

**BILAN DE L'ÉROSION ET DE L'ALTÉRATION  
EN CLIMAT TROPICAL HUMIDE.  
ESTIMATION DE LA VITESSE D'APPROFONDISSEMENT DES PROFILS.  
ÉTUDE DU BASSIN VERSANT DE L'OUHAM  
(RÉPUBLIQUE CENTRAFRICAINE)**

J.Y. GAC,

*Géologue de l'ORSTOM, Centre de Fort-Lamy (Tchad)*

M. PINTA

*Laboratoire de Spectrographie de S.S.C. de l'ORSTOM - Bondy*

**RÉSUMÉ**

L'inventaire et l'évaluation quantitative des ions majeurs et des espèces minérales sont précisés dans les eaux drainant le bassin versant de l'Ouham (44 000 km<sup>2</sup>) situé au nord de la République Centrafricaine.

La concentration moyenne annuelle en substances dissoutes est de 56,2 mg/l. La kaolinite est le minéral prépondérant dans les suspensions dont la concentration moyenne annuelle atteint 40,6 mg/l.

L'érosion mécanique spécifique se chiffre à 10 t/km<sup>2</sup>/an et l'érosion chimique spécifique à 7,5 t/km<sup>2</sup>/an.

L'évolution des sols se traduit à l'heure actuelle par une accumulation de la kaolinite: l'approfondissement des profils l'emporte sur l'érosion mécanique et l'épaisseur des sols augmente d'environ 1 m tous les 400 000 ans (0,002 5 mm/an).

**SUMMARY**

The inventory and the quantitative evaluation of the principal ions and mineral species are clarified in the waters draining the river basin of the Ouham (44 000 km<sup>2</sup>) situated in the northern part of the Central African Republic.

The annual average concentration of dissolved substances is 56.2 mg/l. Kaolinite is the principal mineral in the suspensions whose average annual concentration reaches 40.6 mg/l.

The specific mechanical erosion amounts to 10 t/km<sup>2</sup>/year, and the specific chemical erosion amounts 7.5 t/km<sup>2</sup>/year.

At the present time, the soil evolution shows an accumulation of kaolinite. The deepening of the profiles prevails over the mechanical erosion and the soil thickness increases at the rate about/meter every 400 000 years (0.002 5 mm/year).

**ZUSAMMENFASSUNG**

Die Inventur und quantitative Bestimmung der meistvorkommenden Ionen und Mineralarten sind in den Wasserläufen gemacht, die das Sammelgebiet von Ouham (44 000 km<sup>2</sup>), im Norden der zentralafrikanischen Republik, entwässern.

Die mittlere jährliche Konzentration an gelösten Substanzen beträgt 56,2 mg/l. Der Kaolinit ist das vorherrschende Mineral in dem ungelösten Teil, dessen mittlere jährliche Konzentration 40,6 mg/l erreicht.

Die spezifische mechanische Erosion beläuft sich auf 10 t/km<sup>2</sup> pro Jahr und die spezifische chemische Erosion auf 7,5 t/km<sup>2</sup> pro Jahr.

Die Entwicklung des Bodens drückt sich zur Zeit durch eine Kaolinhäufung aus: die Vertiefung der Profile überwiegt die mechanische Erosion und die Dicke des Bodens nimmt um etwa 1 Meter alle 400 000 Jahre (0,002 5 mm/Jahr) zu.

РЕЗЮМЕ

Были установлены состав и количественная оценка главных ионов и видов минералов в водах дренирующих водосборный бассейн Ухам (44.000 км<sup>2</sup>) на севере Центральноафриканской Республики.

Средняя годовая концентрация растворенных веществ равняется 56,2 мг/л. Каолинит является преобладающим элементом в суспензиях средняя годовая концентрация которых достигает 40,6 мг/л.

Специфическая механическая эрозия оценивается в 10 т/км<sup>2</sup>/год, а специфическая химическая — в 7,5 т/км<sup>2</sup>/год.

Развитие почв выражается, в настоящее время, накоплением каолинита: углубление профилей пре-

обладает над механической эрозией и мощность почв увеличивается примерно на 1 метр в 400.000 лет (0,0025 мм/год).

INTRODUCTION

La moitié de la superficie du continent africain est occupée par les bassins de cinq grands fleuves. Quatre d'entre eux (le Nil, le Niger, le Congo, le Zambèze) atteignent la mer ou les océans. Le bassin Tchadien par contre, sans exutoire externe constitue en Afrique Centrale une entité bien particulière par son caractère exclusivement continental (fig. 1).

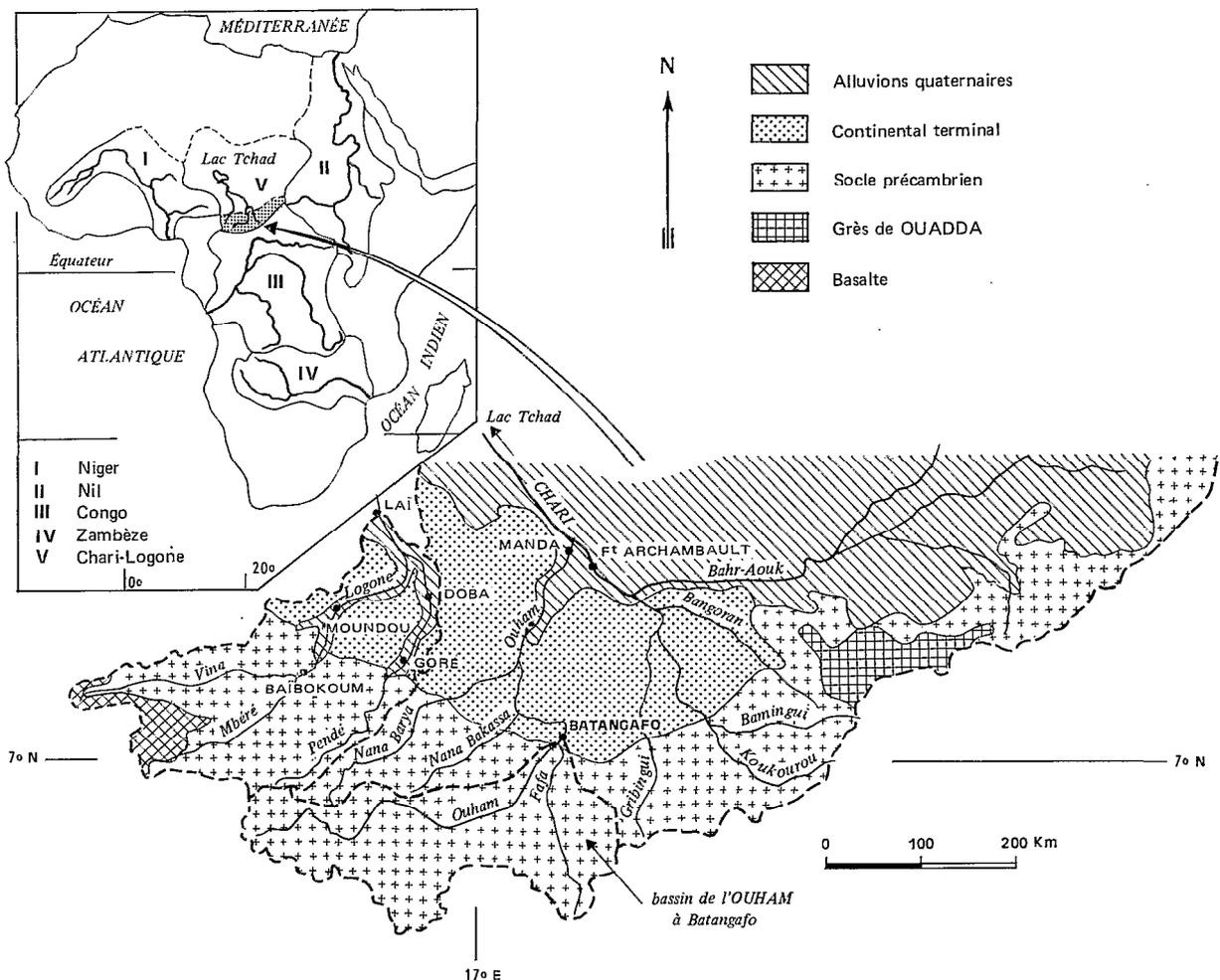


FIG. 1. — Bassin Amont du Chari et du Logone.

La majeure partie des apports fluviaux au lac Tchad est assurée, par le Chari et le Logone ( $40 \times 10^9 \text{ m}^3$  par an d'après ROCHE, 1968). Les bassins versants de ces deux fleuves sont adossés aux flancs nord de l'Adamaoua (Cameroun) et de la dorsale centrafricaine.

A la surface du globe, l'érosion mécanique et l'érosion chimique, s'associent pour réduire les reliefs et pénétrent les continents. En zone tropicale humide ces deux phénomènes sont amplifiés et les bassins amonts du Chari et du Logone constituent un champ d'observation idéal et susceptible de fournir des données chiffrées précises. De plus leur situation en dehors des influences océaniques et à l'écart des pollutions humaines et industrielles offre une garantie pour l'interprétation des mesures de la qualité des eaux.

L'ablation chimique se manifeste principalement à la base du manteau d'altération à proximité de la roche-mère et contribue ainsi à l'approfondissement des profils. A l'opposé l'érosion mécanique affecte surtout les horizons de surface, réduisant ainsi les sols dont l'épaisseur dépendra alors de l'ampleur relative de ces deux phénomènes.

L'objet de cette étude est double : estimer d'une part la quantité et la nature des apports fluviaux sous formes dissoutes et « figurées » (particules en suspension et matériaux grossiers du charriage de fond) et d'autre part ce bilan étant connu, comparer l'érosion mécanique moyenne des versants aux effets du soutirage chimique.

## I. — LE BASSIN DE L'OUHAM A BATANGAFO

Affluent de la rive gauche du Chari, l'Ouham contrôle à Batangafo, un bassin de  $44,7 \cdot 10^3 \text{ km}^2$  et son débit moyen annuel est de l'ordre de  $11 \cdot 10^9 \text{ m}^3$  (BILLON et OBERLIN, 1968). A l'exception des têtes de bassin situées dans la partie ouest où les pentes sont assez accusées, l'ensemble, d'une altitude moyenne de 580 m, ne présente qu'une succession monotone de collines à pente douce. Les formations du socle précambrien constituent l'essentiel du soubassement géologique avec une forte représentation des granites et des migmatites (60 %) et une représentation plus réduite des charnockites (16 %), des gneiss (12 %), des amphibolites (6 %) et des quartzites (5 %). En général la pédogénèse est de nature ferrallitique. On note cependant quelques sols ferrugineux tropicaux, sols hydromorphes et

à l'amont des sols peu évolués d'érosion sur roches affleurantes.

D'après la récente classification de PÉGUY (1970), le climat est de type tropical avec une alternance de saison sèche (5 mois) et humide (7 mois), une température moyenne annuelle de  $26^\circ\text{C}$  et des précipitations moyennes annuelles de 1 410 mm (GAC, 1972). La savane boisée colonise les versants et quelques forêts-galeries s'installent le long de quelques cours d'eau secondaires.

## II. — MÉTHODES D'ÉTUDE

### *Prélèvements et échantillonnage*

Les quantités de substances dissoutes et de particules fines qui transitent à l'exutoire du bassin dans les eaux de l'Ouham sont respectivement données par les produits :  $V \times C$  et  $V \times T$ ,  $V$  étant le volume d'eau écoulé dans l'année,  $C$  et  $T$  respectivement les concentrations moyennes annuelles par unité de volume, en sels dissous et en suspensions. Si la connaissance de  $V$  a pu être immédiate à partir des données fournies par la section d'Hydrologie de l'ORSTOM, l'estimation de  $C$  et  $T$  s'est avérée en revanche beaucoup plus difficile et a nécessité la réalisation d'un plan d'échantillonnage.

Le régime du cours d'eau a guidé la répartition et le nombre de prélèvements durant chaque période du découpage annuel et saisonnier. Ainsi dans le cas de l'Ouham, grand collecteur à crue unique, on a successivement considéré, la montée des eaux (juin-juillet), les hautes eaux (août-septembre-octobre), la décrue (novembre-décembre-janvier-février) et les basses eaux (mars-avril-mai). Les mesures effectuées à 20 cm sous la surface pour l'analyse des sels dissous ont été d'autant plus fréquentes dans chaque période que les concentrations étaient susceptibles d'y subir des variations importantes ou que le volume d'eau correspondant représentait un pourcentage appréciable du volume total annuel.

La charge en suspensions a été déterminée à l'aide de neuf mesures complètes du débit solide effectuées selon la technique décrite par BILLON (1968) et des quatorze échantillons recueillis dans les flacons servant à l'analyse des ions en solution.

### *Analyses*

Les analyses des éléments majeurs et traces dans les eaux, les dosages des matières amorphes dans les

particules en suspension, ont été réalisés au Laboratoire de Spectrographie ORSTOM de Bondy selon les techniques mises au point par PINTA *et coll.* (1971) et SÉGALEN (1968). Les analyses de la phase en suspension réalisées au Centre de Sédimentologie et de Géochimie de la Surface à Strasbourg, ont été effectuées par spectrométrie à lecture directe selon la méthode décrite par ATAMAN (1963), ATAMAN et BESNUS (1965) et mise au point par BESNUS et LUCAS (1968) ou par spectrophotométrie d'absorp-

tion atomique (Na, K, Li, Rb) selon KREMPP (1969). La nature des minéraux argileux a été déterminée par diffraction des rayons X d'après les critères retenus par LUCAS (1962).

### III. — LES APPORTS A BATANGAFO

Si  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  et  $V_4$  représentent les volumes d'eau partiels des différentes périodes et  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C_4$

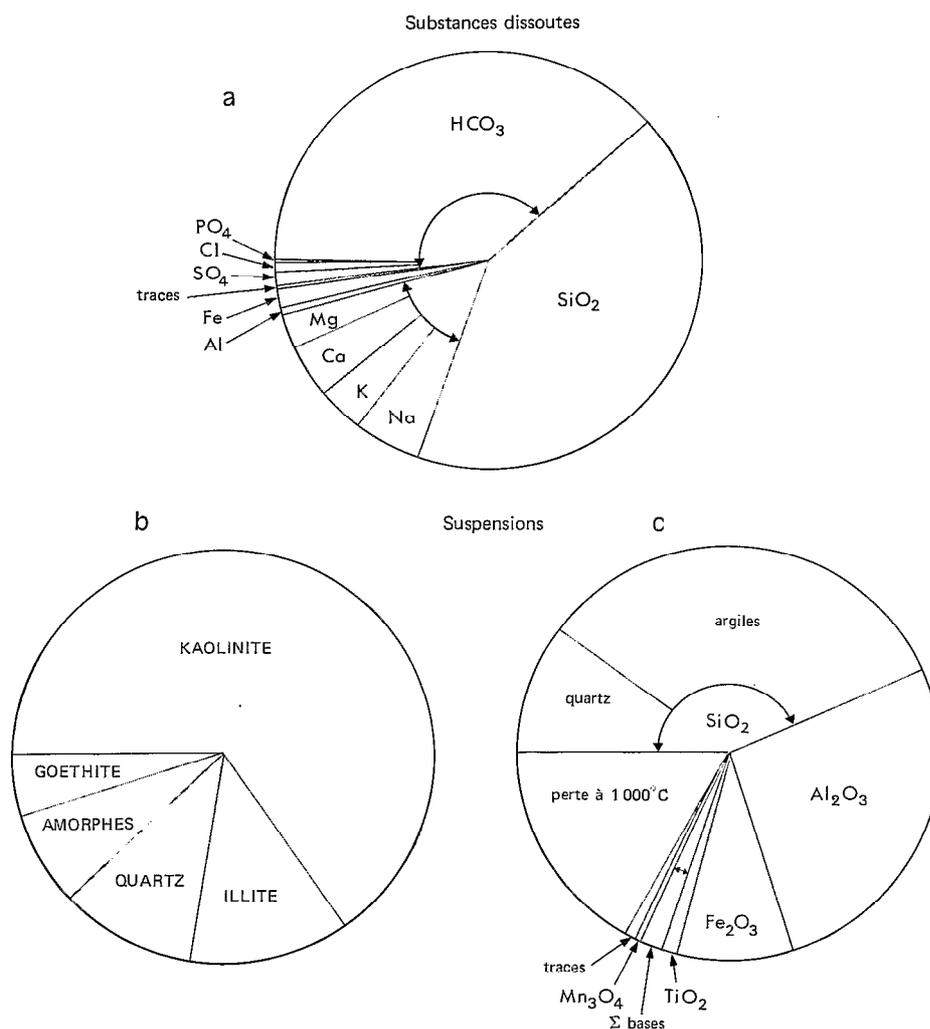


FIG. 2. — Répartition en pourcentage du poids total : des différents ions à l'exportation de substances dissoutes (a), des différentes espèces minérales à l'exportation de substances en suspension (b) et des différents oxydes dans la charge en suspension (c).

les concentrations moyennes correspondantes pour un élément, le tonnage annuel évacué de cet élément a été calculé par la somme :

$C_1V_1 + C_2V_2 + C_3V_3 + C_4V_4$  et la concentration moyenne annuelle par :

$$C_{\text{moy}} = \frac{C_1V_1 + C_2V_2 + C_3V_3 + C_4V_4}{V_1 + V_2 + V_3 + V_4}$$

L'évacuation des matières charriées par les rivières a lieu sous trois formes : dissoute, en fines suspensions et pour les particules de grosse taille par reptation ou charriage au fond du fleuve.

*Les substances dissoutes*

L'exportation totale annuelle de substances dissoutes s'élève à 578 000 t (tableau I) dont :

- montée des eaux : 50 000 t ( 9 %)
- hautes eaux : 342 000 t (59 %)
- décrue : 147 000 t (25 %)
- basses eaux : 39 000 t ( 7 %)

La silice et les bicarbonates (fig. 2a) constituent 95 % de la charge soluble, l'ensemble des bases y contribuant pour 15 %. L'aluminium et le fer sont présents mais il est probable que leurs tonnages respectifs ont été surestimés par suite de la prise en compte de quelques suspensions. En effet les concentrations les plus élevées en aluminium et en fer s'observent lors de la montée des eaux, période où la charge en suspension est maximum.

TABLEAU I

*Tonnages annuels de substances dissoutes*

Constituants		Tonnes/an
Cations	Na .....	28 500
	Ca .....	24 500
	K .....	20 500
	Mg .....	14 800
	Fe .....	10 000
	Al .....	1 500
	Traces .....	1 200
	Total .....	101 000
Anions	HCO <sub>3</sub> .....	244 000
	Cl .....	< 4 500
	SO <sub>4</sub> .....	< 8 000
	PO <sub>4</sub> .....	< 500
	Total .....	< 257 000
Cations + Anions .....		358 000
SiO <sub>2</sub> .....		220 000
Total de substances dissoutes .....		578 000

Les éléments les mieux exportés (en tonnes) sont dans l'ordre :

- (I) Si > Na > Ca > K > Mg > Fe > Al > Mn > Ti

La concentration moyenne annuelle en substances dissoutes est de 56,2 mg/l. Les eaux de la saison humide sont moins concentrées que celles de la saison sèche (tableau II) par suite d'un apport important d'eaux météoriques. Les variations de la charge

TABLEAU II

*Substances dissoutes, suspensions, charge totale : Concentrations saisonnières et annuelles (ppm)*

	Montée des eaux	Hautes eaux	Décrue	Basses eaux	Saison humide	Saison sèche	Année
Volume d'eau × 10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup> ....	0,98	6,31	2,38	0,60	7,29	2,98	10,27
Substances dissoutes .....	51,8	54,0	61,6	65,2	63,7	62,1	56,2
Suspensions .....	52,2	47,6	24,5	11,4	48,3	21,8	40,6
Charge totale .....	104,0	101,6	86,1	76,6	102,0	83,9	96,8

soluble (fig. 3) au cours des saisons sont principalement dues aux fluctuations des teneurs en ions HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> et pour moindre part à la silice et aux cations

(tableau III) et ceci semble indiquer une homogénéité de réponse au soutirage chimique par les eaux d'infiltration sur l'ensemble du manteau d'altération.

TABLEAU III

Concentrations saisonnières et annuelles (mg/l) en bicarbonates, silice, éléments alcalins et alcalino-terreux

	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SiO <sub>2</sub>	Na	K	Ca	Mg	Σbases
Montée des eaux	20,1	20,5	2,50	1,36	2,15	1,24	7,25
Hautes eaux	22,6	20,7	2,71	1,79	2,28	1,38	8,16
Décruée	26,8	22,8	3,07	2,70	2,55	1,59	9,91
Basses eaux	29,4	24,0	2,82	2,46	3,30	1,80	10,38
Moyenne annuelle	23,7	21,5	2,78	2,00	2,39	1,44	8,61

A 700 km de l'Océan Atlantique, le bassin se situe bien en dehors des influences océaniques comme en témoignent les faibles concentrations en chlore (< 0,5 mg/l). L'équilibre anions-cations est assuré par le bicarbonate seul.

La teneur moyenne en silice (21,5 mg/l) proche des valeurs données par SPRONCK (1941) pour le Congo (20,1 mg/l) ou par LIVINGSTONE (1963) pour l'ensemble des rivières africaines, diffère notablement de celles données par TRESCASES (1969) ou HERVIEU (1968) en Nouvelle-Calédonie et Madagascar (15 mg/l), par ROUGERIE (1958) en Côte d'Ivoire (16 mg/l), par GIBBS (1972) pour l'Amazone (11,2 mg/l) ou encore par GROVES (1972) pour le Sénégal (7 mg/l).

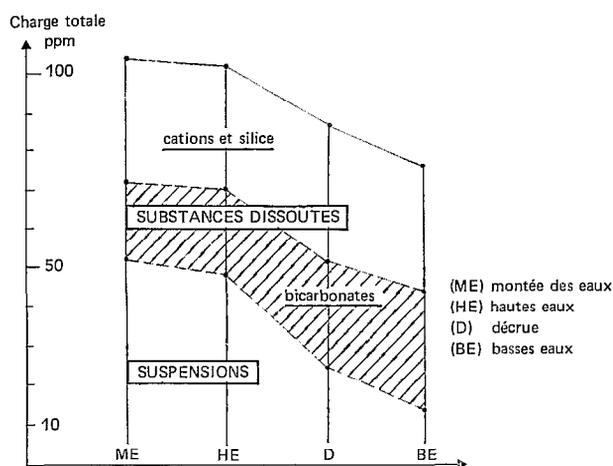


FIG. 3. — Variations saisonnières des concentrations en suspensions et en substances dissoutes.

La concentration moyenne annuelle (56,2 mg/l) peut être comparée aux teneurs en sels dissous données par d'autres auteurs sur les fleuves du continent africain ou américain. Ainsi GROVES (1972), cite les chiffres de 30,2 mg/l pour le Niger à Bamako; 31,6 mg/l pour le Sénégal à Bakel; 79,8 mg/l pour la Bénoué à Garoua; SPRONCK (1941) et LUCAS (1908) indiquent aux embouchures du Congo et du Nil 82,0 mg/l et 161 mg/l; LIVINGSTONE (1963) attribue aux rivières africaines une teneur moyenne en sels dissous de 121 mg/l; citons enfin les 166 mg/l de CONWAY (1942) pour le Mississippi et les 52,9 mg/l de GIBBS (1972) pour l'Amazone.

L'analogie entre les deux stations de Bamako et de Batangafo est assez frappante. En effet, elles contrôlent, pour l'ensemble des bassins du Niger et du Chari, les provinces amonts responsables de l'alimentation en eau des grandes dépressions alluviales Nigérienne et Tchadienne. Le tableau IV,

TABLEAU IV

Composition moyenne des eaux du Niger et de l'Ouham (mg/l)

Concentration (mg/l)		Pourcentage	
Ouham (moyenne annuelle)	Niger (GROVES, 1972)	Ouham	Niger
HCO <sub>3</sub> .....	23,7	42	43
SiO <sub>2</sub> .....	21,5	38	33
Na .....	2,78	4,9	4,6
Ca .....	2,39	4,3	8,0
K .....	2,00	2,5	3,0
Mg .....	1,44	3,5	5,0
Fe .....	1,00	1,4	—
SO <sub>4</sub> .....	<0,8	—	—
Cl .....	<0,5	<1,0	<3,0
PO <sub>4</sub> .....	<0,05	—	—
Total .....	56,2		

fait apparaître que malgré des teneurs en silice et bicarbonate bien plus élevées (du simple au double) dans le cas de l'Ouham, les différents ions participent de manière semblable à la charge soluble totale. Les pourcentages moyens sont de 42 % pour le bicarbonate, 35 % pour la silice, 6 % pour le calcium, 5 % pour le sodium, 4 % pour le potassium et 3 % pour le magnésium. Issues dans l'un comme dans l'autre cas du drainage des formations du socle précambrien, ces eaux semblent bien à l'heure actuelle,

caractériser ces vieux massifs à prédominance granitique, fortement arasés, colonisés par une savane boisée et sièges d'une pédogénèse de type essentiellement ferrallitique.

*Les suspensions (1)*

L'évacuation totale au cours du cycle hydrologique 1969-1970 évaluée à 420 000 t (GAC *et al.*, 1970) se répartit de la façon suivante :

- montée des eaux : 52 000 t (12 %)
- hautes eaux : 303 000 t (72 %)
- décrue : 58 000 t (14 %)
- basses eaux : 7 000 t ( 2 %)

Parmi les espèces minérales, la kaolinite domine (271 000 t et 64 %) ; viennent ensuite l'illite (57 000 t et 14 %), le quartz (44 000 tonnes et 10 %), les matières amorphes (28 000 t et 7 %), la goéthite (20 000 t et 5 %) (fig. 2b).

En tonnage (tableau V et fig. 2c), les éléments chimiques les mieux évacués sont dans l'ordre :

(II) Si > Al > Fe > Ti > K > Mn > Mg > Ca > Na

TABLEAU V

*Tonnages annuels en suspensions*

Constituants	Tonnes/an	
SiO <sub>2</sub> .....	182 000	→ Si = 85 000
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	113 400	→ Al = 60 300
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	37 300	→ Fe = 26 300
TiO <sub>2</sub> .....	5 200	→ Ti = 3 100
K <sub>2</sub> O .....	3 300	→ K = 2 700
Mn <sub>2</sub> O <sub>4</sub> .....	1 900	→ Mn = 1 400
MgO .....	1 700	→ Mg = 1 000
CaO .....	900	→ Ca = 640
Na <sub>2</sub> O .....	600	→ Na = 440
Traces .....	3 500	
Perte à 1 000 °C. ....	70 000	
<b>Somme .....</b>	<b>420 000</b>	

La concentration moyenne annuelle des suspensions est de 40,6 mg/l. Dans la même région sur les bassins amonts du Chari et du Logone et au Cameroun, CARRÉ (1972) et NOUVELOT (1972) indiquent 150 mg/l pour le Logone à Moundou, 75 mg/l pour

(1) Nos remerciements vont à M. RODIER (Président du Comité Technique d'Hydrologie de l'ORSTOM) dont l'appui matériel a permis la réalisation des travaux sur le terrain.

la Pendé à Doba, 50 mg/l pour l'Ouham à Manda, 53 mg/l pour le Chari à Fort-Archambault et 42 mg/l pour la Sanaga à Nachtigal. Par ailleurs GROVES (1972) et SPRONCK (1941) donnent les valeurs de 90 mg/l pour le Niger, 220 mg/l pour la Bénoué et 26 mg/l pour le Congo ; CONWAY (1942), cite 490 mg/l pour le Nil ; enfin GARRELS et MACKENZIE (1971) estiment à 85 mg/l la concentration moyenne en suspensions des rivières africaines.

La concentration en suspensions varie considérablement au cours des saisons (tableau II et fig. 3). A la fin de la saison sèche, la pratique généralisée des feux de brousse a laissé le sol à nu et sans grande protection végétale ; les premières pluies n'ont qu'un pouvoir érosif modéré par suite de la sécheresse du sol. Les précipitations suivantes par contre abordent un sol dont l'humidité s'est profondément modifiée, le ruissellement est intense et la concentration des eaux en suspensions augmente brutalement pour atteindre à l'inverse des ions en solution, son maximum lors de la montée des eaux. Elle décroît ensuite lentement alors que les hautes eaux ne sont pas encore atteintes. Lorsque le fleuve amorce sa décrue, la saison des pluies s'achève, la végétation s'installe, la dégradation des sols s'atténue et les eaux n'assurent plus que l'évacuation des particules fines déjà libérées et dont la concentration décroît régulièrement. Les basses eaux sont proches et on assiste au retour partiel des eaux d'infiltration et à la vidange des nappes ; les eaux chargées en substances dissoutes prennent de plus en plus d'importance, la concentration en suspensions atteint sa valeur la plus faible.

La composition minéralogique des suspensions est identique à celle des sols. L'étude entreprise par diffraction des rayons X sur les différents échantillons, met en évidence la présence nettement dominante de kaolinite accompagnée d'illite, de quartz, de fer sous la forme de goéthite et de matières amorphes. Comme l'ont montré QUANTIN (1965), BOULVERT (1968) et CHATELIN (1969) ces espèces minérales sont aussi dominantes dans les sols du bassin.

Cette similitude de constitution entre sol et suspension apparaît plus nettement avec l'observation de la composition chimique des suspensions et celle de la fraction inférieure à 2 μ que nous avons recueillie ou étudiée par CHATELIN (1969), des horizons de surface de quelques sols du bassin (tableau VI).

Alcalins, alcalino-terreux, titane et fer sont du même ordre de grandeur. Les teneurs en silice plus élevées, s'expliquent par la présence de quartz, d'autant plus marquée que les courants sont forts

TABLEAU VI

Composition chimique des suspensions et de la fraction inférieure à 2  $\mu$ . des horizons de surface de quelques sols du bassin

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Perte à 1000 °C	Somme
<b>SUSPENSIONS :</b>											
Montée des eaux .....	41,70	27,33	0,30	0,20	8,15	0,040	0,97	0,12	0,55	21,24	100,00
Hautes eaux .....	44,18	27,80	0,44	0,19	8,90	0,047	1,26	0,13	0,79	16,49	99,97
Décruée et basses eaux (moyenne)	42,43	23,90	0,40	0,20	9,72	0,048	1,35	0,24	0,96	20,76	100,00
<b>SOLS (horizons de surface)</b>											
Moyenne 5 échantillons haut de pente .....	38,16	32,42	0,35	0,30	11,20	0,075	1,38	< 0,05	0,27	15,68	99,88
Moyenne 6 échantillons mi-pente .....	40,10	31,80	0,32	0,30	7,90	0,119	1,23	< 0,05	0,45	17,79	100,06
Moyenne 2 échantillons bas de pente .....	41,70	32,70	0,41	0,30	8,00	0,023	1,03	< 0,05	0,32	15,38	99,91
Chatelin (1960) horizon A <sub>1,1</sub> ..	38,35	27,00	0,54	0,44	12,00	—	0,93	0,23	0,99	17,85	98,33

ou que les prélèvements ont été faits en profondeur. La séparation en deux lots lors d'une mesure a donné 42 % de silice en surface et 49 % pour les échantillons situés plus près du fond.

La détermination minéralogique semi-quantitative par diffraction de rayons X, peut se préciser et être reconstituée à l'aide de la composition chimique des suspensions (le pourcentage de matières amorphes sera supposé constant : 7 %). On admet par ailleurs que les alcalins, alcalino-terreux et le titane servent à construire une illite du type de celle présentée par MOSSER, GALL et TARDY (1971) et dont la composition chimique est la suivante : SiO<sub>2</sub> : 52,6 %; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : 25,2 %; K<sub>2</sub>O : 8,17 %; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : 3,50 %; MgO : 2,70 %; TiO<sub>2</sub> : 0,68 %; CaO : 0,50 %; Na<sub>2</sub>O : 0,16 %; Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> : 0,09 %; H<sub>2</sub>O (perte à 1 000 °C) : 5,82 %. L'excédent d'alumine sert ensuite à calculer le taux de kaolinite.

Le tableau VII, montre qu'au fur et à mesure que la concentration des suspensions décroît, le taux d'illite augmente alors que celui de la kaolinite régresse; le rapport kaolinite calculée/illite calculée dans les suspensions est égal à 7 pendant la montée des eaux, 4,6 aux hautes eaux et 4,3 en période de basses eaux. Ce rapport reste toujours supérieur à une valeur moyenne de 3,5 estimée par CHATELIN (1969) dans les sols de la région de Bossangoa située au cœur du bassin. Ceci indique une évacuation préférentielle de la kaolinite par rapport aux édifices micacés ou une destruction des illites au cours du transport, phénomène beaucoup plus prononcé en période de crue qu'à l'étiage.

TABLEAU VII

Répartition (en pourcentage) des espèces minéralogiques dans les suspensions

	Kaolinite	Quartz	Illite	Amorphes	Goethite
Montée des Eaux .....	72	8	10	7	3
Hautes eaux ..	64	10	14	7	5
Décruée et Basses eaux ....	62	12	15	7	4
Moyenne annuelle ....	64 %	10%	14%	7 %	5 %

#### Le charriage de fond

Le charriage de fond, constitué par des particules grossières dont le déplacement s'effectue par roulage et saltation, n'a fait l'objet d'aucune mesure dans cette étude. De nombreux auteurs ont donné une estimation de sa valeur par rapport aux apports en suspensions. POLIAKOV (1938) donne 3 % pour la Volga, SPRONCK (1941) trouve 7 % pour le Congo, ROUKHINE (1965) calcule 10 % pour la plupart des fleuves de plaine et 30 à 40 % pour les rivières de montagne, LUSTIG et BUSCH (1967) donnent 7 % dans les eaux drainant le bassin versant de Cache Creek en Californie, HALL (1967) indique 16 % pour la rivière Tyne en Angleterre, MATHIEU (1971)

cite 5 à 12 % en Côte d'Ivoire et GIBBS (1967) de 2 à 10 % pour l'Amazonie.

Dans le cas de l'Ouham de pente moyenne faible, le pourcentage estimé à 6 % de la charge en suspension, donne pour le charriage de fond, un tonnage annuel de 25 000 t. L'observation en étiage des bancs asséchés a montré qu'il s'agissait essentiellement de quartz, de micas, de feldspaths et de gravillons ferrugineux.

*Bilan annuel*

L'évacuation totale lors de la période d'observation (cycle hydrologique 1969-1970) s'élève à 1 023 000 t dont :

- 57 % pour les substances dissoutes,
- 41 % pour les particules fines en suspension,
- 2 % pour les matériaux du charriage de fond.

Le tonnage annuel des différents éléments chimiques (tableau VIII) obtenu en additionnant les poids respectifs migrant en solution et en suspension montre

TABLEAU VIII

*Tonnages annuels évacués (dissous et suspensions) des différents éléments chimiques*

Eléments chimiques	Tonnes/an
Si .....	187 600
Al .....	61 800
Fe .....	36 300
Na .....	28 940
Ca .....	25 140
K .....	23 200
Mg .....	15 280
Ti .....	3 250
Mn .....	1 800

que les éléments sont évacués dans des proportions qui sont à peu près celles des roches du soubassement géologique :

(III)  $Si > Al > Fe > Na > Ca > K > Mg > Ti > Mn$

Ceci montre par ailleurs que le bilan de l'évacuation s'équilibre de façon satisfaisante.

Mais, chacun des éléments se distribue entre la phase soluble et la phase en suspension :

Le silicium se partage de manière sensiblement égale entre les deux phases :

— Si dissous : 55 %; en suspension : 45 % dont 26 % dans la kaolinite, 11 % de quartz, 7 % dans les illites et 1 % dans le matériel amorphe.

Les bases s'en vont à l'état dissous mais une partie non négligeable du potassium quitte le bassin avec les édifices micacés en suspension :

- Na dissous : 99 %; en suspension : 1 %
- Ca — : 97 %; — : 3 %
- Mg — : 94 %; — : 6 %
- K — : 88 %; — : 12 %

L'aluminium et le titane sont évacués surtout sous formes « figurées » :

— Al dissous : 2 %; en suspension : 95 % dont 80 % dans la kaolinite, 12 % dans l'illite et 6 % avec le matériel amorphe.

— Ti dissous : 5 %; en suspension : 95 %.

Le fer et le manganèse ont des comportements intermédiaires :

— Fe dissous : 28 %; en suspension : 72 % dont 35 % dans le matériel amorphe, 34 % dans la goéthite et 3 % avec les édifices micacés.

— Mn dissous : 22 %; en suspension : 78 %.

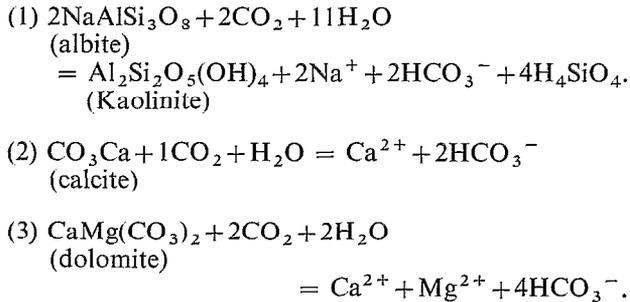
IV. — ÉROSION CHIMIQUE ET ÉROSION MÉCANIQUE

Dans un but de comparaison avec les études similaires entreprises sur d'autres bassins, les tonnages évacués en solution ou en suspension sont communément exprimés par unité de surface. On parle alors d'érosion chimique et mécanique spécifique ou encore de dénudation chimique et mécanique spécifique (tonnes/km<sup>2</sup>).

Si l'utilisation de ces valeurs se conçoit lorsque pour mesurer l'ablation moyenne des reliefs on chiffre la quantité de particules évacuées par érosion mécanique, il en va par contre tout autrement lorsqu'il s'agit du bilan des substances dissoutes. En effet lors de l'estimation par de nombreux auteurs des valeurs de la dénudation chimique, les bicarbonates ont été systématiquement inclus dans la charge soluble bien que manifestement (à l'exception des roches carbonatées) ils ne proviennent pas de l'altération des minéraux primaires. Leur présence dans

les eaux de drainage ne s'explique que par l'intervention du CO<sub>2</sub> atmosphérique amené par les eaux d'infiltration. Ainsi dans le cas de la transformation d'une albite en kaolinite ou de la dissolution d'une roche carbonatée, la totalité (réaction 1) ou la moitié (réactions 2 et 3) du bicarbonate est d'origine externe et ne peut être comptée en termes de bilan.

Selon GARRELS et MACKENZIE (1971) :



L'absence de roches carbonatées dans le sous-bassement géologique du bassin, l'éloignement des océans, permet de limiter le calcul du soutirage chimique, qui affecte le manteau d'altération depuis la surface jusqu'à la roche saine, aux seuls cations et à la silice. Il s'élève alors (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> exclus) à 321 000 t, tonnage nettement inférieur aux 440 000 t de l'ablation mécanique.

L'érosion chimique spécifique se chiffre ainsi à 7,5 t/km<sup>2</sup>/an et l'érosion mécanique spécifique à 10 t/km<sup>2</sup>/an.

Ces valeurs sont comparées dans le tableau IX.

TABLEAU IX

*Erosion spécifique, chimique, mécanique ou totale en t/km<sup>2</sup>/an comparée pour quelques grands bassins fluviaux dans le monde (Les valeurs données entre parenthèses ( ) \* sont obtenues en excluant HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)*

Bassins	Erosion chimique	Erosion mécanique	Erosion Totale
Ouham (1) . . . . .	13 (7,5)*	10	23 (17,5)*
Niger (2) . . . . .	7,2 (4,2)*	11,8	19 (16,0)*
Bénoué (2) . . . . .	13,0	64,0	77
Congo (3) . . . . .	28,0	9,0	37
Fleuves			
Afrique (4) . . . . .	24,0	17,0	41
Mississippi (5) . . . . .	36,0	64,0	100
Amazone (6) . . . . .	37,0	79,0	116

(1) Cette étude; (2) GROVES (1972); (3) SPRONCK (1941); (4) GARRELS et MACKENZIE (1971); (5) EDWARDS *et al.* (1956); LIVINGSTONE (1963); (6) GIBBS (1967).

à celles obtenues pour quelques bassins africains ou américains. L'érosion totale sur le bassin de l'Ouham est du même ordre que celle enregistrée pour le bassin du Niger. Le bassin du Congo et l'ensemble du continent africain sont soumis à une érosion deux fois plus importante, celui de la Bénoué quatre fois, du Mississippi cinq fois et celui de l'Amazone près de six fois.

V. — BILAN DE L'ALTÉRATION ET DE L'ÉROSION SUR LE BASSIN VERSANT

Les érosions chimique et mécanique s'associent pour évacuer les éléments libérés lors de l'altération des roches. Certains éléments sont évacués en solution, d'autres sont retenus soit complètement, soit partiellement sous forme de minéraux secondaires ou sous forme de minéraux résiduels.

Au fur et à mesure que l'altération chimique progresse en profondeur, les minéraux secondaires et les minéraux résiduels s'accumulent relativement. Les tonnages évacués instantanément en solution, correspondent à une ablation, mais aussi à la création d'un matériau nouveau.

L'érosion chimique correspond donc en réalité à l'approfondissement des profils et s'oppose ainsi à l'ablation mécanique qui tend à réduire l'épaisseur des sols.

L'importance relative de ces deux mécanismes concurrentiels peut être appréciée par le calcul d'un bilan de l'altération sur le bassin versant.

Sur l'ensemble du bassin, le principal produit argileux de l'altération est la kaolinite. Plusieurs faits le confirment :

— la totalité des profils étudiés ne contiennent qu'un seul minéral de néoformation : la kaolinite (QUANTIN, 1965 ; BOULVERT, 1968 ; CHATELIN, 1969).

— l'analyse minéralogique révèle que la kaolinite est le seul minéral présent dans les suspensions.

— les rapports R<sub>E</sub> de TARDY (1968, 1969), calculés dans les eaux, témoignent d'une altération de caractère monosiallitique et ceci quelle que soit la période de l'année considérée (fig. 4).

La composition chimique moyenne des roches du bassin a été calculée, à partir des teneurs moyennes données pour les roches ignées par TUREKIAN et WEDEPOHL (1961), VINOGRADOV (1962), HORN

et ADAMS (1966), PARKER (1967) et à partir de la répartition spatiale des différents types de roches dans le bassin.

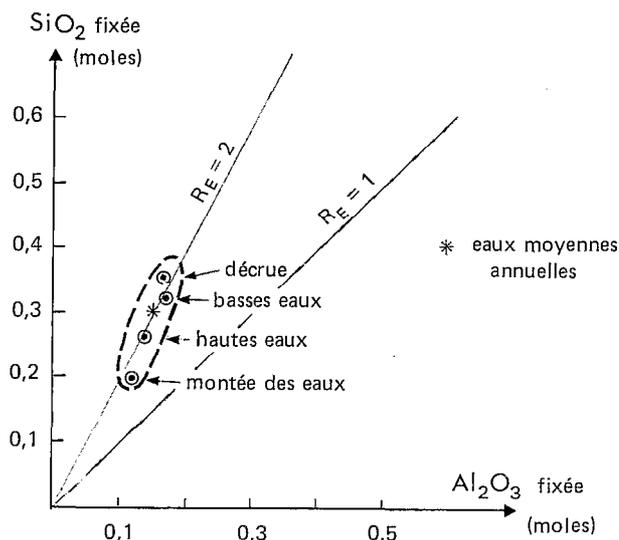


FIG. 4. — Relation entre  $\text{SiO}_2$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$  fixées dans les altérations et déterminée par le calcul des sommes moléculaires ( $6 \text{ Na}_2\text{O} + 6 \text{ K}_2\text{O} + 2 \text{ CaO} - \text{SiO}_2$ ) et ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO}$ ) mesurées dans les eaux (selon TARDY 1968, 1969).

L'analyse moyenne calculée et exprimée en pourcentage d'oxydes est la suivante :

Quartz	: 36,0	$\text{Na}_2\text{O}$	: 4,4
$\text{SiO}_2$ combinée	: 32,1	$\text{K}_2\text{O}$	: 3,0
$\text{Al}_2\text{O}_3$	: 13,8	$\text{CaO}$	: 2,8
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	: 5,1	$\text{MgO}$	: 2,0
$\text{TiO}_2$	: 0,5	Somme	: 99,7

#### Bilan de la kaolinite

En prenant comme base, une densité moyenne de 2,65, 1  $\text{m}^3$  de roche contient 950 kg de quartz, 850 kg de silice combinée et 366 kg d' $\text{Al}_2\text{O}_3$ . On calcule que sur les 850 kg de  $\text{SiO}_2$ , il faut en évacuer 420 kg pour que toute l'alumine soit associée à la silice restante pour former de la kaolinite, dont le poids est alors de 927 kg.

On sait par ailleurs, qu'en moyenne chaque année, les eaux de l'Ouham évacuent en suspension 271 000 t de kaolinite, soit 6,0  $\text{t}/\text{km}^2/\text{an}$  ou encore 6,0  $\text{g}/\text{m}^2/\text{an}$ . Il s'agit donc de déterminer à partir du bilan de la

silice, dans quelle mesure, l'altération chimique est susceptible de compenser chaque année la perte en kaolinite résultant de l'ablation mécanique.

Si on suppose dans un premier cas, que le quartz ne participe pas au bilan de la silice et que la kaolinisation se produit dès les premiers stades de l'altération, le tonnage annuel (220 000 t) de la silice évacuée en solution, permet de déterminer l'épaisseur de roche effectivement altérée en un an et de préciser durant la même période, la quantité de kaolinite reconstituée. Le soutirage chimique en silice, s'élève à 4,9  $\text{g}/\text{m}^2/\text{an}$ ; il lui correspond une progression de l'altération d'une épaisseur de  $11,7 \cdot 10^{-6}$  m et la formation de 10,8  $\text{g}/\text{m}^2/\text{an}$  de kaolinite. La tendance dans ce cas apparaît favorable à l'altération et à l'approfondissement des sols, puisque l'érosion mécanique n'enlève que 6,0  $\text{g}/\text{m}^2/\text{an}$  de kaolinite.

En réalité, une partie du quartz se dissout le long des profils, libérant dans l'eau un excédent de silice qui ne provient pas de la kaolinisation de la roche-mère. Plus la contribution du quartz au tonnage de silice en solution est importante, plus la quantité de kaolinite reconstituée est faible. En prenant une démarche opposée à celle envisagée précédemment, c'est-à-dire en supposant que la quantité de kaolinite néoformée est juste suffisante pour compenser la quantité de ce minéral enlevée par érosion mécanique (6,0  $\text{g}/\text{m}^2$ ), on obtient une valeur du pourcentage de dissolution du quartz de l'ordre de 45 %. Cette valeur est beaucoup trop importante et ceci montre bien que la tendance actuelle dans les profils reste favorable à l'approfondissement des sols.

En définitive, nous avons choisi avec LELONG (1967) et TARDY (1969), un taux moyen de dissolution du quartz de l'ordre de 15 %. Cette dissolution s'opère lentement le long des profils, mais en dernière analyse on peut supposer, pour des commodités de calcul que ce mécanisme se produit en même temps que la kaolinisation des minéraux aluminosilicatés de la roche et ceci dès les premières étapes de l'altération.

La silice totale évacuée par  $\text{m}^3$  de roche s'élève alors à 560 kg, dont 140 kg proviennent de la dissolution du quartz. Le soutirage chimique en silice qui correspond à la kaolinisation de la roche représente les 3/4, soit 165 000 t du tonnage annuel de silice en solution. L'érosion chimique spécifique en silice se chiffre à 3,7  $\text{t}/\text{km}^2/\text{an}$  ou encore à 3,7  $\text{g}/\text{m}^2/\text{an}$ .

En comparant cette érosion annuelle par unité de surface, aux 420 kg nécessaires à la transformation

de la roche en kaolinite sur un mètre d'épaisseur, on peut calculer qu'en moyenne l'altération :

— progresse de  $9 \cdot 10^{-6}$  m/an,

— reconstitue chaque année 8,3 g de kaolinite dont 6 g seulement, soit environ 75 %, quittent le bassin avec les particules en suspension dans les eaux de l'Ouham.

En définitive, le bilan de la kaolinite se caractérise par une accumulation de ce minéral dans les profils. Il en résulte un accroissement d'épaisseur des sols de l'ordre de  $2,5 \cdot 10^{-6}$  m/an.

#### *Bilan du quartz*

Au fur et à mesure que les hydrolyses gagnent en intensité, les produits mis en solution sont exportés, la kaolinite se néoforme et le quartz, minéral résiduel s'accumule.

Connaissant la progression annuelle de l'altération ( $9 \cdot 10^{-6}$  m), cette « mise en banque » temporaire du quartz peut se chiffrer : 1 m<sup>3</sup> de roche saine contenant 950 kg de quartz, on en déduit qu'avant l'intervention des phénomènes de dissolution, le poids de quartz accumulé chaque année au niveau des arènes est de 8,5 g/m<sup>2</sup>.

Il se dissout 15 %, c'est-à-dire 1,3 g, de ce quartz qui participe ainsi au bilan de la silice en solution. Par ailleurs, la masse de quartz qui, en suspension dans les eaux de l'Ouham, transite à l'exutoire du bassin, s'élève à 44 000 t. En admettant, que le charriage de fond ne concerne que les particules de quartz, l'évacuation maximum sous la forme solide serait de l'ordre de 70 000 t et représenterait une ablation moyenne par unité de surface (m<sup>2</sup>) de 1,6 g de quartz.

La tendance semble donc favorable à l'accumulation du quartz dans les profils, la quantité évacuée par les eaux du fleuve (2,9 g) étant trois fois moins importante que celle (8,5 g) qui procède de l'altération chimique des roches. Ce résultat s'oppose aux études minéralogiques menées sur les profils en place et non remaniés : l'absence d'enrichissement important en quartz laisse en réalité supposer que quantité évacuée et quantité accumulée s'équilibrent sensiblement.

En définitive, nous avons admis que le quartz ne participait pas à l'augmentation d'épaisseur des sols. L'excédent calculé de quartz pouvant s'expliquer soit :

— par une sous-estimation du charriage de fond,

— par une accumulation du quartz dans les bas de pente ou sur les berges, mécanisme assez compatible avec la faiblesse de l'érosion mécanique.

#### CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Le bassin de l'Ouham est bien représentatif de l'ensemble des bassins amonts du Chari et du Logone qui alimentent en eau le lac Tchad.

Le bilan de l'évacuation de la silice et des cations basiques en solution confirme la formation actuelle de la kaolinite, minéral argileux qui par ailleurs domine aussi bien dans les sols que dans les matériaux évacués en suspension.

Le bilan de ce qui est évacué en suspension d'une part et en solution d'autre part montre que l'altération chimique et l'approfondissement des profils l'emporte sur l'érosion mécanique. L'évolution géochimique et morphologique actuelle est donc favorable à une augmentation de l'épaisseur des profils et apparaît ainsi comme caractéristique d'une période biostatique.

Le temps nécessaire à la transformation de 1 m de roche en kaolinite est d'environ 100 000 ans. Durant cette période l'ablation mécanique ne soustrait qu'une quantité de matière correspondant à une épaisseur de sols de 75 cm. Le gain par tranches de 100 000 ans se chiffre donc à 25 cm (ou encore à 0,002 5 mm/an). 400 ans et 400 000 ans sont nécessaires (dans la mesure où on admet la constance des phénomènes climatiques) pour augmenter respectivement de 1 mm et de 1 m l'épaisseur des sols.

La reconstitution de la composition chimique de la roche saine à partir des exportations annuelles de chaque élément en solution et en suspension nécessite au préalable une connaissance des quantités de matière immobilisée chaque année dans les profils.

La répartition des différents éléments entre phase solide et phase soluble est directement fonction de la mobilité des éléments au cours de l'altération. Les cations basiques sont presque entièrement évacués en solution. Le titane, le fer, l'aluminium et le manganèse accompagnent la phase en suspension. La silice se partage entre les deux voies. Dans le cas du bassin de l'Ouham, seules la silice et l'alumine associées dans la kaolinite, qui s'accumule en excédent dans les profils, apparaissent comme déficitaires dans le bilan de l'altération des roches et de l'érosion des sols.

Tout au long du cycle hydrologique, et pour chacun des éléments, la répartition entre phase en solution et en suspension subit des variations. Les éléments les plus solubles (Na, K, Ca, Mg) sont évacués quelle que soit la période de l'année considérée. Les éléments les moins solubles (Al, Fe, Ti, Mn) ne sont susceptibles de quitter le bassin que lors des périodes

de vives eaux où la charge en suspension est importante.

Le bassin de l'Ouham représente la partie amont du bassin du Chari dans laquelle l'ablation mécanique est la plus importante. Des études ultérieures montreront la contribution des zones alluviales de l'aval dans le bilan global de matières apportées au lac Tchad.

## BIBLIOGRAPHIE

- ATAMAN (G.), 1963. — Utilisation du spectromètre à lecture directe pour le dosage des éléments majeurs des roches sédimentaires et des silicates dans une grande gamme de concentrations. *Bull. Serv. Carte Géol. Als. Lorr.*, 16, pp. 233-240.
- ATAMAN (G.) et BESNUS (Y.), 1965. — Une méthode de dosage des éléments traces dans les roches par spectrométrie à lecture directe. *Bull. Serv. Carte Géol. Als. Lorr.*, 18, pp. 179-189.
- BESNUS (Y.) et LUCAS (J.), 1968. — Méthode de dosage de 18 éléments majeurs et traces dans les roches sédimentaires et les produits d'altération par spectrométrie à lecture directe. Colloque sur le dosage à l'état de traces dans les roches et les autres substances minérales naturelles, Nancy, CNRS, Paris, pp. 93-106.
- BILLON (B.). — Mise au point des mesures de débits solides en suspension (République du Tchad). *Cah. ORSTOM, sér. Hydro.*, vol. V, n° 2, pp. 3-13.
- BILLON (B.) et OBERLIN (G.), 1968. — Monographie hydrologique du Chari. *Serv. Hydro. ORSTOM*, Paris, 3, 87 p.
- BOULVERT (Y.), 1968. — Quelques aspects de l'influence de la topographie et du matériau originel sur la répartition des sols ferrallitiques, sols ferrugineux tropicaux et vertisols dans la région de Bossangoa au nord-ouest de la République Centrafricaine. *Cah. ORSTOM, sér. Péd.*, vol. IV, 3-4, pp. 259-275.
- CARRE (P.), 1972. — Quelques aspects du régime des apports fluviaux de matériaux solides en suspension vers le lac Tchad. *Cah. ORSTOM, sér. Hydro.*, IX, 1, pp. 19-46.
- CHATELIN (Y.), 1969. — Contribution à l'étude de la séquence des sols ferrallitiques rouges et ferrugineux tropicaux beiges. Examen de profils centrafricains. *Cah. ORSTOM, sér. Péd.*, VIII, 4, pp. 447-492.
- CONWAY (E.J.), 1942. — Mean geochemical data in relation to oceanic evolution. *Roy. Irish Acad. Proc.*, 48, sec. B, pp. 119-159.
- EDWARDS (M.L.), KISTER (L.R.), SCARCIA (G.), 1956. — Water resources of the New Orleans area, Louisiana. *U.S. Geol., Surv. Circ.* 374.
- GAC (J.Y.), CALLEDE (J.), ROUQUEROL (Y.), 1970. — Les transports solides de l'Ouham à Batangafo. *Rapp. ORSTOM*, centre de Bangui, 18 p.
- GAC (J.Y.), 1972. — Note sur la pluviométrie des hauts-bassins du Chari et du Logonc. *Rapp. ORSTOM*, centre de Bangui, 59 p.
- GARRELS (R.M.) et MACKENZIE (F.T.), 1971. — Evolution of sedimentary rocks. Norton Cie, New York, 397 p.
- GIBBS (R.), 1967. — The geochemistry of the Amazon river system. Part. I : the factors that control the salinity and the concentration of suspended solids. *Geol. Soc. of Am. Bull.*, 78, pp. 1203-1232.
- GIBBS (R.), 1972. — Water chemistry of the Amazon river. *Geoch. Cosmoch. Acta*, 36, pp. 1061-1066.
- GROVES (A.T.), 1972. — The dissolved and solid load carried by some west african river Senegal, Niger, Benoue and Shari. *Journ. of Hydro.*, 16, pp. 277-300.
- HALL (D.G.), 1967. — The pattern of sediment movement in the Tyne river. *Ass. Int. Hydro. Scient.*, 78, Ass. Berne, pp. 117-142.
- HERVIEU (J.), 1968. — Contribution à l'étude de l'alluvionnement en milieu tropical. *Mém. ORSTOM*, n° 24, 465 p., Paris.
- HORN (M.K.) et ADAMS (J.A.S.), 1966. — Computer-derived geochemical balances and element abundances. *Geoch. Cosmoch. Acta*, 30, pp. 279-297.
- KREMPP (G.), 1969. — Méthode de dosage par spectrophotométrie d'absorption atomique des éléments Na, K, Li, Rb contenus dans les roches. *Diplôme Univ. Strasbourg*, 23 p.
- LELONG (F.), 1967. — Nature et genèse des produits d'altération des roches cristallines sous climat tropical humide (Guyane Française). *Thèse Fac. Sc. Nancy*, 182 p.
- LIVINGSTONE (D.A.), 1963. — Chemical composition of rivers and lakes. *Data of geoch.*, 6 th, U.S. Geol. Survey Prof. Paper, 440 G.
- LUCAS (J.), 1908. — The chemistry of the river Nile. *Egypt, Survey Dept, Cir, Cairo Paper*, 7, 78 p.
- LUCAS (J.), 1962. — La transformation des minéraux argileux dans la sédimentation. Etudes sur les argiles du trias. *Mém. Serv. Carte Géol. Als. Lorr.*, 22, 202 p.
- LUSTIG (L.K.) et BUSCH (R.D.), 1967. — Sediment transport in alluvial channels. Sediment transport in Cache Creek drainage basin in the coastal ranges west of Sacramento California. *Geol. Survey Prof. Paper* 562, A4, 36 p.
- MATHIEU (Ph), 1971. — Erosion et transport solide sur un bassin versant forestier tropical (bassin de l'Amitioro, Côte d'Ivoire). *Cah. ORSTOM, sér. Géol.*, III, 2, pp. 115-144.
- MOSSER (C.), GALL (J.C.), TARDY (Y.), 1971. — Géochimie des illites du grès à voltzia du Buntsandstein supérieur des Vosges du Nord, France. *Chem. Geology*, 9, pp. 157-177.

- NOUVELOT (J.F.), 1972. — Le régime des transports solides en suspension dans divers cours d'eau du Cameroun de 1969 à 1971. *Cah. ORSTOM, sér. Hydro.*, IX, 1, pp. 47-74.
- PARKER (R.L.), 1967. — Composition of the earth's crust. *Geol. Survey Prof. Paper*, 440 D, 19 p.
- PEGUY (C. Ph.), 1970. — Précis de climatologie. Masson et Cie. Ed. Paris, 468 p.
- PINTA (M.) et coll., 1971. — Spectrométrie d'absorption atomique. Tome 1,2, Ed. Masson, ORSTOM, 793 p. Paris.
- POLIAKOV (B.V.), 1938. — Recherches hydrogéologiques sur la basse Volga. *Mat. Projets Rech. Irrig. Bassin Volga, Kamychine*, 10.
- QUANTIN (P.), 1965. — Les sols de la République Centrafricaine. *Mém. ORSTOM*, n° 16, Paris, 144 p.
- ROCHE (M.A.), 1968. — Premières estimations des apports en sels au lac Tchad par le Chari. *Cah. ORSTOM, sér. Hydro.* V, 1, pp. 55-58.
- ROUGERIE (G.), 1958. — Acidité des eaux en milieu tropical. *C.R. Acad. Sci.*, Paris, 246, pp. 447-449.
- ROUKHINE (L.B.), 1955. — Bases de la lithologie. I. Etude des formations sédimentaires. *Ann. Centre d'Etude et Doc. Paléont.*, 9, trad. P. de St Aubin.
- SEGALEN (P.), 1968. — Note sur une détermination des produits minéraux amorphes dans certains sols à hydroxydes tropicaux. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, VI, 1, pp. 105-126.
- SPRONCK (R.), 1941. — Mesures hydrographiques effectuées dans la région divagante du bief maritime du fleuve Congo, Bruxelles, Int. Roy. Colonial Belge, mém. 156 p.
- TARDY (Y.), 1968. — Une méthode de détermination des types d'altération actuels, par l'étude des eaux en pays granitiques et gneissiques. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 267, pp. 579-582.
- TARDY (Y.), 1969. — Géochimie des altérations. Etude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique. *Mém. Bull. Serv. Carte Géol. Als. Lorr.*, 31, 199 p.
- TRESCASES (J.), 1969. — Premières observations sur l'altération des péridotites en Nouvelle Calédonie. Pédologie, géochimie, géomorphologie. *Cah. ORSTOM, sér. Géol.*, vol. I, 1, pp. 27-57.
- TSAWLASSOU (G.), 1971. — Géochimie de l'altération des roches granitiques et gneissiques en pays tropical et équatorial. Evolution des biotites et des feldspaths. Thèse 3<sup>e</sup> cycle, Strasbourg, 68 p.
- TUREKIAN (K.K.) et WEDEPOHL (K.H.), 1961. — Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. *Géol. Soc. Amer. Bull.*, 72, pp. 175-192.
- VINOGRADOV (A.P.), 1962. — Average contents of chemical elements in the principal types of igneous rocks of the earth's crust. *Geochemistry*, 7, pp. 641-664.