46	0,78	1,7	14,4	10,8	9,2	8,0	4,1	18,0	15,5	15,8	17,9	11,2
K.....	<0,5	<0,5	0,6	1,3	1,0	1,0	0,6	5,3	1,1	1,0	1,0	2,5	2,1
Na.....	<0,5	<0,5	0,3	1,3	1,0	0,9	0,2	3,2	1,3	1,2	1,2	2,3	1,3
Ca.....	<1,0	<1,0	0,7	1,4	1,0	<1,3	<1,0	5,6	1,0	0,8	0,8	1,7	1,2
Mg.....	<0,1	<0,1	0,2	0,2	0,1	<0,2	<0,1	0,4	0,1	0,2	0,2	0,5	0,5
Fe (µg/l).....	27,3	16,0	39,0	81,0	33,0	21,0	<17,0	111,0	15,0	18,0	18,0	180,0	410,0
Al.....	9,8	8,5	40,0	7,0	5,0	6,0	6,0	10,0	9,0	16,0	12,0	56,0	265,0
Li.....	0,7	0,6	1,0	1,3	1,0	2,8	0,5	33,0	0,9	1,1	1,1	1,4	3,0
Rb.....	1,3	0,8	2,9	5,5	4,0	2,9	2,0	19,0	12,0	3,9	4,6	4,9	4,1
Sr.....	6,9	3,1	3,9	19,0	10,0	7,7	5,0	89,0	11,5	3,8	6,3	12,0	6,5
Ba.....	7,2	5,3	3,1	13,0	10,0	9,0	4,0	83,0	3,8	11,0	7,2	12,0	11,0
Tl.....	5,0	2,2	30,0	2,5	1,1	1,9	1,0	2,3	10,0	8,0	9,1	7,8	52,0
V.....	<0,3	<0,3	1,0	0,5	0,3	0,3	0,3	1,5	1,3	2,3	2,3	1,7	4,6
Cr.....	1,9	1,1	2,1	1,6	1,0	0,9	0,5	1,5	1,5	1,4	1,4	2,4	5,2
Mn.....	9,8	3,4	3,6	28,0	7,0	10,0	2,0	78,0	3,2	1,1	1,2	2,7	9,9
Ni.....	1,0	1,1	1,2	1,5	1,1	<0,5	<0,4	2,1	0,6	0,9	0,9	1,4	4,4
Cu.....	1,9	2,1	2,6	4,0	2,0	1,7	1,5	11,0	1,1	1,1	1,1	2,3	3,6

(1) LENOIR (1972).

(2) TARDY (1969).

TABLEAU V

Bassin de l'Amitiéro : Teneurs spécifiques dans différents stades du cycle de l'eau sur le bassin

	Pluie incidente (clairière)		Pluiolessivage		Ruissellements amont		Écoulements			
	(Moy.)	(Méd.)	(Moy.)	(Méd.)	(Moy.)	(Méd.)	Basses eaux	Hautes eaux	Écoulement total annuel	
							(Moy.)	(Moy.)	(Moy.)	(Méd.)
Cl mg/l.....	1,1	1,2	1,6	1,5	1,7	1,0	44,7	6,7	23,9	10,1
SO <sub>4</sub> .....	0,8	0,8	2,7	2,3	3,5	3,6	14,4	5,7	9,6	7,6
PO <sub>4</sub> .....	<0,1	<0,1	0,5	0,4	0,4	0,2	0,3	0,4	0,3	0,2
SiO <sub>2</sub> .....	<1,0	<1,0	2,2	1,9	14,5	13,3	20,1	17,9	18,9	17,8
K.....	<0,5	<0,5	7,7	6,2	2,8	2,7	6,0	3,6	4,7	4,4
Na.....	<0,5	<0,5	0,9	0,6	1,3	1,0	22,0	4,3	12,3	6,3
Ca.....	<1,0	<1,0	1,9	1,4	5,6	5,0	16,7	8,5	12,2	10,0
Mg.....	<0,1	<0,1	0,7	0,5	2,9	2,5	7,3	3,6	5,3	4,5
Fe µg/l.....	22,2	17,5	69,9	30,0	285	105	160	169	165	108
Al.....	8,2	5,2	12,7	9,4	62,2	14,5	24,2	61,4	44,6	20,0
Li.....	1,1	0,4	1,5	1,1	4,0	2,6	9,7	5,7	7,5	4,4
Rb.....	1,3	0,8	3,8	3,0	3,6	2,9	4,5	4,5	4,5	4,2
Sr.....	11,2	7,6	23,5	16,0	64,1	37,0	204	90,2	142	118
Ba.....	6,2	3,3	9,5	5,0	22,2	16,0	57,7	33,0	44,2	30,0
Ti.....	2,7	1,2	3,8	1,5	12,5	4,3	23,8	34,3	29,6	7,9
V.....	0,6	<0,3	1,0	0,7	2,0	1,5	7,6	3,1	5,2	2,9
Cr.....	1,9	1,0	3,0	1,2	4,2	2,1	4,7	3,4	4,0	2,3
Mn.....	9,9	4,1	13,0	3,8	8,9	3,6	26,0	12,3	18,5	5,9
Ni.....	1,1	0,8	2,0	1,3	6,8	4,8	8,4	6,2	7,2	4,8
Cu.....	2,3	2,0	4,9	3,2	7,6	4,7	7,9	6,6	7,2	4,4

atmosphériques représente 70 à 80 % aux stations côtières contre 10 à 20 % à l'intérieur du territoire.

Cependant la part des sels d'origine marine est difficile à estimer puisque la migration des éléments marins dans l'atmosphère ne se fait pas pour tous les éléments avec la même intensité (CHESSELET *et al.*, 1972 ; BARKER et ZEITLIN, 1972). En effet il existe un processus de fractionnement ionique lors de la production des aérosols à l'interface air-mer. Mais ce phénomène de fractionnement ionique est encore mal élucidé.

Il en résulte une modification des rapports ioniques entre l'eau de mer et les aérosols contenus dans l'atmosphère au-dessus de la mer. Dans celle-ci les concentrations relatives, par rapport au chlorure de sodium, des ions carbonates, sulfates et des cations sont plus élevées que dans l'eau de mer. BRUEVIC et KULIK (1967) notent que dans un distillat des eaux superficielles de la Mer Noire, le rapport Na/K diminue de 13 fois et le rapport SO<sub>4</sub>/Cl augmente de 2,6 fois par rapport à l'eau de mer. Une évolution semblable est observée de l'eau de mer à l'eau de pluie. Des observations identiques sont faites par NEMERJUK (1969) qui montre que la

migration des anions s'ordonne conformément à leur énergie d'hydratation (HCO<sub>3</sub>>1/2 SO<sub>4</sub>>Cl). Tandis que le rapport Cl/SO<sub>4</sub> est en moyenne de 7,2 dans les eaux océaniques, il n'est que de 0,3 à 3 dans les eaux de pluie (BLOCH et LUECKE, 1972). On note donc la migration privilégiée des carbonates et des sulfates.

Parmi les éléments en traces, seules les teneurs en strontium dans les eaux de pluie varient en fonction de la distance de la côte parallèlement à ce qui a été observé pour les chlorures et les sulfates ce qui tend à prouver l'influence prépondérante des sels d'origine océanique. De telles observations ont d'ailleurs été faites au Japon par SUGAWARA (1964 et 1965). Le strontium est un élément abondant dans l'eau de mer : en moyenne 8 mg/l (FAIRBRIDGE, 1966) et le rapport Sr/Cl varie de 0,291 à 0,395. 10<sup>-3</sup> (ANGINO *et al.*, 1966). Dans l'atmosphère marine, le strontium subit un très net enrichissement. Le coefficient d'enrichissement (E), calculé par KOMABAYASI (1964), exprimé par la formule :

$$E = \frac{(\text{Sr/Na}) \text{ atmosphère}}{(\text{Sr/Na}) \text{ eau de mer}} - 1$$

est de 2,04 (alors qu'il n'est que de 1,40 pour le baryum). Dans les eaux



de pluie recueillies en Côte d'Ivoire, le rapport Sr/Cl est de 6,61.  $10^{-3}$  dans les pluies incidentes du domaine forestier et de 4,76.  $10^{-3}$  au nord, en savane (tableau 8). Il est donc bien supérieur au rapport moyen calculé pour l'eau de mer.

De plus, aux éléments marins migrant dans l'atmosphère s'ajoutent des éléments continentaux, d'origine variée, naturelle ou anthropogène. Leur transport atmosphérique sur de longues distances est considéré comme un mécanisme important de la modification de la composition saline originelle de l'atmosphère marine et de leur accumulation dans les sédiments marins (DELANY *et al.*, 1967 ; GRIFFIN *et al.*, 1968 ; WINDOM, 1969 et 1970 ; PROSPERO et BONATTI, 1969 ; FOLGER, 1970 ; CHESTER et JOHNSON, 1971 ; PIOTROWICZ *et al.*, 1972 ; BARKER et ZEITLIN, 1972).

Ces actions conjuguées déterminent la composition finale des eaux de pluie dans laquelle entrent des constituants d'origines marine et continentale.

TABLEAU VI

Évolution des teneurs en  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ , et  $Sr^{2+}$  entre la station sud et la station nord. Valeurs médianes (entre parenthèses : intervalle de confiance)

Distance de la côte (km)	80	600
Stations	Clairière forestière	Savane
$Cl^-$ (mg/l).....	1,15 (0,67 - 1,65)	0,65 (0,50 - 0,95)
$SO_4^{2-}$ (mg/l).....	0,78 (0,72 - 0,86)	0,56 (0,48 - 0,53)
$Sr^{2+}$ ( $\mu$ g/l).....	7,6 (4,2 - 9,2)	3,1 (2,6 - 4,9)
Sr/Cl.....	6,61 . $10^{-3}$	4,76 . $10^{-3}$
Cl/ $SO_4$ .....	1,47	1,16

Par ailleurs, les constituants atmosphériques ne réagissent probablement pas tous de la même façon à l'action du lessivage pluvial. Le tableau 6 montre que, en s'éloignant de la côte, les eaux de pluie s'appauvrissent plus rapidement en chlorures qu'en sulfates. Ceci rejoint les observations de KOYAMA et SUGAWARA (1953), de HOUGHTON (1958) et de ERIKSSON (1960). Cette différence de comportement peut avoir plusieurs causes parmi lesquelles nous éliminerons les sources anthropogènes de sulfates qui n'entrent pas en ligne de compte dans la partie de la Côte d'Ivoire étudiée.

Il peut y avoir simplement sélection des particules hygroscopiques de chlorure de sodium par le lessivage pluvial de l'atmosphère, les particules de sulfates (et de carbonates), plus « vivaces » persistant plus longtemps.

La persistance des teneurs élevées en sulfates pendant toute la durée des averses fait émettre à

GAMBELL et FISHER (1966) l'hypothèse d'une source gazeuse plutôt que particulaire du soufre atmosphérique. Nos propres observations faites en Côte d'Ivoire (MATHIEU, 1972) montrent des variations saisonnières des teneurs en sulfates qui dépendent de la répartition annuelle des précipitations ce qui fait apparaître les effets du lessivage pluvial sur les concentrations. Mais celui-ci doit être moins intense que pour les chlorures.

Enfin, il est possible qu'une partie du sulfate atmosphérique « en excès » par rapport aux proportions trouvées dans l'eau de mer ait pour origine l'activité métabolique de la biomasse tropicale. En milieu tempéré, non pollué, GORHAM (1957) a constaté de plus fortes concentrations en sulfates dans les eaux de pluie au printemps et en été, c'est-à-dire, au moment où le métabolisme biologique est le plus actif.

#### Le pluiolessivage

La forêt dense tropicale constitue un très important filtre qui s'intercale entre l'atmosphère et le sol. De plus, cette forêt occupe une position privilégiée en bordure des côtes du Golfe de Guinée et se trouve sur le passage des masses d'air humides d'origine océanique (alizé de l'hémisphère sud : mousson). La forêt filtre, voir même sélectionne les éléments chimiques contenus dans l'atmosphère qu'elle entrepose sur son feuillage ou qu'elle absorbe directement à l'état gazeux. Une partie des éléments en solution dans les eaux de pluiolessivage a donc pour origine indirecte l'atmosphère. La végétation forestière constitue une étape importante dans le cycle : océan  $\rightarrow$  atmosphère  $\rightarrow$  plante  $\rightarrow$  sol  $\rightarrow$  océan suivi par un certain nombre d'éléments nutritifs.

Mais les échanges avec l'atmosphère peuvent se faire dans les deux sens et la forêt est capable de fournir à l'atmosphère des constituants issus de son activité biologique. De plus, la migration à partir du couvert végétal de composés hydrocarbonés a été mise en évidence au-dessus des forêts de pins par WENT (1960) et plus récemment par ARPINO *et al.* (1972). Il a été suggéré (RICKARD, 1970) que des métaux biogéniques peuvent migrer dans l'atmosphère sous forme de combinaisons avec ces composés organiques. Il faut également souligner le passage dans l'atmosphère d'éléments figurés organiques (pollen, etc.) susceptibles de contaminer les précipitations recueillies en milieu forestier.

Au contact des eaux de pluie avec la voûte forestière, celles-ci vont rapidement changer de composition en s'enrichissant des produits déposés pendant les périodes sèches et des éléments biogéniques les plus mobiles (récréation). Cependant il n'est pas possible, dans nos résultats, d'établir une distinction entre ces deux origines. Quoi qu'il en soit,

la participation du pluviollessivage aux cycles biogéochimiques des éléments minéraux est très importante aussi bien sous forêts tempérées que sous forêts tropicales et ceci a été clairement démontré pour les éléments principaux en milieu tropical par BARTHOLOMEW *et al.*, (1953) et LAUDELOUT et MEYER (1954) dans la cuvette congolaise, par NYE (1961) au Ghana, par DOMMERGUES (1963) et BRAY et GORHAM (1964) dans leurs travaux de synthèse, par BERNHART-REVERSAT (1970) et MATHIEU (1971 et 1972) en Côte d'Ivoire.

En Côte d'Ivoire, l'étude a été étendue à celle des éléments en traces dont l'apport par les eaux de pluie est important pour les écosystèmes. Pour la totalité des éléments dosés, la charge globale des eaux de pluie passe, sur une moyenne établie à partir des échantillons correspondant à 56 averses, de 2,5 mg/l en clairière forestière à 18,1 mg/l sous la voûte forestière (bicarbonates non compris). Le lessivage pluvial de la forêt fournit aux eaux de pluie de fortes proportions de sulfates, de phosphates, de potassium, de magnésium, de lithium, de rubidium, de vanadium, de nickel et de cuivre et de plus faibles proportions de chlorures, de silice, de calcium, de fer, d'aluminium, de strontium et de baryum. Les éléments qui retournent au sol par les pluies ne sont pas tous lessivés avec la même intensité. Le calcul du rapport  $X_c/X_d$  (rapport entre la concentration de l'élément X sous couvert et celle du même élément à découvert) permet d'établir l'ordre de lessivage décroissant suivant :

K → Mg → PO<sub>4</sub> → Rb → SO<sub>4</sub> → Li → V → Sr → SiO<sub>2</sub> → Al → Fe → Ni → Cu → Ba → Ca → Cl → Ti → Cr → Na → Mn.

Il est important de souligner que la totalité des éléments atmosphériques retenus par la couverture végétale ne retournent pas forcément directement au sol par pluviollessivage. Une partie des éléments absorbés par la forêt peuvent n'être restitués au sol qu'au fur et à mesure de la décomposition des litières. Ils suivent alors le cycle de la matière organique.

### *Les eaux d'écoulement des bassins*

Les auteurs sont maintenant nombreux à avoir montré l'importance des apports atmosphériques sur la composition des eaux continentales. Citons quelques exemples pris parmi d'autres :

— En Finlande, VIRO (1953) montre que les eaux de pluie sont responsables de 20 % du sodium, 10-20 % du potassium, 10 % du magnésium, 20-40 % du calcium, 30-50 % du chlore et 50-70 % du sulfate contenus dans les eaux de rivières des bassins étudiés par l'auteur.

— A plusieurs reprises, GORHAM (1955, 1957, 1961)

insiste sur le rôle des précipitations sur la composition des eaux de surface. Il note en particulier que dans le District des Lacs, en Grande Bretagne, les eaux de pluie contribuent à la presque totalité du chlore, du sulfate, du sodium, du magnésium et à la moitié du calcium contenus dans les eaux superficielles.

— ERIKSSON (1955, 1958) souligne l'importance du chlore atmosphérique sur les teneurs des rivières et des eaux souterraines.

— GAMBELL et FISCHER (1966) observent que les quantités de substances dissoutes par les pluies totalisent presque la moitié des charges solubles transportées par les cours d'eau de Caroline et de Virginie. Certains éléments peuvent même être trouvés sous des concentrations plus élevées dans les eaux de pluie que dans les eaux de surface. C'est le cas des nitrates et des sulfates.

— En Union soviétique, l'importance de l'apport ionique par l'atmosphère aux rivières est notée à l'échelle d'un grand bassin par ALEKIN et BRAZHNIKOVA (1957). Sur la presqu'île d'Apsheron, les eaux météoriques sont considérées comme une des principales sources de sels des eaux de cette région (SULEJMANOV et LISTENGARTEN, 1966).

— Des observations analogues ont été faites en ce qui concerne les éléments en traces. SUPATASHVILI (1965) considère qu'en Géorgie, 20 à 50 % de ces substances transportées par la rivière Rioni sont apportées par les précipitations. KONOVALOV et KOLESNIKOVA (1969) observent un lien génétique entre les teneurs en éléments en traces dans les précipitations et leurs concentrations dans les eaux de la Kuma, du réservoir d'Otkaznoe et dans les eaux souterraines de cette région.

— Les apports par les eaux météoriques associés à une forte évaporation sont, selon BATULIN (1964), responsables des concentrations en éléments en traces des eaux des régions steppiques.

La part des apports atmosphériques dans la composition des eaux des bassins est exprimée en pourcentage dans les tableaux 7 et 8 pour le Bassin du Losériqué et 9 et 10 pour le Bassin de l'Amitiéro.

### *Savane : Bassin versant du Losériqué*

— *Les chlorures* sont sensiblement moins abondants dans les eaux d'écoulement que dans les eaux de pluie. Aucune différence n'est observable entre hautes et basses eaux. La contribution de la nappe est négligeable. La totalité des chlorures des eaux de ce bassin est d'origine atmosphérique.

— *Les sulfates* augmentent faiblement dans les ruissellements et les écoulements à l'exutoire. Les eaux de la partie drainée de la nappe et des sources

INFLUENCE DES APPORTS SUR LA QUALITÉ DES EAUX (CÔTE D'IVOIRE)

TABLEAU VII

Bassin du Losérigué: Pourcentages des teneurs spécifiques en éléments majeurs dans les eaux de pluie par rapport à celles des eaux du bassin (%)

	Cl	SO <sub>4</sub>	PO <sub>4</sub>	SiO <sub>2</sub>	K	Na	Ca	Mg
Ruiss. Rav.....	130	76		46	<78	<100	<100	<50
nappe {	Puits SS.....	156		7	<50	< 63	<100	<10
	Puits SH.....	100		10	<83	<100	<100	<10
	Forages SS.....	47		19	< 9	< 16	< 18	< 2
sources {	SS.....	140		4	<50	< 39	<100	<100
	SH.....	140		5	<50	< 42	<100	<50
	TOTAL.....	160		5	<50	< 42	<100	<50
écol. Dev. {	BE.....	80		4	<20	< 22	< 59	<20
	HE.....	93		7	<24	< 38	< 83	<20
	TOTAL.....	130	88	6	<23	< 31	< 75	<20

Ruiss. : Ruissellement  
Rav. : Ravineau

SS : Saison sèche  
SH : Saison humide

BE : Basses eaux  
HE : Hautes eaux

TABLEAU VIII

Bassin du Losérigué: pourcentages des teneurs spécifiques en éléments traces dans les eaux de pluie par rapport à celles des eaux du bassin (%)

	Fe	Al	Li	Rb	Sr	Ba	Ti	V	Cr	Mn	Ni	Cu	
Ruiss. Rav.....	41	21	60	28	79	100	7	30	52	94	92	81	
Nappe {	Puits SS....	48	100	60	20	31	53	100	100	100	49	100	100
	Puits SH....	94	100	100	40	62	100	100	100	100	100	100	
	Forages SS..	14	85	2	4	3	6	96	20	73	4	52	19
Sources {	SS.....	100	94	67	7	27	100	22	23	73	100	100	
	SH.....	89	53	55	21	82	48	28	13	79	100	100	
	TOTAL.....	89	71	55	17	49	74	24	13	79	100	100	
Écol. Dev. {	BE.....	9	15	43	16	26	44	28	18	46	100	79	
	HE.....	4	3	20	20	48	48	4	7	21	34	25	
	TOTAL.....	4	4	25	18	42	48	6	7	23	50	34	

Ruiss. : Ruissellement  
Rav. : Ravineau

SS : Saison sèche  
SH : Saison humide

BE : Basses eaux  
HE : Hautes eaux

TABLEAU IX

Bassin de l'Amilioro: pourcentage des teneurs spécifiques en éléments majeurs dans les eaux de pluie par rapport à celles des eaux du bassin (%)

		Cl	SO <sub>4</sub>	PO <sub>4</sub>	SiO <sub>2</sub>	K	Na	Ca	Mg
Ruis. Rav.	Pluies incidentes...	115	22	<42	<8	<19	<50	<20	<4
	Pluiolessivage.....	35	42	—	—	—	—	—	—
	TOTAL.....	150	64	163	14	230	58	27	19
Écol. Ami.	Pluies incidentes...	11	10	<50	<6	<11	< 8	<10	<2
	Pluiolessivage.....	4	20	—	—	—	—	—	—
	TOTAL.....	15	30	195	11	141	9	14	11

TABLEAU X

Bassin de l'Amitiolo : pourcentage des teneurs spécifiques en éléments traces dans les eaux de pluie par rapport à celles des eaux du bassin (%)

		Fe	Al	Li	Rb	Sr	Ba	Ti	V	Cr	Mn	Ni	Cu
Ruis. Rav.	Pluies incidentes.....	17	36	15	28	21	21	28	20	48	100	17	43
	Pluiolessivage.....	12	29	27	72	22	30	7	27	9	0	10	25
	TOTAL.....	29	65	42	100	43	51	35	47	57	100	27	68
Écouil. Ami.	Pluies incidentes.....	16	26	9	19	6	11	15	10	43	69	17	45
	Pluiolessivage.....	12	21	16	52	8	6	4	14	9	0	10	28
	TOTAL.....	28	47	25	71	14	17	19	24	52	69	27	73

Ruis. : Ruissellement  
Rav. : Ravineau  
Ami. : Rivière Amitiolo

possèdent des teneurs identiques (ou plus faibles) à celles des eaux de pluie incidentes. Par contre, les concentrations augmentent dans la partie profonde de la nappe. Les petites quantités de sulfates mises en solution en surface, dues soit à l'activité biologique, soit au dépôt d'aérosols pendant les périodes sèches, sont vraisemblablement consommées sur place par la végétation qui se développe pendant la saison des pluies. Une faible diminution est d'ailleurs remarquée entre les ruissellements amont et les eaux de sources et de crues à l'exutoire du bassin. Les 3/4 des sulfates des eaux de ruissellements sont d'origine atmosphérique.

— La silice est peu abondante dans les eaux de ruissellement où la participation des apports atmosphériques est de l'ordre de 50 %. La mise en solution progressive de la silice est fonction de la distance parcourue par les eaux d'écoulement. Les apports de silice dissoute par les eaux météoriques ne représentent plus qu'entre 5 et 10 % de la silice des eaux de la nappe superficielle, des sources et de l'écoulement total.

— Les cations : potassium, sodium, calcium et magnésium sont généralement, dans les eaux de pluie et de ruissellement, sous des concentrations situées en-dessous du seuil de détection donné par les méthodes analytiques utilisées. Les concentrations sont faiblement mais significativement plus élevées à l'exutoire et la participation des apports atmosphériques à la composition des eaux issues de ce bassin peut être considérée comme faible ou négligeable.

— Les teneurs en fer et en aluminium augmentent presque instantanément dans les eaux de ruisselle-

ment où 40 % du fer et 20 % de l'aluminium sont d'origine atmosphérique. Les concentrations s'accroissent fortement dans les eaux de l'écoulement total du fait, en particulier, d'une importante contribution de la nappe « intermédiaire » et les apports atmosphériques n'y représentent plus que de faibles proportions (moins de 5 %).

— Parmi les éléments traces alcalins et alcalino-terreux, le baryum des eaux ruisselées est à 100 % d'origine atmosphérique, le strontium à 80 %, le lithium à 60 % et le rubidium à 30 % seulement. Ce dernier est facilement mobilisé par les eaux de ruissellement et il est probable qu'une partie du rubidium entraîné provient du lessivage des graminées qui prennent un développement très important pendant la saison humide. Ces éléments sont sous des teneurs élevées dans les eaux de la nappe profonde (TARDY, 1967) en contact avec le substratum. Mais, malgré une contribution notable des eaux de la nappe « intermédiaire », les précipitations participent dans des proportions relativement élevées (plus de 30 % pour Sr et Ba et de l'ordre de 20 % pour Li et Rb) aux concentrations rencontrées dans les eaux qui s'écoulent à l'exutoire du bassin.

— Parmi les métaux de transition, l'influence des apports atmosphériques sur la composition des eaux de ruissellement diminue dans la série suivante : plus de 90 % pour nickel et manganèse, 80 % pour cuivre, 50 % pour chrome, 30 % pour vanadium et moins de 10 % pour titane. Titane et vanadium varient peu de l'amont à l'aval du bassin (LENOIR, 1972). Par contre, l'influence des eaux souterraines agit fortement à l'exutoire sur les concentrations en nickel et en manganèse pour lesquels les apports atmosphé-

riques ne représentent plus que 30 % des quantités exportées du bassin.

En résumé, sur le bassin du Losérigué, les eaux de ruissellement, les eaux de la partie superficielle de la nappe (zone « active ») ainsi que les eaux de sources qui en sont issues conservent des teneurs spécifiques qui sont voisines de celles des eaux de pluie incidentes. Par contre, la composition de la totalité des eaux d'écoulement du bassin est modifiée de façon notable par les apports de la nappe « intermédiaire » en éléments soutirés du socle et migrant par diffusion verticale vers les parties affleurantes de la nappe, en-dessous du niveau des sources.

*Forêt: bassin versant de l'Amitioro*

L'analyse des eaux de pluviolessivage a montré l'importance de l'apport minéral au sol par les pluies sous forêt.

A la différence du bassin étudié en savane, le bassin forestier de l'Amitioro dont le substratum est à prédominance schisteuse ne possède pas de nappe permanente. Les écoulements sont alimentés par les ruissellements et par les circulations qui s'établissent à travers les profils. Localement peuvent apparaître pendant la saison humide des nappes temporaires dont les vidanges alimentent les niveaux d'étiage jusqu'au tarissement complet qui intervient pendant la grande saison sèche. Le cours de l'Amitioro est alors à sec.

— *Les chlorures* d'origine atmosphérique sont la source exclusive des chlorures des eaux ruisselées. Il apparaît même une sensible diminution des teneurs dans les eaux de surface par rapport à celles des eaux de pluviolessivage. Les conditions semblent réunies pour qu'une partie du chlore puisse être fixée sur la fraction argileuse de l'horizon superficiel des sols dont le pH est compris entre 4,3 et 6,0. (0-15 cm). En effet, selon BEAR (1955), cette sorption pourrait être effective pour des pH inférieurs à 6,8. Néanmoins, l'importance de ce processus est ici peu vraisemblable étant donné les faibles proportions d'argile contenue dans les sols dont la texture est essentiellement limoneuse.

D'autres hypothèses permettant d'expliquer le départ d'une partie du chlore des solutions peuvent être avancées telle que la possibilité d'un retour à l'atmosphère sous forme de dégagement d'acide chlorhydrique gazeux, les conditions d'acidité du milieu étant favorables à la persistance des acides minéraux formés dans les sols forestiers. Enfin, il convient de ne pas négliger le rôle joué par la consommation biologique.

A l'exutoire du bassin, les eaux de crues sont beaucoup plus riches en chlorures que les eaux de ruissellement, à l'amont. Mais les concentrations sont surtout importantes dans les eaux de l'écou-

lement de base où elles peuvent atteindre 200 mg/l. Ces résultats montrent que des quantités non négligeables de chlore sont mises à la disposition des ruissellements mais que leur prise en charge par ces dernières est progressive. Il a été montré que le lessivage de la voûte forestière et de la litière fraîche ne libère pratiquement pas de chlore ; mais celui-ci pourrait être libéré après destruction des tissus organiques. Le chlore atmosphérique absorbé par la végétation constitue une importante source potentielle compte tenu de l'abondance de la biomasse végétale.

Mais ceci ne peut expliquer entièrement les teneurs particulièrement élevées observées dans les eaux de l'écoulement de base d'autant qu'il semble bien qu'elles soient limitées à la zone birrimienne schisteuse, conformément aux observations faites dans des régions voisines par LENEUF *et al.*, (1957) et LENEUF, (1959). Une partie du chlore contenu dans les basses eaux est donc d'origine lithologique et provient de l'altération des apatites chlorées, minéraux accessoires communs dans les roches métamorphiques, ou des chloropatites appartenant aux roches basiques dont les pointements délimitent le bassin à l'ouest.

Au total, le chlore des eaux de pluviolessivage ne représente que 15 % de celui contenu dans l'écoulement total du bassin. La partie forestière du bassin du Bandama dont l'Amitioro est tributaire, est un important pourvoyeur de chlorures. Il a d'ailleurs été montré (LENOIR, 1971) que les chlorures contenus dans le fleuve collecteur sont plus abondants pendant les périodes où il pleut sur la partie forestière de son bassin. Il faut donc admettre qu'indépendamment des apports dus à l'altération des minéraux chlorurés présents dans certaines roches basiques, la forêt est capable de stocker et de restituer de grandes quantités de chlore d'origine essentiellement océanique prélevé dans l'atmosphère. Mais le pluviolessivage ne joue pas un rôle très important dans cette restitution.

— *Les sulfates* ont un comportement très différent de celui des chlorures. La contribution des précipitations atmosphériques est de l'ordre de 20 %, celle du pluviolessivage de 40 % des teneurs observées dans les ruissellements soit au total 60 % d'apport par les pluies sous forêt. On note donc l'importance du pluviolessivage sur les teneurs en sulfates des eaux de ruissellements sur bassin forestier.

L'examen des teneurs médianes en sulfates montre un enrichissement continu depuis des eaux de pluie jusqu'aux eaux d'écoulement à l'exutoire du bassin. Contrairement aux chlorures, le transport des sulfates sous l'action des eaux de surface est un processus important.

Le soufre est un élément abondant dans la biomasse

forestière tropicale. Son stockage a été estimé, par BARTHOLOMEW *et al.*, (1953), en forêt de Yangambi (Congo), à 196 kg/ha. L'essentiel est stocké dans le bois et les racines, les feuillages et les litières n'en stockant respectivement que 17 et 10 kg/ha. Mais ses liaisons avec la matière organique doivent être suffisamment lâches pour que le soufre soit libéré plus rapidement que le temps nécessaire à la décomposition des litières.

Le soufre libéré est probablement en partie rapidement réutilisé par la végétation. Cependant les conditions oxydantes liées à l'activité biologique du milieu permettent l'évacuation du soufre, sous forme de sulfates, par les eaux de surface ce qui se traduit par une sensible baisse du pH des eaux ruisselées.

La végétation forestière puise une partie du soufre contenu à l'état gazeux dans l'atmosphère. Mais du soufre est également présent à l'état de sulfates dans les aérosols d'origine marine dont le dépôt pendant les périodes de sécheresse sur les feuillages est important. En effet, les premières pluies, qui suivent une période de sécheresse prolongée, lessivent de grandes quantités de sulfates de la voûte forestière. Mais ces quantités décroissent rapidement pendant l'averse.

Pour l'ensemble du bassin, les quantités de sulfates apportées par les pluies représentent 30 % des concentrations dans les eaux de l'écoulement total dont les 2/3 viennent du lessivage de la voûte forestière.

— *Les phosphates* ne sont pas abondants dans les pluies et l'apport atmosphérique doit être négligeable si l'on excepte la contamination de l'atmosphère par des substances organiques. Le pluviollessivage de la voûte forestière en produit de grandes quantités comparativement aux concentrations habituellement rencontrées dans les eaux continentales. Le phosphore vient immédiatement après le potassium et le magnésium dans l'échelle de mobilité des éléments vis-à-vis du matériel végétal.

Non seulement la totalité des phosphates contenus dans les eaux de ruissellement est fournie par le pluviollessivage de la voûte, mais une grande partie disparaît rapidement des solutions. Les pertes sont donc très faibles et RAPP (1971) donne pour cet élément un bilan positif dans des écosystèmes méditerranéens.

— *La silice* n'est produite que sous de faibles quantités par les pluies qui en contiennent moins de 1 mg/l. Le rôle du pluviollessivage, sans être négligeable, est faible et les pluies qui atteignent le sol sous forêt contiennent près de 2 mg/l de silice. Il n'est pas possible de connaître la part qui revient au lessivage des poussières déposées sur la voûte et celle des produits de récrétion. Au total, 14 % de la

silice des eaux de ruissellement, à l'amont du bassin, proviennent des pluies.

Contrairement à ce qui a été constaté en savane, les premiers ruissellements s'enrichissent très rapidement en silice (13,3 mg/l en valeur médiane) et il a été constaté (MATHIEU, 1972) que l'essentiel de la silice exportée du bassin provient de l'action du ruissellement superficiel. Si le lessivage de la voûte et de la litière fraîche ne produit pas beaucoup de silice, le milieu organique joue un rôle essentiel sur la migration de la silice en surface d'une part par l'action de facteurs biochimiques susceptibles d'accélérer la dissolution de la silice pour le compte de certaines espèces végétales, d'autre part par la redistribution de la silice à la surface par pompage des solutions par les racines, ce qui est considéré par LELONG (1969) comme un processus important sous forêt tropicale.

La contribution de l'écoulement de base aux quantités de silice exportées du bassin est négligeable tandis que celle du lessivage pluvial de la voûte est sensiblement la même qu'en tête du bassin (11 %). Ceci est à attribuer d'une part aux pertes par remontées biologiques qui appauvrissent les solutions du sol, d'autre part, aux conditions d'altération qui bloquent la silice utilisée à la néoformation des minéraux constitutifs du complexe gonflant dont nous retrouvons les traces dans les matériaux détritiques évacués vers le réseau général.

— *Les cations majeurs* ne sont généralement pas détectables dans les pluies incidentes. Par contre, le lessivage de la voûte forestière modifie profondément la composition des eaux de pluie.

L'élévation des concentrations en potassium est la plus spectaculaire puisqu'elles passent de moins de 0,5 mg/l dans les pluies incidentes à 6,2 mg/l dans les eaux de pluviollessivage. Par contre, l'influence de la voûte forestière sur les teneurs en sodium est négligeable.

La grande mobilité de l'ion potassium vis-à-vis du matériel organique fait que cet élément en est beaucoup plus rapidement appauvri que le temps nécessaire à la décomposition de la matière organique (BARTHOLOMEW *et al.*, 1953; NYKVIST, 1959; REMEZOV, 1961; RAPP, 1971; BERNHARD REVERSAT, 1972). Mais le potassium est également rapidement récupéré par la végétation et ce n'est pas un élément stable dans les eaux de ruissellement. C'est ce qui a été constaté sur des bassins forestiers du New Hampshire par LIKENS *et al.* (1967) et JOHNSON *et al.* (1968).

La participation totale des pluies à la composition des eaux de ruissellement est décroissante dans la série suivante : potassium (230 %), sodium (58 %), calcium (27 %) et magnésium (19 %). Sur ce bassin

forestier, l'action des eaux de ruissellement s'exerce donc principalement au détriment du calcium et du magnésium. Le calcium est le cation le plus abondant dans les eaux de ruissellement. Il domine la composition du complexe d'échange de l'horizon superficiel des sols du bassin. Les pertes par lessivage de l'horizon organique parviennent à être compensées dans les conditions de pluviosité modérée qui règnent sur le bassin, par les remontées à partir des solutions du sol et par le calcium libéré au fur et à mesure de la décomposition des litières.

Le magnésium, bien que peu abondant dans tous les stades du cycle de l'eau, est facilement lessivé à la fois de la voûte forestière et de l'horizon organique des sols lorsque les conditions de drainage sont bonnes.

Par contre, l'action des eaux de ruissellement sur le transport du sodium est faible. Il est vraisemblable que les faibles quantités de sodium contenues dans les eaux superficielles soient dues aux dépôts d'aérosols d'origine marine. En effet, seules les pluies survenant pendant la saison sèche et les débuts d'averses succédant à une période de sécheresse prolongée ont des teneurs notables en sodium (MATHIEU, 1972).

Dans les eaux de l'écoulement total, à l'exutoire du bassin, la contribution des précipitations est beaucoup plus faible, sauf pour le potassium puisque pour cet élément les concentrations restent inférieures à celles des eaux de pluviolessivage ; les apports totaux par les pluies sont les suivants : potassium (140 %), calcium (14 %), magnésium (11 %) et sodium (9 %).

— *Fer et aluminium.* L'influence des eaux de pluie est plus importante pour l'aluminium que pour le fer. Le pluviolessivage intervient pour une bonne part (12 % pour Fe et 29 % pour Al). Les concentrations en fer sont constantes de l'amont à l'aval du bassin. De plus, elles ne varient pas lorsque la minéralisation totale des eaux augmente.

Au contraire, les teneurs en aluminium sont plus élevées dans les eaux de crues que dans les eaux de l'«écoulement retardé».

Dans les eaux de l'écoulement total, l'apport en fer par les pluies s'élève à 28 % et l'apport en aluminium, à 47 %. Les plus fortes proportions d'aluminium produites par le lessivage de la voûte forestière et des litières permettent sans doute d'expliquer que l'élévation des concentrations en aluminium sur le fleuve collecteur (Bandama) précède celle observée pour le fer, dans les premiers ruissellements issus de la partie forestière de son bassin (LENOIR, 1972).

— Parmi les éléments traces alcalins et alcalino-terreux, le rubidium est celui pour lequel la contribution de la voûte forestière est la plus importante,

le baryum, celui pour lequel elle est la plus réduite. On constate que les traces alcalins univalents (Rb, Li) sont plus mobiles vis-à-vis du matériel organique que les traces alcalino-terreux bivalents (Sr, Ba).

La totalité du rubidium contenu dans les ruissellements provient des pluies et les trois quarts du pluviolessivage.

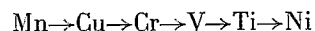
Le strontium est produit dans des proportions équivalentes par l'atmosphère et par le pluviolessivage.

Les concentrations augmentent de façon notable des ruissellements amont à l'exutoire du bassin, particulièrement pour le strontium qui présente une grande mobilité et dont les teneurs sont trois fois plus élevées à l'aval qu'à l'amont.

Les basses eaux de l'Amitiero sont plus riches en strontium et en baryum que les eaux de crues. Les différences ne sont pas significatives en ce qui concerne le lithium et le rubidium. Les fortes teneurs en strontium dans les basses eaux semblent être un phénomène général puisqu'elles ont été observées par SKOUGSTADT et HERR (1960) aux États-Unis, par DURUM et HAFFTY (1960) aux États-Unis et au Canada, et par MULLER (1969) sur le Rhin.

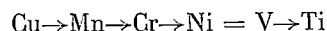
La contribution totale des précipitations reste importante à l'exutoire du bassin pour rubidium (70 %) et pour lithium (25 %). Elle est plus faible pour baryum (17 %) et pour strontium (14 %).

— L'action du pluviolessivage sur les métaux de transition est la plus importante pour le vanadium et la moins importante pour le manganèse. La participation totale des pluies à la composition des eaux de ruissellement sous forêt est décroissante dans la série suivante :



La contribution atmosphérique représente la totalité du manganèse présent dans les premiers ruissellements. Pour les autres éléments de cette série elle est plus importante que celle du pluviolessivage, sauf pour le vanadium.

À l'exutoire du bassin, la contribution des précipitations demeure élevée ; elle est décroissante dans la série suivante :



On observe un sensible accroissement des teneurs en manganèse en périodes de basses eaux alors que pour les autres métaux de transition les différences entre hautes et basses eaux ne sont pas significatives.

— *En résumé,* l'influence des précipitations atmosphériques sur la composition des eaux d'écoulement d'un bassin forestier est très importante. Le pluviolessivage de la voûte forestière exerce un lessivage sélectif des éléments déposés en période de sécheresse

ou issus des phénomènes de récréation et son rôle, sur le plan quantitatif, est considérable.

Les précipitations atmosphériques fournissent aux eaux de ruissellement la totalité des chlorures, principalement d'origine atmosphérique, la totalité des phosphates qui viennent en majeure partie du pluviollessivage, la totalité du potassium et du rubidium, issus presque uniquement de la couverture forestière et la totalité du manganèse provenant exclusivement de l'atmosphère. Les autres éléments sont fournis par les pluies sous des proportions variées, principalement par l'atmosphère pour Si, Na, Ca, Fe, Al, Ba, Ti, Cr, Ni et Cu ou principalement par le pluviollessivage pour  $\text{SO}_4$ , Mg, Li, et V.

Dans le processus de migration des éléments sur bassin forestier un rôle très important est joué par les eaux de ruissellement et l'influence du milieu biologique intervient fortement. Les éléments évacués principalement par les ruissellements sont les sulfates, la silice, le calcium, le magnésium, l'aluminium et la majorité des métaux de transition exception faite du manganèse.

Par contre, les chlorures, le sodium, le strontium, le baryum et le manganèse se concentrent dans les eaux de l'écoulement de base.

Dans les eaux de l'écoulement total, la participation des apports par les pluies représentent la totalité des teneurs en phosphates, en potassium, la majeure partie du rubidium, du chrome, du manganèse et du cuivre et une fraction importante des concentrations en sulfates, en fer, en aluminium, en lithium et en nickel.

## BILAN ESTIMATIF

Une estimation des apports d'éléments minéraux par les pluies et des quantités des mêmes éléments évacués des bassins par les eaux d'écoulement a été tentée.

Une distinction est établie entre l'action des eaux de ruissellement et celle des eaux de l'écoulement de base sur les transports.

Sur le bassin du Losérigué (savane), les coefficients d'écoulement calculés pour les années considérées sont compris entre 33 et 54 %. Ils sont beaucoup plus faibles en milieu forestier puisque sur le bassin de l'Amitiéro ils se situent pour la même période entre 2,4 et 8,9 %.

Les forts coefficients observés sur le Losérigué viennent du fait qu'il existe une alimentation permanente par la nappe. Par contre, non seulement le bassin de l'Amitiéro ne possède pas de nappe permanente, mais la couverture forestière dense liée à une pluviosité modérée font que la majeure partie est vraisemblablement consommée par la végétation. Les conditions limites qui permettent le maintien d'un climax forestier doivent rendre très discrète l'action du drainage profond. Néanmoins, il est possible d'envisager qu'une partie des éléments mis en solution est évacuée par drainage vertical échappant ainsi au bilan.

### 1. Bassin du Losérigué (savane) (fig. 2).

Les apports atmosphériques en éléments majeurs n'ont pu être chiffrés avec exactitude sauf pour les chlorures, les sulfates et la silice (tabl. 11).

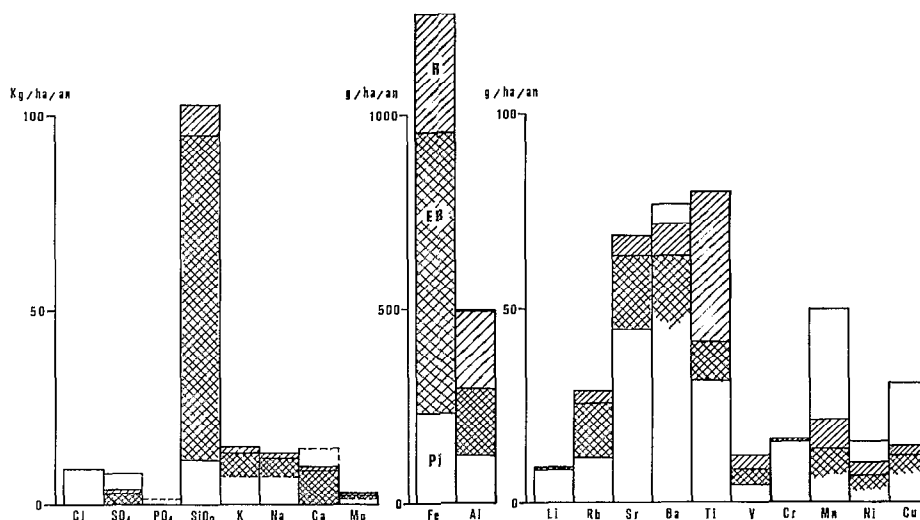


Fig. 2. — Bassin du Losérigué (savane) : Bilan des éléments minéraux (Pi = Pluie incidente ; R = ruissellement ; EB = écoulement de base).



TABLEAU XI

Bassin du Losériqué: quantités d'éléments minéraux apportées par les pluies et exportées par les eaux d'écoulement; éléments majeurs (en kg/ha/an)

	Cl	SO <sub>4</sub>	PO <sub>4</sub>	SiO <sub>2</sub>	K	Na	Ca	Mg
Pluies incidentes.....	9,5	8,3	<1,5	11,4	<7,3	<7,3	<14,7	<1,5
Ruissellements..... (1)	—	0,4	—	8,3	1,6	1,0	0,9	0,4
Écoulements de base (2)	—	3,7	—	95,0	13,3	12,2	9,0	2,6
TOTAL..... (1)+(2)	—	4,1	—	103,3	14,9	13,2	9,9	3,0

TABLEAU XII

Bassin du Losériqué: quantités d'éléments minéraux apportées par les pluies et exportées par les eaux d'écoulement; éléments traces (en g/ha/an)

	Fe	Al	Li	Rb	Sr	Ba	Ti	V	Cr	Mn	Ni	Cu
Pluies incidentes.....	234	125	9	12	45	77	32	5	16	50	16	31
Ruissellements..... (1)	305	197	2,2	3,0	4,9	8,2	38,7	3,4	3,8	7,4	3,3	2,7
Écoul. de base..... (2)	954	297	7,4	26,0	63,6	63,6	41,4	9,0	12,7	14,2	7,4	12,2
TOTAL..... (1)+(2)	1259	494	9,6	29,0	68,5	71,8	80,1	12,4	16,5	21,6	10,7	14,9

Les quantités de sulfates apportées par les pluies sont deux fois plus élevées que celles qui sont évacuées du bassin par l'écoulement total, le rôle des ruissellements étant négligeable.

La silice évacuée par ruissellement équilibre sensiblement les apports atmosphériques. Mais ces derniers ne représentent qu'un dixième de la silice exportée.

Parmi les éléments en traces (tabl. 12), l'action des eaux de ruissellement est très importante sur le transport du titane. Cependant, les quantités évacuées sont sensiblement identiques aux apports atmosphériques.

Les apports en solution par les pluies sont très supérieurs aux quantités évacuées par les ruissellements pour : lithium, rubidium, strontium, baryum, chrome, manganèse, nickel et cuivre. Ils sont très inférieurs pour fer et aluminium.

Les quantités exportées par l'écoulement total sont inférieures à celles apportées par les pluies pour manganèse, nickel et cuivre, identiques pour lithium, baryum et chrome et supérieures pour fer, aluminium, rubidium, strontium, titane et vanadium.

## 2. Bassin de l'Amitioro (forêt) (fig. 3).

En milieu forestier, les quantités d'éléments minéraux arrivant au sol par les pluies dépendent de la lame d'eau atteignant effectivement le sol étant

donné que la voûte forestière intercepte une partie des pluies. Des mesures faites sous forêt sempervirente en Côte d'Ivoire par CACHAN (1960) indiquent que, selon les averses, 50 à 95 % de la pluviosité au sommet des grands arbres, atteignent le sol. Nous nous baserons sur ces valeurs extrêmes pour déterminer les limites à l'intérieur desquelles se situent les apports minéraux par pluviollessivage (dans les tableaux 13 et 14, le chiffre supérieur correspond à 50 % de la pluviosité atteignant le sol, le chiffre inférieur, à 95 %).

Sur le bassin de l'Amitioro, l'écoulement de base représente 20 % du volume d'eau total écoulé.

Les pertes par écoulement sont très nettement inférieures aux apports par pluviollessivage et la majeure partie des exportations est due à l'action des eaux de ruissellements sauf pour chlore et sodium.

Des écarts très importants apparaissent entre les apports par pluviollessivage et l'évacuation par l'écoulement total pour le potassium. Pour cet élément les apports par les pluies sont compris entre 41 et 77 kg/ha/an tandis que les quantités exportées par le réseau ne sont que de 2,3 kg/ha/an. Le rubidium, dont le comportement est très voisin de celui du potassium est produit en abondance par le pluviollessivage (de 20 à 37 g/ha/an) tandis que les quantités évacuées sont très faibles (3 g/ha/an).

Les sulfates et les phosphates subissent également à la surface du bassin une forte rétention. Par contre, les quantités de chlorures, de sodium, de calcium et

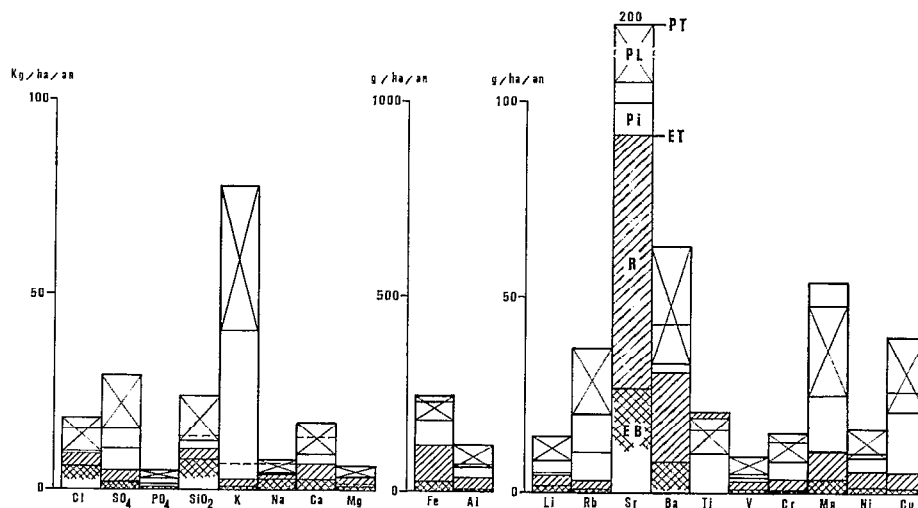


Fig. 3. — Bassin de l'Amitiero (forêt) : Bilan des éléments minéraux (Pi = pluie incidente ; PL = pluviollessivage ; PT = Pi + PL = apports totaux par les pluies ; R = ruissellement ; EB = écoulement de base ; ET = R + EB = écoulement total).

TABLEAU XIII

Bassin de l'Amitiero : quantités d'éléments minéraux apportées par les pluies et exportées par les eaux d'écoulement : éléments majeurs (en kg/ha/an)

		Cl	SO <sub>4</sub>	PO <sub>4</sub>	SiO <sub>2</sub>	K	Na	Ca	Mg
Pluies incidentes.....		15,1	10,2	<1,3	<13,1	<6,6	<6,6	<13,1	<1,3
Pluviollessivage	50 %	9,5	15,1	2,6	12,5	40,7	3,8	8,9	3,1
	95 %	18,1	28,7	4,8	23,7	77,3	7,2	16,8	6,0
Ruissellement	Petit bassin	0,8	2,8	0,2	10,3	2,1	0,8	3,9	1,9
	(1) Grand bassin	3,1	2,5	0,02	7,5	1,5	1,3	3,9	2,3
(2) Écoulement de base.....		5,8	1,9	0,04	2,6	0,8	2,9	2,2	1,0
TOTAL (1 + 2).....		8,9	4,4	0,06	10,1	2,3	4,2	6,1	3,3

de manganèse évacuées sont assez voisines, quoique plus faibles, des apports par les pluies.

Parmi les éléments traces, seules les quantités de titane précipitées et exportées s'équilibrent. Pour les autres éléments, les exportations sont inférieures aux apports. La différence est grande pour fer, aluminium, rubidium, chrome, manganèse et cuivre ; elle est plus faible pour lithium, strontium, baryum, vanadium et nickel.

## CONCLUSION

Les comparaisons qui ont été établies entre les quantités d'éléments minéraux exportées et les quantités de ces mêmes éléments apportées par les eaux de pluie et le pluviollessivage sous forêt démontrent qu'il est indispensable de tenir compte de ces dernières puisqu'elles perturbent profondément le bilan géochimique des bassins.

TABLEAU XIV

Bassin de l'Amitioto: quantités d'éléments minéraux apportées par les pluies et exportées par les eaux d'écoulement; éléments traces (en g/ha/an)

		Fe	Al	Li	Rb	Sr	Ba	Ti	V	Cr	Mn	Ni	Cu
Pluies incidentes.....		230	68	5	10	100	43	16	4	13	54	10	26
Pluiolessivage	50 %	180	62	8	20	105	33	10	5	8	25	9	21
	95 %	342	117	14	37	200	63	19	9	15	48	16	40
Ruissellement	Petit bassin	81,3	11,2	2,0	2,3	28,7	12,4	3,3	1,2	1,6	2,8	3,7	3,6
	(1) Grand bassin	92,2	28,2	3,2	2,4	64,9	22,8	17,0	1,7	2,8	7,5	4,0	4,1
(2) Écoulement de base.....		20,9	3,2	1,3	0,6	26,6	7,5	3,1	1,0	0,6	3,4	1,1	1,0
Total (1+2).....		113	31,4	4,5	3,0	91,5	30,3	20,1	2,7	3,4	10,9	5,1	5,1

Il a été estimé que les éléments déposés à la surface des bassins par les précipitations atmosphériques représentent, pour l'ensemble des éléments étudiés :

1. *en savane* : — moins de 40 % des éléments majeurs  
— et 30 % des éléments traces exportés.
2. *sous forêt* : — de 250 à 460 % des éléments majeurs (dont moins de 170 % sont issus des pluies incidentes)  
— de 150 à 290 % des éléments traces exportés (180 % environ provenant des pluies incidentes).

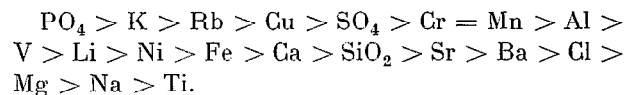
En savane, les quantités transportées par les eaux de ruissellement sont presque identiques à celles déposées par les pluies incidentes. Par contre, les eaux de l'écoulement de base évacuent des éléments minéraux issus de l'altération du substratum granitique et diffusant vers la surface à partir des solutions concentrées en contact avec la roche mère. Pour ce bassin, l'érosion l'emporte sur les apports atmosphériques : le couvert végétal réduit n'entraîne qu'une faible rétention biologique et les conditions d'écoulement sont favorables à l'évacuation des produits de l'altération.

En milieu forestier, le rapport entre la hauteur de la lame d'eau précipitée et celle de la lame d'eau écoulée est très faible. Les possibilités d'évacuation sont donc limitées. De plus, la biomasse forestière constitue un vaste réservoir d'éléments minéraux prélevés dans les solutions du sol et puisés plus ou moins sélectivement dans l'atmosphère. Une partie d'entre eux sont restitués au sol de manière différentielle par le pluiolessivage des produits de

récréation et des dépôts atmosphériques sur les feuillages. La forêt agit donc comme un vaste filtre vis-à-vis des éléments atmosphérique, d'une part et vis-à-vis des solutions du sol, d'autre part.

Les apports combinés par les pluies incidentes et le pluiolessivage alimentent en grande partie les ruissellements superficiels et les solutions du sol. Mais les éléments mis en solution sont en partie bloqués par le milieu biologique qui exerce à leur égard une rétention différentielle agissant ainsi sur leur possibilité de migration.

Le calcul des rapports entre les quantités déposées sur le bassin et les quantités exportées de chaque élément permet d'établir l'ordre de lessivage croissant (ou de rétention décroissant) suivant :



Il apparaît que la rétention s'exerce sélectivement au profit des phosphates, du potassium, du rubidium, du cuivre, des sulfates, du chrome et du manganèse. Ces éléments subissent un cycle rapide et une grande partie disparaît des solutions par consommation biologique avant de parvenir, par les principaux chenaux d'écoulement, à l'exutoire du bassin.

Dans un tel milieu, les apports atmosphériques et l'accumulation des éléments minéraux en surface favorise l'action des eaux de ruissellement qui contribuent à la majeure partie des exportations. Les quantités évacuées par les eaux de l'écoulement de base demeurent en général plus faibles car bien que les solutions soient plus concentrées du fait de mauvaises conditions de drainage, elles ne représentent qu'une faible part du volume total écoulé.

Ces résultats ne valent que pour des bassins dont les caractéristiques sont bien définies. Il est évident que des conclusions générales ne pourraient résulter que d'une étude étendue à une plus grande variété de bassins dont le choix serait fixé en fonction des éléments ou des combinaisons d'éléments suivants :

couverture végétale, substratum, pluviosité, topographie et situation par rapport aux influences océaniques.

Manuscrit reçu au S.C.D. de l'O.R.S.T.O.M. le 25 août 1975.

## BIBLIOGRAPHIE

- ALEKIN (O. A.) et BRAZHNIKOVA (L. V.), 1957. — New data on the average composition of river water for the territory of the USSR. *Acad. Sci. USSR Proc.*, 114 : 49-52.
- ANGINO (E. E.), BILLINGS (G. K.) et ANDERSEN (N.), 1966. — Observed variations in the strontium concentration of sea water. *Chem. Geol. Netherlands*, 1 : 145-153.
- ARPINO (P.), VAN DORSSELAER (A.), SERVIER (K. D.) et OURISSON (G.), 1972. — Cires aériennes dans une forêt de pins. *C.r. Acad. Sci.*, Paris, 275 : 2837-2840.
- BAAS BECKING (L. G. M.), KAPLAN (I. R.) et MOORE (I. R.), 1960. — Limits of the natural environment in terms of pH and oxidation-reduction potentials. *Journ. Geol.*, 68, 3 : 243-284.
- BARKER (D. R.) et ZEITLIN (H.), 1972. — Metal-ion concentrations in sea-surface microlayer and size-separated atmospheric aerosol samples in Hawaii. *Journ. Geophys. Res.* 77, 27 : 5076-5086.
- BARTHOLOMEW (W. V.), MEYER (J.) et LAUDELOUT (H.), 1953. — Mineral nutrient immobilisation under forest and grass fallow in the Yangambi (Belgian Congo) region. *INEAC, Sér. Sci.*, 57, 27 p.
- BATULIN (S. G.), 1964. — The evaporational concentration of rare elements in steppes. *Intern. Geol. Rev.*, 6 : 763-767.
- BEAR (F. E.), 1955. — Chemistry of the soils. *Rei tholds Pub. Co.*, p. 140.
- BERNHARD-REVERSAT (F.), 1970. — Étude de la litière et de sa contribution au cycle des éléments minéraux en forêt ombrophile de Côte d'Ivoire. *Æcol. Plant.*, V : 247-266.
- BERNHARD-REVERSAT (F.), 1972. — Décomposition de la litière de feuilles en forêt ombrophile de basse Côte d'Ivoire. *Æcol. Plant.*, 7, 3 (sous presse).
- BLOGH (M. R.) et LUECKE (W.), 1972. — Geochemistry of ocean water bubble spray. *Journ. Geophys. Res.*, 77, 27 : 5100-5105.
- BONIFAS (M.), 1959. — Contribution à l'étude géochimique de l'altération latéritique. *Mém. Serv. Carte Géol. Als.-Lorr.*, 17, 159 p.
- BRAY (J. R.) et GORHAM (E.), 1964. — Litter production in forests of the world. *Adv. Ecol. Res.*, 2 : 101-157.
- BRUEVIC (S. V.) et KULIK (E. Z.), 1967. — Modification de la composition saline fondamentale de l'eau de mer pendant le passage de cette dernière dans l'atmosphère. *Dokl. Akad. Nauk. SSSR.*, 175 : 697-699 (en russe).
- CACHAN (P.), 1960. — L'étude des microclimats et de l'écologie de la forêt sempervirente de Côte d'Ivoire. Centre O.R.S.T.O.M. d'Adiopodoumé, C. I., *Rapp. multigr.*
- CHESSELET (R.), MORELLI (J.) et BUAT-MÉNARD (P.), 1972. — Variations in ionic ratios between reference sea water and marine aerosols. *Journ. Geophys. Res.*, 77, 27 : 5116-5131.
- CHESTER (R.) et JOHNSON (L. R.), 1971. — Atmospheric dusts collected off the Atlantic coasts of North Africa and the Iberian Peninsula. *Marine Geol.*, 11, p. 251.
- DEFOSSEZ (M.), MANGIN (J. P.), PINTA (M.) et VAN DEN DRIESSCHE (R.), 1967. — Répartition de quelques éléments traces dans les eaux de surface en zone intertropicale (Côte d'Ivoire). *Bull. Serv. Carte Géol. Als. Lorr.*, 20, 4 : 257-276.
- DELANY (A. C.), PARKIN (D. W.), GRIFFIN (J. J.), GOLDBERG (E. D.) et REIMANN (B. E. F.), 1967. — Airborne dust collected at Barbados. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 31, p. 885.
- DOMMERGUES (Y.), 1963. — Les cycles biogéochimiques des éléments minéraux dans les formations tropicales. *Rev. Bois et Forêts des Tropiques*, 87 : 9-25.
- DURUM (W. H.) et HAFPTY (J.), 1960. — Occurrence of minor elements in water. *U.S. Geol. Surv. Circ.*, 445, 11 p.
- ELDIN (M.), 1971. — Le climat. In : le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. *Mém. O.R.S.T.O.M.*, 50 : 73-108.
- ERIKSSON (E.), 1955. — Airborne salts and the chemical composition of river waters. *Tellus*, VII-2 : 243-250.
- ERIKSSON (E.), 1958. — Le climat chimique et les sols salins dans la zone aride. Recherches sur la zone aride. X : climatologie. *UNESCO* : 163-198.
- ERIKSSON (E.), 1960. — The yearly circulation of chloride and sulfur in nature: meteorological, geochemical and pedological implications. Part II. *Tellus*, XII-1 : 63-109.
- FAIRBRIDGE (R. W.), 1966. — The encyclopedia of oceanography. *Reinhold Publ. Corp.*, New York, 1021 p.
- FOLGER (D. W.), 1970. — Wind transport of land-derived mineral, biogenic and industrial matter over the North Atlantic. *Deep Sea Res.*, 17, p. 337.
- FØRLAND (E. J.), 1973. — A study of the acidity in the precipitation in Southwestern Norway. *Tellus*, 25, 3 : 291-299.
- GAMBELL (A. W.) et FISHER (D. W.), 1966. — Chemical composition of rainfall Eastern North Carolina and South-eastern Virginia. *Geol. Surv. Water-Supply Paper*. 1535-K : 1-41.
- GORHAM (E.), 1955. — On some factors affecting the chemical composition of Swedish fresh water. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 7 : 129-150.
- GORHAM (E.), 1957. — The chemical composition of rain from Rosscahill in county Galway. *The Irish Natural Journ.*, XII : 122-125.

- GORHAM (E.), 1958 a. — Free acid in British soils. *Nature*, 181, p. 106.
- GORHAM (E.), 1958 b. — The influence and importance of daily weather conditions in the supply of chloride, sulfate and other ions to fresh waters from atmospheric precipitation. *Roy. Soc. London Philos. Trans.*, B, 247 : 147-178.
- GORHAM (E.), 1961. — Factors influencing supply of major ions to inland waters, with special reference to the atmosphere. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 72 : 795-840.
- GRANAT (L.), 1972. — On the relation between pH and the chemical composition in atmospheric precipitation. *Tellus*, 24, 6 : 550-560.
- GRIFFIN (J. J.), WINDOM (H. L.) et GOLDBERG (E. D.), 1968. — The distribution of clay minerals in the world ocean. *Deep Sea Res.*, 15 : 433-459.
- HOUGHTON (H. G.), 1955. — On the chemical composition of fog and cloud water. *Jour. Meteorol.*, 12 : 355-357.
- JOHNSON (N. M.), LIKENS (G. E.), BORMANN (F. H.) et PIERCE (R. S.), 1968. — Rate of chemical weathering of silicate minerals in New Hampshire. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 32, 5 : 531-545.
- JUNGE (C. E.) et GUSTAFSON (P. E.), 1957. — On the distribution of sea salt over the United States and its removal by precipitation. *Tellus*, IX, 2 : 104-173.
- KOMABAYASI (M.), 1964. — Primary fractionation of chemical components in the formation of submicron spray drops from sea salt solution. *Jour. Met. Soc. Japan*, 42-5 : 309-316.
- KONOVALOV (G. S.) et KOLESNIKOVA (T. K. H.), 1969. — Éléments traces dans les précipitations atmosphériques de la région du réservoir d'Otkaznoe. *Gidrokhim. Mater.*, SSSR, 49 : 74-79 (en russe).
- KOYAMA (T.) et SUGAWARA (K.), 1953. — Separation of the components of atmospheric salt and their distribution. *Chem. Soc. Japan Bull.*, 26 : 123-126.
- LAUDELOUT (H.) et MEYER (J.), 1954. — Les cycles d'éléments minéraux et de la matière organique en forêt équatoriale congolaise. *V<sup>e</sup> Cong. Intern. Sci. Sol.*, 2 : 267-272.
- LELONG (F.), 1969. — Nature et genèse des produits d'altération de roches cristallines sous climat tropical humide (Guyane française). *Thèse Sci.*, Nancy, 188 p.
- LENEUF (N.), 1959. — L'altération des granites calcaireux et des granodiorites en Côte d'Ivoire forestière et les sols qui en sont dérivés. *Thèse Sci.*, Paris, 210 p.
- LENEUF (N.), SOUCHÈRE (P. de la) et DABIN (B.), 1957. — Contribution à l'étude pédologique de la région N. E. de Divo. *Ed. Cofafruit*, 61 p.
- LENOIR (F.), 1971. — Données relatives au transport en solution de quelques éléments en traces par un fleuve en Côte d'Ivoire (Le Bandama). *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Géol.*, III, 2 : 145-166.
- LENOIR (F.), 1972. — Exportation chimique d'un bassin intertropical (le Bandama, Côte d'Ivoire). Influence des conditions hydrologiques. *Thèse, Sci.*, Nice, 375 p.
- LIKENS (G. E.), BORMANN (F. H.), JOHNSON (N. M.) et PIERCE (R. S.), 1967. — The calcium, magnesium, potassium and sodium budgets for a small forested ecosystem. *Ecology*, 48, 5 : 772-785.
- MATHIEU (P.), 1971 a. — Apports chimiques par les eaux de pluie et action des eaux de ruissellement en milieu forestier tropical (Côte d'Ivoire). *C.r. Acad. Sci.*, Paris, 273 : 45-48.
- MATHIEU (P.), 1971 b. — Érosion et transport solide sur un bassin versant forestier tropical (bassin de l'Amitioro, Côte d'Ivoire). *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Géol.*, III, 2 : 31-59.
- MATHIEU (P.), 1972. — Apports chimiques par les précipitations atmosphériques en savane et sous forêt. Influence du milieu forestier intertropical sur la migration des ions et sur les transports solides (bassin de l'Amitioro, Côte d'Ivoire). *Thèse Sci.*, Nice, 441 p.
- MATHIEU (P.) et MONNET (C.), 1971. — Physico-chimie des eaux de pluie en savane et sous forêt en milieu tropical. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Géol.*, III, 2 : 9-30.
- MULLER (G.), 1969. — High strontium contents and Sr/Ca ratios in lake Constance waters and carbonates and their sources in the drainage area of the Rhine River (Alpenrhein). *Mineralium deposita*, 4, 1 : 75-84.
- NEMERJUK (G. E.), 1969. — Rôle de l'évaporation au cours de la migration des sels dans l'atmosphère. *Gidrokhim. Mater.*, SSSR, 50 : 38-46 (en russe).
- NYE (P. H.), 1961. — Organic matter and nutrient cycles under moist tropical forest. *Plant and soil*, XIII, 4 : 333-346.
- NYKVIST (N.), 1963. — Leaching and decomposition of water soluble organic substances from different types of leaves and needle litter. *Stud. Forest. Suecica*, 3 : 1-31.
- PERRAUD (A.) et CHERROUX (M.), 1963. — Étude pédologique du bassin versant de Waraniéné-Doka (Région de Korhogo). *Rapp. O.R.S.T.O.M.*, multigr., 23 p.
- PIOTROWICZ (S. R.), RAY (B. J.), HOFFMAN (G. L.) et DUCE (R. A.), 1972. — Trace metal enrichment in the sea-surface microlayer. *J. Geophys. Res.*, 77, 27 : 5243-5254.
- PROSPERO (J. M.) et BONATTI (E.), 1969. — Continental dust in the atmosphere of the eastern equatorial Pacific. *J. Geophys. Res.*, 74 : 3362-3371.
- RAPP (M.), 1971. — Cycle de la matière organique et des éléments minéraux dans quelques écosystèmes méditerranéens. *Ed. C.N.R.S.*, Paris 184 p.
- REMEZOV (N. P.), 1961. — Decomposition of forest litter and the cycle of elements in an oak forest. *Sov. Soil Sci.* 7 : 703-711.
- RICKARD (D. T.), 1970. — The chemistry of copper in natural aqueous solutions. *Stockholm Contrib. Geol.*, Sweden, 23, 1, 64 p.
- SCHOELLER (M.), 1960. — Teneurs mensuelles et annuelles en chlore de l'eau de pluie dans le bassin d'Aquitaine. *A.I.H.S.*, 53 : 343-350.
- SELEZNEVA (E. S.), 1972. — Estimation of the background contamination of the atmosphere from the chemical composition of precipitation. *Tellus*, 24, 2 : 122-127.
- SKOUGSTAD (M. W.) et HERR (C. A.), 1960. — Occurrence of strontium in natural water. *U.S. Geol. Surv. Circ.*, 420, 6 p.
- SUGAWARA (K.), 1964. — Migration des éléments dans l'hydrosphère et l'atmosphère. In : La chimie de l'écorce terrestre. *Izd. AN.*, SSSR, M, 11 : 469-478 (en russe).
- SUGAWARA (K.), 1965. — Exchange of chemical substances

- between air and sea. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, 3 : 59-77.
- SULEJMANOV (D. M.) et LISTENGARTEN (V. A.), 1966. — Sur la composition chimique des précipitations atmosphériques de la presqu'île d'Apsheron. *Akad. Nauk. Azerbajdzh., SSSR, Dokl.*, 22, 12 : 42-44 (en russe).
- SUPATASHVILI (G. D.), 1965. — Composition chimique des précipitations atmosphériques et des glaciers sur le territoire de la R.S.S. de Géorgie. *Compte rendu de thèse*, Thilisi.
- TARDY (Y.), 1967. — Étude géochimique des eaux d'une nappe d'arène en pays cristallin (Korhogo, Côte d'Ivoire). *Bull. Serv. Carte Géol. Als. Lorr.*, 20, 4 : 235-255.
- TARDY (Y.), 1969. — Géochimie des altérations. Étude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique. *Mém. Serv. Carte Géol. Als. Lorr.*, 31, 199 p.
- TARDY (Y.) et MILLOT (G.), 1966. — Premiers résultats de l'étude chimique du bassin versant de Korhogo (Côte d'Ivoire). *C. r. Acad. Sci. Paris*, 263 : 753-755.
- VIRO (P. J.), 1953. — Loss of nutrients and the natural nutrient balance of the soil in Finland. — *Comm. Inst. For. Fenn.*, XIII, 1, 51 p.
- WENT (F. W.), 1960. — Organic matter in the atmosphere, and its possible relation to petroleum formation. *Proc. Natl. Acad. Sci., U.S.*, 46 : 212-221.
- WINDOM (H. L.), 1969. — Atmospheric dust records in permanent snowfields: implications to marine sedimentation. *Géol. Soc. Amer. Bull.*, 80 : 761-782.
- WINDOM (H. L.), 1970. — Contribution to atmospherically transported trace metals to South Pacific sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 34, 4 : 509-514.
- YAALON (D. H.) et KATZ (A.), 1962. — The chemical composition of precipitation in Israel. *Bull. Res. Council. Israel*, G, II, G : 189-190.