

**DONNÉES RELATIVES AU TRANSPORT EN SOLUTION
DE QUELQUES ÉLÉMENTS EN TRACES
PAR UN FLEUVE DE CÔTE D'IVOIRE (LE BANDAMA)**

FRANÇOIS LENOIR

*Géologue ORSTOM
Laboratoire de Géologie et de Sédimentologie
Université de Nice*

RÉSUMÉ

Dans le cadre d'une étude menée pendant cinq années par l'ORSTOM en Côte d'Ivoire, plus de 500 échantillons d'eau ont été prélevés sur le bassin du Bandama d'une superficie voisine de 100 000 km², soumis aux influences des climats équatorial et tropical.

Les résultats proviennent de six stations et portent sur 17 éléments en traces (Li, Rb, Cs, Sr, Ba, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Mo, Ga, Sn, Pb, Bi).

Les conclusions principales sont les suivantes :

- stabilité de la composition des eaux du débit de base ;
- concentrations généralement plus élevées dans les eaux ruisselées ;
- pas de liaison directe entre le débit et les concentrations ;
- influence des différentes parties du bassin sur la concentration de certains éléments.

ABSTRACT

More than 500 samples of water were picked up from the 100,000 km² Bandama basin (Ivory Coast) during a five years sedimentological survey granted by ORSTOM. Both equatorial and tropical climates control the Bandama basin.

The results are given from 6 stations and from the analysis of 17 trace elements (Li, Rb, Cs, Sr, Ba, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Mo, Ga, Sn, Pb, Bi).

The main conclusions are as follows :

- stability of the composition of the water from the low flow.
- concentrations generally higher in the rising limb.
- no direct relation between water discharge and concentration.
- action of the different parts of the basin upon the concentration of some of the trace elements.

ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen einer Untersuchung, die fünf Jahre lang von ORSTOM an der Elfenbeinküste durchgeführt wurde, sind mehr als 500 Wassproben aus dem Bandamabecken, einer Oberfläche von etwa 100 000 km², das den Einflüssen des äquatorialen und tropischen Klimas unterworfen ist, entnommen.

Die Ergebnisse kommen von 6 Stellen und beziehen sich auf 17 Spurenelemente (Li, Rb, Cs, Sr, Ba, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Mo, Ga, Sn, Pb, Bi).

Die Schlussfolgerungen sind :

- Stabilität der Zusammensetzung des Wassers mittlerer Abflussmenge ;
- Die Konzentrationen sind im allgemeinen höher in geräselten Wässern ;
- keine direkte Verbindung zwischen der Abflussmenge und den Konzentrationen ;
- Einfluss der verschiedenen Teile des Beckens auf die Konzentration von gewissen Elementen.

РЕЗЮМЕ

В рамках исследования проведенного в течение пяти лет учреждением О.Р.С.Т.О.М. в республике Берега Слоновой Кости, было собрано более 500 проб в бассейне реки Бандама, площадью около 100.000 км², подвергнутом влияниям экваториального и тропического климатов.

Результаты получены из 6-ти станций и касаются 17-ти микроэлементов (Li, Rb, Cs, Sr, Ba, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Mo, Ga, Sn, Pb, Bi).

Главные выводы :

- стабильность состава вод базисного стока ;
- обычно более высокие концентрации в водах поверхностного стока ;
- отсутствие прямой связи между расходом и концентрациями ;
- влияние различных частей бассейна на концентрацию некоторых элементов.

INTRODUCTION

La composition chimique des eaux naturelles de surface est influencée par celle des eaux météoriques qui les alimentent. Avant d'arriver au sol, la végétation, surtout si elle est très abondante, fait subir aux eaux de pluie des modifications qui se poursuivront en surface ou en profondeur suivant le devenir de ces eaux.

Les variations de la composition chimique des eaux de surface proviennent en grande partie de l'influence de l'apport des eaux ruisselées sur celles correspondant à l'écoulement de base alimenté par les nappes. En général, les eaux d'origine souterraine présentent une homogénéité relative dans le temps ; à la suite d'un contact prolongé en profondeur un équilibre chimique peut se produire. La composition des eaux du débit de base est modifiée, d'amont en aval, par les apports propres à chaque bassin unitaire. Les eaux ruisselées, par contre, restent sur le sol un temps relativement court avant de rejoindre les principaux axes du réseau hydrographique ; cependant la grande surface de contact favorise la mise en solution des divers éléments chimiques.

Cette étude cherche à mettre en évidence l'évolution des eaux de surface du bassin du Bandama et leur influence sur la concentration en solution des éléments en traces suivants : lithium, rubidium, césium, strontium, baryum, titane, vanadium, chrome, manganèse, cobalt, nickel, cuivre, molybdène, gallium, étain, plomb et bismuth.

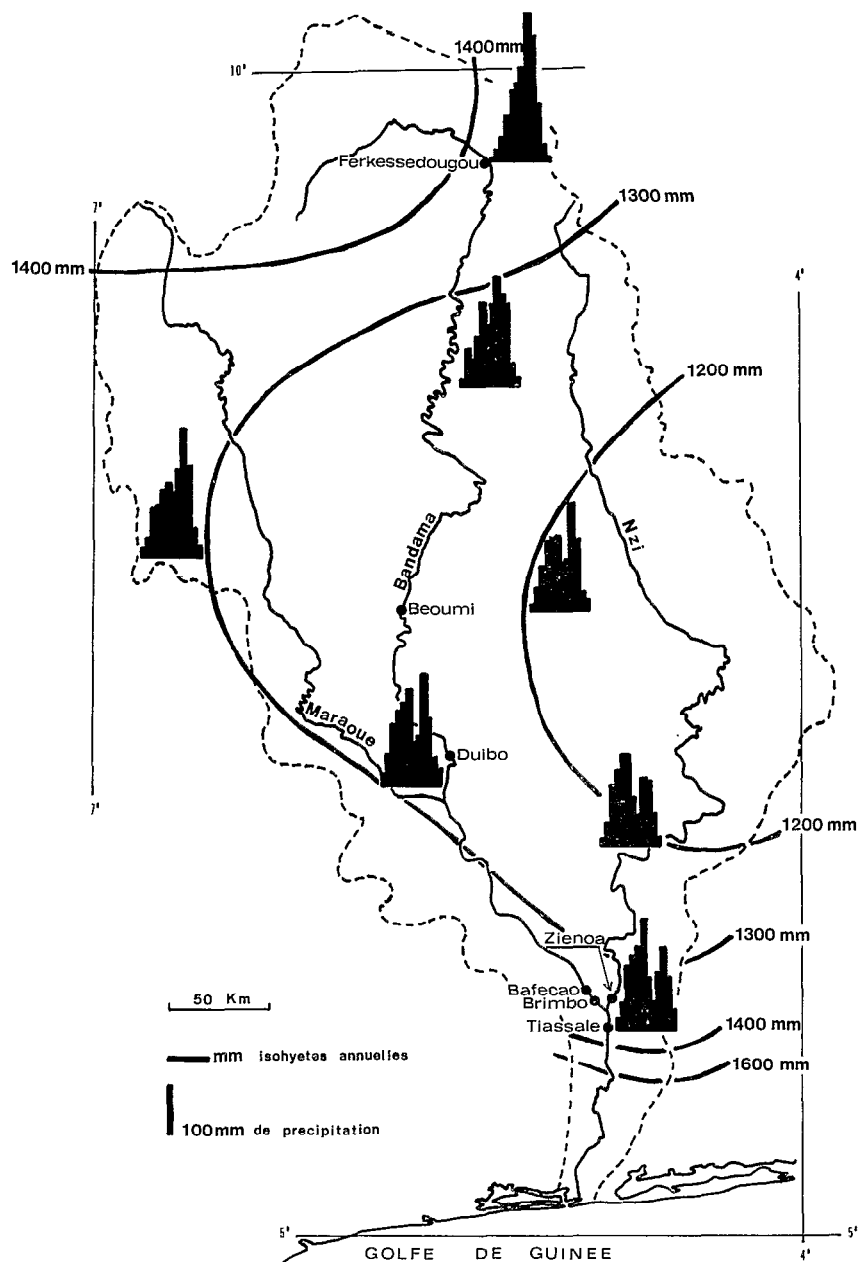


FIG. 1. — Carte de situation et pluviométrie.

DEFOSSEZ, MANGIN, PINTA et VAN DEN DRIESSCHE (1967) ont exposé, en plus des valeurs relatives à la plupart de ces éléments (1963 à 1965), les méthodes analytiques utilisées. Les résultats présentés ici sont complétés par les échantillons prélevés entre 1966 et 1968, ce qui porte le nombre total des résultats analytiques sur le fleuve à plus de 500 valeurs pour chaque élément.

GÉNÉRALITÉS

Réseau hydrographique

Le fleuve Bandama (fig. 1) long de 1 050 km collecte en rive droite le Maraoué (longueur 500 km) et en rive gauche le Nzi (longueur 725 km). Les stations d'étude, ainsi que les superficies des bassins correspondants sont, d'amont en aval, les suivantes :

Ferkéssédougou	: 7 000 km ²
Béoumi	: 26 200 km ²
Duibo	: 32 200 km ²
Bafécao	: 60 200 km ²
Ziénoa	: 33 150 km ²
Tiassalé	: 94 250 km ²

Cette dernière station intègre la presque totalité de la superficie du bassin qui est de 97 500 km² à son embouchure. Ziénoa est situé sur le Nzi à quelques kilomètres de la confluence avec le Bandama, encadrée par les deux stations de Bafécao à l'amont et de Tiassalé à l'aval.

Les climats

Situé entre 5°10' et 10°20' de latitude Nord, le bassin du Bandama subit les influences conjuguées des climats équatorial et tropical.

La pluviosité moyenne annuelle varie de 1 100 à 1 800 mm, l'est du bassin étant le moins arrosé.

D'après la répartition saisonnière des précipitations, on distingue :

- un régime tropical de transition, climat soudanais (région Nord du bassin). Il se décompose en :
 - une saison des pluies avec des précipitations relativement abondantes (environ 1 400 mm par an), groupées surtout en juillet, août et septembre.
 - une saison sèche de novembre à mars entrecoupée par quelques précipitations localisées.
- un régime équatorial de transition atténué, climat baouléen (région centrale du bassin) avec deux saisons des pluies. La première de mars à juin (150 à 200 mm par mois) est suivie par une petite saison sèche en juillet et août. La seconde, de septembre à octobre est plus marquée que la première au nord de cette région, et moins au sud. La grande saison sèche est bien marquée, avec quelques précipitations isolées.
- un régime équatorial de transition, climat attien (partie méridionale du bassin). Il comporte deux saisons des pluies. La première d'avril à juillet est nettement plus importante que la seconde. Elles sont séparées par une petite saison sèche en août, et une grande saison sèche de décembre à mars.

La végétation

Le bassin du Bandama est recouvert par trois grandes formations végétales, du nord au sud, la savane, la savane boisée et la forêt. La majeure partie du bassin correspond à une savane arbustive avec des îlots forestiers et des forêts galeries, le long des cours d'eau.

Le substratum

Le substratum formé en grande partie de dépôts sédimentaires fortement métamorphisés appartient à la partie méridionale du socle précambrien de l'Ouest africain. Dans le bassin limité à Tiassalé, trois grands ensembles peuvent être distingués :

— granites et migmatites en massifs situés dans la partie septentrionale du bassin (cours supérieurs du Bandama et de son affluent le Nzi).

— roches métamorphiques (schistes arkosiques, arkoses, quartzites) formant une partie des bassins supérieur du Maraoué et inférieur du Nzi. Une bande NNE-SSW occupe la partie centrale des bassins du Bandama et du Nzi.

— « roches vertes » (amphibolites, dolérites, gabbros) en affleurement de direction NNE-SSW coupant les cours moyens du Bandama et du Nzi.

LES RÉGIMES HYDROLOGIQUES

Les différents régimes hydrologiques étant étroitement soumis aux conditions climatiques, nous distinguerons, d'amont en aval :

— un régime tropical de transition à crue unique en août, septembre et octobre (à Ferkéssédougou).

— un régime équatorial de transition atténué, sur le Bandama entre Ferkéssédougou et la confluence avec le Maraoué, et sur le Nzi à Ziénoa, avec des débits moyens et forts étalés de mai à novembre (dédoublement de la saison des pluies).

— un régime équatorial de transition dans la partie méridionale du bassin caractérisé par une double période de crue, l'une en juin-juillet, l'autre moins marquée en octobre-novembre.

En raison de la superposition des différents régimes unitaires, le régime hydrologique du fleuve devient de plus en plus complexe de l'amont vers l'aval. (Exemple : hydrogrammes 1964 et 1967 fournis par le Service Hydrologique de l'ORSTOM, fig. 2 et 3).

Les premiers mois de l'année correspondant à la saison sèche sur tout le bassin, représentent la période d'étiage. A partir de mai et jusqu'en juin-juillet, le débit augmente dans la partie aval du bassin. Cette augmentation est surtout sensible aux stations de Brimbo, sur le Bandama (quelques kilomètres à l'aval de Bafécao où sont faits les prélèvements), de Ziénoa sur le Nzi et de Tiassalé à l'aval de la confluence Nzi-Bandama. Cette crue correspond aux premiers ruissellements sur les parties méridionale et centrale du bassin, provoqués par la première saison des pluies des climats attien et baouléen.

Ensuite les débits deviennent plus modestes. Début août, les ruissellements venant du Nord, engendrés par les précipitations de la saison unique du régime tropical de transition (Soudanais) déferlent vers l'aval du bassin et donnent la grande crue annuelle, très marquée sur le Bandama. Les effets conjugués des climats soudanais et baouléen provoquent une pointe de crue fin septembre et début octobre. A cette période, le Nzi présente sa seconde crue dont l'importance, par rapport à la première est variable.

La petite saison des pluies, en octobre et novembre, sur le Sud du bassin (climat attien) entraîne peu de changements dans l'hydrogramme : le débit du fleuve, bien que décroissant, est encore relativement important et masque en partie l'influence des ruissellements locaux.

La régularité interannuelle dans la succession des événements aux diverses stations, illustrée par les figures 2 et 3, correspondant respectivement à une année légèrement excédentaire (1964), et à une année légèrement déficitaire (1967), permet de découper l'hydrogramme à la station la plus aval (Tiassalé), en cinq périodes.

Les périodes de l'hydrogramme

Celles-ci correspondent à :

1. étiage (février à avril). Débit à Tiassalé : quelques m^3/s .

2. premiers ruissellements sur le bassin provoqués par les précipitations des régimes climatiques équatoriaux de transition et de transition atténué affectant surtout le sud du bassin et en particulier la zone centrale (mai à juillet). Débit à Tiassalé : de 50 à quelques centaines de m^3/s .

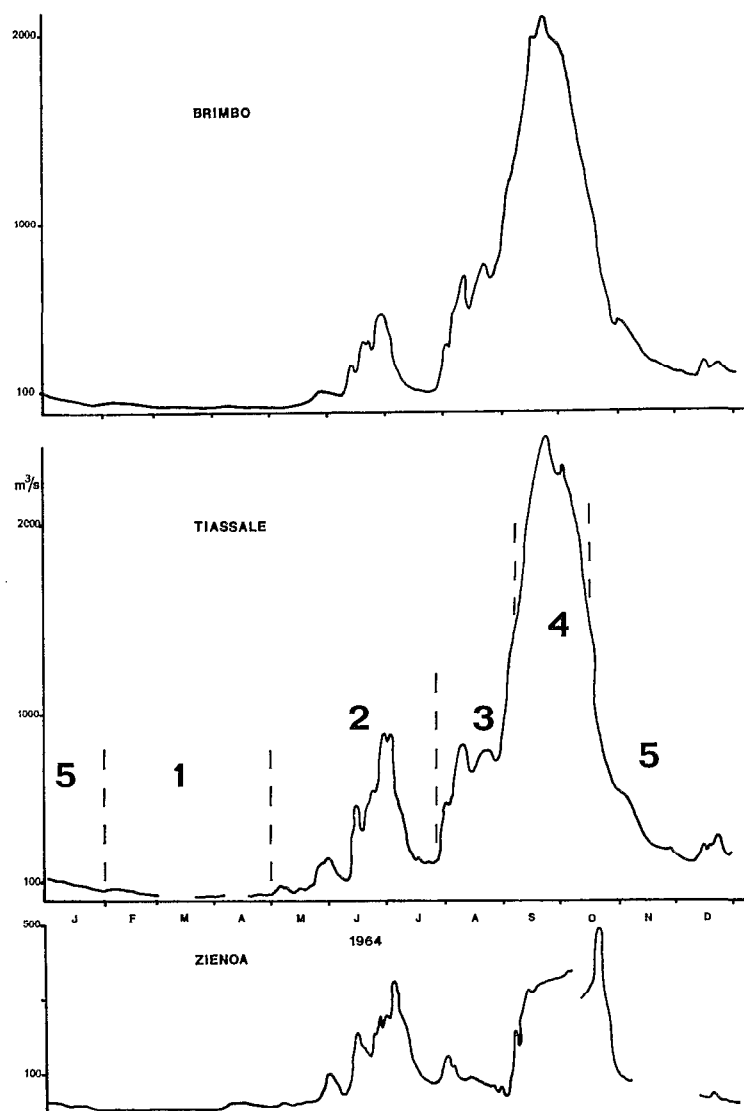


FIG. 2. — Hydrogrammes 1964.

3. montée de la grande crue annuelle. Ruissellements sur la partie nord du bassin (août et début septembre). Débit à Tiassalé : quelques centaines à plus de $1\,000\text{ m}^3/\text{s}$.

4. période correspondant aux débits maxima de la grande crue annuelle : pointe de crue (fin septembre - début octobre). Débit à Tiassalé : supérieur à $1\,000\text{ m}^3/\text{s}$.

5. décrue et retour vers l'étiage (fin octobre à janvier). Débit à Tiassalé : quelques centaines de m^3/s .

Il est indispensable de laisser une certaine souplesse aux limites de chacune de ces périodes. Elles peuvent présenter, d'une année à l'autre, de légères variations dues à des conditions météorologiques particulières ; dans les grandes lignes, ce cadre peut être conservé.

TRANSPORT EN SOLUTION D'ÉLÉMENTS EN TRACES PAR LE BANDAMA

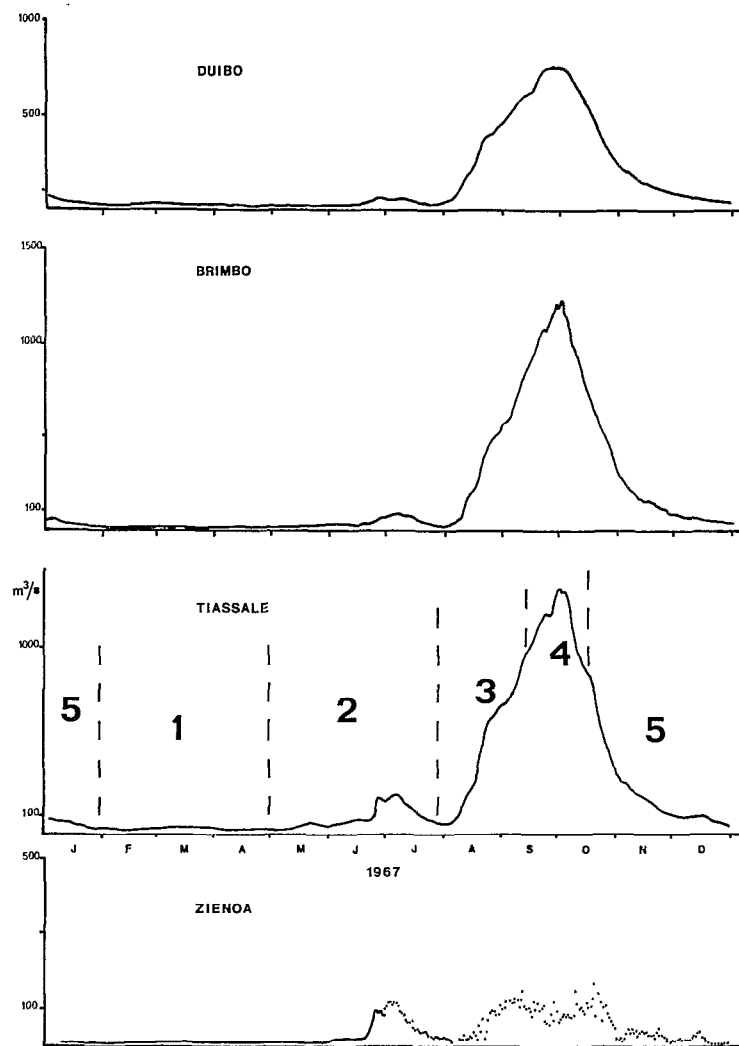


FIG. 3. — Hydrogrammes 1967.

Le même découpage a été appliqué également aux stations situées en amont sur le Bandama correspondant à un type d'hydrogramme voisin. L'affluent de rive gauche, le Nzi représente un cas particulier. A Ziénoa, la période 3 ne correspond pas à la montée de crue mais à une phase de débit soutenu (quelques dizaines de m^3/s), entre les deux crues de juin-juillet et septembre-novembre.

LES ÉLÉMENTS EN TRACES DANS LES EAUX

L'influence des eaux écoulées, ou des eaux ruisselées sur la concentration des éléments en traces dans les eaux naturelles a été remarquée par plusieurs auteurs dont : SKOUGSTADT et HERR (1960), DURUM

et HAFFTY (1960 et 1963), LIVINGSTONE (1963), KOLESNIKOVA et KONOVALOV (1966), KONOVALOV, IVANOVA et KOLESNIKOVA (1966), ANGINO, GALLE et WAUGH (1969), VOEGELI et KING (1969) ; leurs résultats sont généralement relatifs aux rivières des Etats-Unis et d'URSS.

La teneur des éléments en traces au débouché d'un grand bassin est tributaire :

- des eaux de nappes qui fourniront l'essentiel du débit en fin de crue et à l'étiage ;
- des eaux ruisselées en surface pendant les périodes de hautes eaux.

L'eau des précipitations subit une évolution influencée par des régimes climatiques différents, sur des sols variés, recouverts par une végétation diversifiée. Connaissant d'après les hydrogrammes, l'origine géographique probable des eaux écoulées, nous allons tenter de déterminer les facteurs régissant la concentration des éléments en traces dans les eaux de surface du bassin.

Echantillons

Les échantillons de cette étude proviennent des stations de Ferkéssédougou (crue 1964), Béoumi (crue 1964), Duïbo (1965 - 1966 - 1967), Bafécao (1963 à 1967), Ziénoa (1964 à 1967) et Tiassalé (1964 à 1967).

A chaque station, les échantillons sont prélevés à différentes profondeurs sur plusieurs verticales de la section. Ils sont accompagnés des mesures « in-situ » de pH, potentiel d'oxydo-réduction, résistivité et température.

La périodicité des prises était généralement mensuelle surtout pendant les périodes influencées par le ruissellement. En 1967, à Tiassalé, un échantillonnage plus serré a été calqué sur les variations de l'hydrogramme.

Résultats analytiques

Les analyses des éléments en traces, effectuées au laboratoire de Spectrographie de l'ORSTOM à Bondy, sont couplées avec celles des éléments majeurs : chlorure, sulfate, phosphate, silice, potassium, sodium, calcium et magnésium. Les dosages portent également sur le fer et l'aluminium, considérés par certains comme éléments en traces, mais leurs concentrations relativement élevées (1 mg/l), surtout en période de ruissellement, nous les font ranger dans les éléments majeurs.

Pour une même section, les résultats d'analyse chimique des éléments majeurs sont relativement très voisins, ce qui prouve l'homogénéité de la masse liquide qui s'écoule. Par contre, les valeurs correspondant aux éléments en traces, obtenues par une analyse semi-quantitative sont très variables. Nous donnerons pour exemple le tableau I correspondant aux échantillons du 12 novembre 1965 à la station de Tiassalé.

Interprétation

Nous constatons que la gamme des valeurs pour chaque élément est très grande et l'interprétation de ces résultats d'analyse demande une grande prudence.

Je citerai ici ANGINO *et al.* (1969, op. cit., p. 700) qui, à propos des éléments en traces écrivent :

« If one takes an individual analytic value for a given element from a specific stream taken at a particular time and uses this figure as a representative value, considerable error is introduced ».

Il faut donc se baser sur un ensemble de valeurs aussi nombreuses que possible pour trouver un ordre de grandeur correspondant à la concentration en solution de chaque élément.

Il pourrait paraître logique de présenter pour une station la valeur moyenne ou médiane obtenue sur l'ensemble des résultats analytiques, mais cette valeur sera fortement influencée par la périodicité

TRANSPORT EN SOLUTION D'ÉLÉMENTS EN TRACES PAR LE BANDAMA

TABLEAU I

Bandama à Tiassalé le 12 novembre 1965

Numéros d'échantillon	6654	6655	6657	6658	6660	6661
Heure	12 h 00 mn	12 h 10 mn	12 h 20 mn	12 h 25 mn	12 h 35 mn	12 h 40 mn
Distance de la rive gauche (m)	150	150	100	100	50	50
Profondeur (m)	6,00	0,50	9,80	0,50	1,90	0,50
Débit (m ³ /s)	426	426	426	426	426	426
($\mu\text{g/l}$)						
Li	4,8	1,5	0,6	0,4	0,7	1,4
Rb	4,8	4,5	3,9	2,8	4,2	2,8
Cs	< 10	< 10	< 3	< 3	< 3	< 3
Sr	16	15	39	14	84	14
Ba	< 3	< 3	20	14	42	14
Ti	1,6	1,5	3,9	1,4	4,2	1,4
V	< 1	1,5	2,5	0,4	2,8	0,4
Cr	< 0,5	0,45	1,3	1,4	1,4	1,4
Mn	0,45	1,5	3,9	114	4,2	1,4
Co	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Ni	< 1	< 1	1,3	1,4	1,4	0,4
Cu	3,0	4,5	1,3	1,4	1,4	1,4
Mo	< 1	< 1	< 0,4	< 0,4	< 0,4	< 0,4
Ga	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Sn	< 1	4,5	< 0,4	< 0,4	< 0,4	< 0,4
Pb	< 1	< 1	< 0,4	< 0,4	< 0,4	< 0,4
Bi	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1

des prélèvements. Si, par exemple, les résultats sont très nombreux en étiage (concentrations faibles), et rares en crue (concentrations très fortes), la moyenne ou la médiane des données sera faible et tendra à montrer que l'exportation est modeste. En fait, la concentration moyenne, en fin de cycle hydrologique, donnée par le quotient $\frac{\text{poids transporté}}{\text{volume écoulé}}$ tendra vers les valeurs fortes relevées en crue.

Le découpage de l'hydrogramme en périodes correspondant à des conditions d'écoulement différentes permet de déduire, à l'intérieur de ces fractions d'hydrogramme, la concentration de chaque élément.

Les valeurs d'analyses sont regroupées en classes suivant une échelle logarithmique en vue de la détermination de la médiane de rang $(N+1)/2$ et des intervalles de confiance relatifs aux médianes de rang $(N+1)/2 \pm \sqrt{N}$

Dans le but de satisfaire la comparaison avec d'autres résultats, j'ai regroupé dans le tableau II les résultats globaux correspondant à tous les échantillons de chaque station.

Il apparaît de suite que les stations de Béoumi et surtout Ferkéssédougou comportent un nombre restreint d'échantillons vis-à-vis des autres stations situées à l'aval. Les résultats « saisonniers » trop peu nombreux de ces deux stations, donnés à titre de document, devront être considérés avec réserve. L'analyse des variations de la médiane et de son intervalle de confiance est de première importance dans l'interprétation des résultats, mais, dans certains cas, il est nécessaire de prendre la distribution complète des valeurs analytiques. Ce cas se présente en particulier pour certains éléments comme césium, cobalt, molybdène et bismuth à concentration voisine de la limite de détection.

TABLEAU II

Résultats globaux
Concentration en $\mu\text{g/l}$

		Li	Rb	Cs	Sr	Ba	Ti	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Mo	Ga	Sn	Pb	Bi
Ferkéssé-dougou	Médiane	0,4	2,1	< 8	65	25	3,5	1,2	2,5	1,3	<0,3	1,2	12	<0,3	<0,3	13	< 1	<0,3
	Intervalle de confiance	<0,3 à 0,4	1,4 à 2,6		18 à 72	13 à 34	2 à 26	0,5 à 4	1,4 à 5	0,7 à 12		0,4 à 3,4	3,3 à 35			<0,3 à 20		
	Effectif	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Béoumi	Médiane	0,5	4,4	2,5	30	26	13	1,1	2,2	2,9	<0,3	1,3	4,5	<0,3	0,5	1,7	< 1	<0,3
	Intervalle de confiance	0,4 à 1,5	3,9 à 7	< 1 à 5	26 à 50	15 à 28	3 à 26	<0,5 à 2,3	1,4 à 4,5	1,4 à 7		0,4 à 3,6	3 à 10		<0,3 à 1	<0,3 à 14		
	Effectif	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
Duibo	Médiane	1,7	4,7	<10	34	14	6	1,8	4,2	3,8	< 1	2,7	4,4	<0,6	1,7	0,9	1,3	< 1
	Intervalle de confiance	1,3 à 1,9	4,2 à 5,2		22 à 49	13 à 16	3,4 à 21	1,5 à 3,5	3,3 à 4,7	2,7 à 4,8		1,7 à 3,6	3,4 à 4,9		1,2 à 3,2	0,7 à 1,4	< 1 à 1,8	
	Effectif	84	84	71	84	84	84	84	84	84	84	84	84	84	73	84	84	73
Bafécao	Médiane	1,3	4,3	<10	31	22	14	1,5	2,2	3,3	< 1	1,6	4,8	<0,5	0,9	1,3	1,5	<0,6
	Intervalle de confiance	0,9 à 1,5	4,0 à 4,6		25 à 42	18 à 27	6 à 17	1,2 à 2	1,6 à 2,9	2,6 à 4,4		1,4 à 2	4,4 à 5,4		0,8 à 1	0,9 à 1,7	1 à 1,7	
	Effectif	125	125	112	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	116	125	125	116
Ziénoa	Médiane	2,2	4,8	<10	38	18	34	2,9	4,0	10	< 1	1,9	5,7	<0,6	1,6	0,9	1,1	<0,6
	Intervalle de confiance	1,8 à 3,5	4,5 à 5,6		30 à 48	15 à 23	20 à 45	2,2 à 4	3,2 à 5	4,9 à 13		1,6 à 2,5	4,8 à 7,3		1,2 à 2,2	0,8 à 1,1	1,7 à 2,2	
	Effectif	100	100	89	100	100	100	100	100	100	99	100	100	100	92	100	100	92
Tiassalé	Médiane	1,6	4,4	<10	41	18	16	2,2	3,2	4,6	< 1	1,7	4,1	<0,6	0,9	0,9	1,4	< 1
	Intervalle de confiance	1,4 à 1,8	4,0 à 4,8		30 à 46	15 à 21	11 à 21	1,6 à 3,1	2,8 à 4	4 à 6,6		1,5 à 2	3 à 4,5		0,8 à 1	0,9 à 1	< 1 à 1,6	
	Effectif	176	176	131	176	176	176	176	176	176	176	176	176	176	147	176	176	147

Il est toutefois plus intéressant de connaître la variation de la concentration d'un élément en cours d'année, et c'est dans ce but que je donnerai les concentrations en $\mu\text{g/l}$, pour des conditions hydrologiques voisines, aux différentes stations, dans les tableaux III (étiage), IV (premiers ruissellements surtout sur les parties centrale et méridionale du bassin), V (montée de la grande crue annuelle), VI (« pointe de crue »), VII (décrue).

CONTROLE DES DIFFÉRENTS BASSINS

A l'étiage, les concentrations des éléments en traces sont relativement faibles. Sur l'ensemble des stations de Duibo, Bafécao, Ziénoa et Tiassalé, nous pouvons dire que cobalt, molybdène et bismuth sont nettement inférieurs au $\mu\text{g/l}$; lithium, vanadium, manganèse, nickel, gallium, étain et plomb, de l'ordre

de 1 $\mu\text{g/l}$; rubidium, titane, chrome et cuivre, de l'ordre de 3 $\mu\text{g/l}$; césium est inférieur à 10 $\mu\text{g/l}$; baryum, de l'ordre de 10 $\mu\text{g/l}$ et strontium, le plus abondant de la série, approche 40 $\mu\text{g/l}$.

L'influence des premiers ruissellements se traduit partout par une augmentation quasi générale des charges.

A la station de *Duibo* (Bandama), les plus fortes concentrations en lithium, rubidium, strontium, baryum, titane, vanadium, chrome, manganèse, cobalt, nickel, cuivre, molybdène et étain, sont observées aux premiers ruissellements sur le bassin. Si nous prenons en référence, la valeur de la concentration médiane à l'étiage, correspondant pour une bonne part à celle du débit de base alimenté par les nappes amont, les concentrations médianes augmentent dans de grandes proportions.

Le rapport de ces concentrations est voisin de 100 (Ti), de 20 à 10 (Mn, Cu et Ba) et de 6 à 2 (Li, Rb, Sr, V, Cr, Ni, Sn, Pb). Il faut cependant remarquer que le nombre des valeurs analytiques correspondant à cette période (tableau IV) est de 10 pour chaque élément, ce qui est peu, et l'interprétation demande une certaine prudence. Toutefois, nous pouvons penser que des concentrations de l'ordre de 100 $\mu\text{g/l}$ de titane, représentent un ordre de grandeur plus fréquent.

Seuls césium, gallium et plomb atteignent leur maximum au cours de la montée de la grande crue annuelle en provenance des régions septentrionales à végétation de savane. Ceci est en accord avec les valeurs trouvées aux stations amont de Ferkéssédougou et Béoumi, pour autant que soient significatifs les résultats trop peu nombreux et incomplets de ces deux stations.

Au cours de la grande crue annuelle et pendant la période des plus forts débits, gallium, vanadium, lithium, baryum, nickel, strontium et cobalt présentent leurs plus faibles concentrations.

TABLEAU III

Etiage
Concentration en $\mu\text{g/l}$

		Li	Rb	Cs	Sr	Ba	Ti	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Mo	Ga	Sn	Pb	Bi
Duibo	Médiane	1,3	4,2	< 10	46	12,3	2,1	1,4	3,2	1,5	< 1	1,6	2,2	< 0,5	3,2	0,8	1,0	< 1,0
	Intervalle	0,7	3,5		33	10	1,4	1,2	1,3	1,0		0,8	1,5		1,4	0,3	0,8	
	de confiance	à	à		à	à	à	à	à	à		à	à		à	à	à	
	Effectif	1,7	8,5	20	120	15	3,4	2,7	4,4	3,8		4,2	5,1	26	3,8	1,8	1,9	20
Bafécao	Médiane	0,8	3,5	< 10	33	20	1,6	0,8	2,0	0,6	< 1	0,7	4,2	< 0,5	1,2	1,1	0,9	< 0,5
	Intervalle	0,5	2,4		22	13	1,3	< 0,5	0,8	< 0,5		0,5	3,0		0,6	0,5	0,8	
	de confiance	à	à		à	à	à	à	à	à		à	à		à	à	à	
	Effectif	1,6	4,6	18	49	30	1,9	1,6	3,2	1,5	18	1,3	4,7	18	3,5	1,9	1,0	18
Ziénoa	Médiane	1,2	3,5	< 10	44	15	2,5	2,2	2,6	1,1	< 1	1,4	2,9	< 0,6	0,9	0,7	0,9	< 1
	Intervalle	0,7	2		15	10	1,4	< 0,5	2,0	0,5		0,6	1,9		0,8	0,5	0,8	
	de confiance	à	à		à	à	à	à	à	à		à	à		à	à	à	
	Effectif	2,1	6,3	11	105	50	4,6	4,1	3,8	3,9	11	1,9	6,2	11	4,5	1,3	7,4	11
Tiassalé	Médiane	1,3	3,4	< 10	40	14,6	3,2	1,4	2,5	2,5	< 1	1,3	3,5	< 0,5	0,9	0,7	1,0	0,6
	Intervalle	1,0	2,9		29	13	1,6	1,3	1,5	2,0		1,1	2,3		0,7	0,5	0,7	
	de confiance	à	à		à	à	à	à	à	à		à	à		à	à	à	
	Effectif	1,7	4,5	33	55	16	4,3	2,8	3,5	3,7	34	1,6	4,3	34	1,0	0,9	1,3	34

TABLEAU IV

Premiers ruissellements
Concentrations en µg/l

		Li	Rb	Cs	Sr	Ba	Ti	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Mo	Ga	Sn	Pb	Bi
Béoumi	Médiane		1,7								<0,3							<0,3
	Intervalle de confiance	0,5 à 1,7		5 à 5,2	25 à 50	25 à 26	10 à 26	1,7 à 5,2	2,5 à 17,2	3,3 à 13,8		1,7 à 8,6	8,3 à 8,6	<0,3 à 0,9	0,5 à 1,7	<0,3 à 1,7	1,7 à 3,5	
	Effectif	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Duibo	Médiane	4,8	8,0	< 10	210	125	230	8	6,0	24	0,6	5,9	32	<0,3	2,1	2,2	2,5	<0,3
	Intervalle de confiance	4,4 à 6,9	3,4 à 23		95 à 240	125 à 195	230 à 290	0,6 à 19	5,2 à 22	12 à 42		5,3 à 6,9	11 à 47		1,1 à 2,5	1,4 à 4,6	0,6 à 4,3	
	Effectif	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Bafécao	Médiane	1,7	5,6	10	46	29	19	2,2	5,0	9,3	<0,5	4,0	6,8	<0,5	0,9	1,1	1,9	<0,4
	Intervalle de confiance	1,2 à 2,8	4,9 à 6,4		40 à 55	24 à 37	16 à 63	1,6 à 4,3	1,8 à 5,8	5,0 à 17,4		1,8 à 4,9	4,4 à 9,8		0,4 à 1,8	0,8 à 3,1	1,7 à 3,1	
	Effectif	42	42	40	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42
Ziénoa	Médiane	4,0	6,6	<10	71	25	59	4,4	5,5	18	<0,5	3,0	8,9	<0,5	3,0	1,0	3,4	<0,5
	Intervalle de confiance	2,8 à 4,6	5,8 à 8,7		37 à 91	20 à 33	39 à 82	4,0 à 4,8	5,0 à 6,2	10,5 à 27		2,6 à 4,4	6 à 12		2,0 à 4,5	0,6 à 2,1	1,7 à 4,1	
	Effectif	39	39	38	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39
Tiassalé	Médiane	2,3	5,2	< 10	49	22	39	4,4	4,6	16,6	< 1	2,6	4,7	0,8	1,0	0,9	1,5	0,7
	Intervalle de confiance	1,6 à 3,5	4,7 à 5,9		44 à 74	18 à 33	23 à 58	3,8 à 4,8	3,8 à 5,7	11 à 22		1,8 à 4,0	4,2 à 5,2		0,8 à 2,0	0,8 à 1,0	0,9 à 1,8	
	Effectif	63	63	43	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	56	63	63	56

Titane, étain, rubidium, chrome, plomb et césium seront à leur minimum lors de la décrue ; manganèse et cuivre l'atteindront à l'étiage seulement.

A Bafécao (Bandama, en aval), c'est au cours des premiers ruissellements que les éléments suivants : rubidium, césium, strontium, baryum, chrome, manganèse, cobalt, nickel et molybdène présentent leurs valeurs maxima, en général comme à Duibo, situé à l'amont.

Pour lithium, titane, vanadium, cuivre et étain par contre, les plus fortes concentrations se rencontrent au cours de la montée de la grande crue annuelle.

Aux stations de Duibo et Bafécao, les rapports entre les médianes des valeurs analytiques au cours de la montée de la grande crue annuelle et de l'étiage sont similaires pour chaque élément. Ces rapports sont de l'ordre de 17 (Ti), 10 (Mn), 3 à 4 (V et Li), 2,5 à 3 (Ni et Pb), 1,2 (Rb et Ba), 0,4 (Sr) aux deux stations.

Ceci confirme l'apport important en éléments de transition et le faible apport en strontium par les eaux ruisselées en provenance de la région Nord du bassin.

C'est à partir de la période correspondant aux débits maxima de la grande crue annuelle, et pendant la décrue que les plus faibles concentrations sont enregistrées pour gallium, vanadium, baryum, césium, cobalt, cuivre, étain, rubidium, lithium, chrome et plomb. Seuls, titane, manganèse et nickel passent par leur minimum à l'étiage.

L'affluent de rive gauche, le Nzi, étudié à *Ziénoa*, est soumis comme nous l'avons vu auparavant au régime hydrologique équatorial de transition atténué, ce qui entraîne des différences avec les résultats notés sur le Bandama. Les premières phases des hydrogrammes du Nzi et du Bandama correspondant à l'étiage et à la période des premiers ruissellements sont généralement synchrones. Par contre, lorsque le Bandama amorce sa grande crue annuelle, le Nzi présente des débits relativement faibles. La seconde crue du Nzi se place pendant la période de la « pointe de crue » sur le Bandama et les retours des deux cours d'eau vers un régime d'étiage sont presque concomitants. Il faudra donc s'attendre à des différences notables entre les stations situées sur le Bandama et celle de *Ziénoa* au cours de la période correspondant à la montée de la grande crue annuelle sur le Bandama.

Au cours de la première crue, correspondant surtout à des ruissellements sur la partie Sud du bassin, tous les éléments dosés, sauf deux (molybdène et bismuth), présentent leur maximum de concentration. Les plus fortes teneurs en molybdène seront observées pendant la seconde crue, donc également pour une

TABLEAU V

Montée de la grande crue annuelle
Concentration en µg/l

		Li	Rb	Cs	Sr	Ba	Ti	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Mo	Ga	Sn	Pb	Bi
Ferkéssé-dougou	Médiane			< 8				5	5		< 1					< 1	2,5	< 0,3
	Intervalle de confiance	1,7 à 2,5	3,4 à 5		15 à 17	12,5 à 34	125 à 850			12,5 à 17		2,5 à 3,4	37,5 à 85	< 0,5 à 0,7	2,5 à 3,4		2,5 à 5	
	Effectif	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Béoumi	Médiane													< 0,4				< 0,4
	Intervalle de confiance	1,5 à 4,3	3,9 à 5,2	13 à 17	22 à 26	26 à 34	26 à 51	2 à 4,3	2 à 5,2	< 0,5 à 17	< 0,5 à 0,5	1,3 à 4,3	13 à 17		1,5 à 3,4	26 à 34	< 0,7 à 7,3	
	Effectif	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Duibo	Médiane			< 20										< 0,6				< 0,6
	Intervalle de confiance	4,3 à 5,5	5,6 à 6,2		17 à 38	15 à 18	35 à 50	4,7 à 5,3	5,5 à 6,0	14 à 18	< 2	4,4 à 5,6	5,3 à 5,8		4,3 à 5,3	0,7 à 1,3	2,5 à 3,5	
	Effectif	18	18	14	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	14
Bafécao	Médiane			< 8										< 0,5				< 0,3
	Intervalle de confiance	2,4 à 4,4	4,0 à 4,5		13,2 à 24,4	25,5 à 32	29 à 45	3,1 à 4,6	2,7 à 6,0	7,1 à 12,6	< 1	1,9 à 3,7	12,6 à 20		1,1 à 1,8	5,1 à 18,2	2,1 à 3,0	
	Effectif	23	23	19	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	19
Ziénoa	Médiane			< 10										< 0,5				< 1
	Intervalle de confiance	2,8 à 9,5	3,4 à 6,9		14 à 47	18 à 30	38 à 78	1,8 à 5,8	3,2 à 7,3	12,7 à 20	< 0,5	< 0,5 à 2,1	8,0 à 13		1,1 à 3,3	1,0 à 1,4	2,2 à 3,8	
	Effectif	18	18	14	18	18	18	18	18	18	17	18	18	18	14	18	18	14
Tiassalé	Médiane			< 5										< 0,5				0,4
	Intervalle de confiance	3,4 à 7,9	5,0 à 5,8		20 à 40	22 à 34	40 à 25	3,2 à 6,3	4,4 à 5,8	5,6 à 15,8	< 1	1,6 à 2,5	5,1 à 6,0		0,5 à 1,8	1,2 à 1,5	1,8 à 2,1	
	Effectif	25	25	16	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	16	25	25	16

TABLEAU VI

Pointe de crue
Concentration en µg/l

		Li	Rb	Cs	Sr	Ba	Ti	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Mo	Ga	Sn	Pb	Bi
Ferkés-sédougou	Médiane	<0,3	1,7	< 1	18	9,6	1,4	0,3	0,6	0,6	<0,3	<0,3	3,3	<0,5	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3
	Intervalle de confiance	à 0,4	à 2,6	à < 8	à 104	à 227	à 26	à 2,6	à 23	à 2,6	à < 1	à 4,5	à 15,6	à < 0,65	à <0,5	à 19,5	à 1,3	
	Effectif	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Béoumi	Médiane	0,4		< 1														
	Intervalle de confiance		3,8		13	25	1,4	0,4	0,4	0,7	<0,3	<0,3	3,8	<0,3	<0,3	<0,3	0,4	<0,3
	Effectif	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Duibo	Médiane	0,4	4,0	<10	11,5	< 3	25	0,7	4,2	3,2	<0,5	1,4	4,4	<0,5	0,9	1,0	0,9	<0,6
	Intervalle de confiance	à 0,3	à 2,3		à 3,9	à < 3	à 4,5	à <0,5	à 3,5	à 2,3	à <0,5	à 0,4	à 3,4	à <0,5	à 0,8	à 0,8	à 0,8	
	Effectif	14	14	13	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	13	14	14	14
Bafécao	Médiane	0,4	4,3	< 1	28	19,8	10	0,7	1,8	3,5	<0,5	1,3	4,8	< 1	0,3	1,0	1,0	<0,5
	Intervalle de confiance	à <0,3	à 3,8		à 24	à 3,1	à 3,7	à <0,5	à 0,5	à 2,6	à <0,5	à 0,6	à 4,4	à < 1	à <0,3	à 0,9	à 0,9	
	Effectif	19	19	15	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	17	19	19	19
Ziénoa	Médiane	2,2	4,7	<10	41	4,8	45	0,7	3,9	13,5	<0,6	1,9	8,9	< 1	0,7	0,9	0,9	< 1
	Intervalle de confiance	à 0,7	à 3,5		à 21	à <3,0	à 18	à <0,5	à 3,3	à 3,8	à <0,6	à 0,9	à 3,6	à < 1	à 0,5	à 0,8	à 0,8	
	Effectif	13	13	9	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	11	13	13	13
Tiassalé	Médiane	1,8	4,3	<10	22	4,1	19,5	1,1	3,0	4,5	<0,5	0,5	4,7	< 1	0,6	0,9	0,8	0,4
	Intervalle de confiance	à 0,9	à 3,8		à 12	à 3,0	à 13,7	à <0,5	à 1,6	à 2,0	à <0,5	à 0,4	à 2,0	à < 1	à 0,4	à 0,8	à 0,5	
	Effectif	25	25	17	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	17	25	25	25

phase de ruissellement intense. Le bismuth, par contre, réagit à l'inverse puisque ses concentrations maxima sont relevées aux deux périodes où les eaux ruisselées sont moins abondantes, la première correspondant à l'étiage, la seconde se situant entre les deux crues.

Les plus faibles teneurs sont souvent notées lorsque le ruissellement est réduit. C'est le cas à l'étiage pour cuivre, manganèse, étain, lithium et titane, et pendant la période intercalée entre les deux crues pour rubidium, nickel, strontium, molybdène et cobalt. Seul, le bismuth semble passer par un minimum au cours de la première crue. Les autres éléments, gallium, vanadium, baryum, plomb, chrome et césium présentent leurs concentrations minima pendant la seconde crue et le retour vers le débit d'étiage.

La station de *Tiassalé* (la plus en aval sur le Bandama), intègre les bassins du Bandama à Bafécao et du Nzi à Ziénoa.

Par rapport aux concentrations d'étiage, nous assistons à une augmentation générale des teneurs avec l'arrivée des premières eaux ruisselées, répercutant les influences, soit du Bandama, soit du Nzi. Les éléments qui présentent leurs concentrations maxima au cours de cette période sont : manganèse, vanadium, nickel, chrome, baryum, rubidium, strontium, gallium, molybdène, bismuth, césium et cobalt. Les autres, plomb, cuivre, titane, lithium et étain attendront l'arrivée des eaux correspondant à la montée de la grande crue annuelle en provenance du Nord.

Les plus faibles concentrations des éléments en traces relevées à Tiassalé s'étaleront dans le temps au cours de la grande crue annuelle et jusqu'à l'étiage. Pendant la montée de la grande crue annuelle, strontium, gallium, molybdène et bismuth passeront par leur minimum. En période de débit maximum, ce sera le tour de baryum, nickel, vanadium et cobalt. En décrue, plomb, cuivre, chrome, lithium, rubidium et césium présenteront leurs plus faibles teneurs ainsi que titane, manganèse et étain en fin de décrue et à l'étiage.

TABLEAU VII

Décrué
Concentration en µg/l

		Li	Rb	Cs	Sr	Ba	Ti	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Mo	Ga	Sn	Pb	Bi	
Ferkéssé-dougou	Médiane	<0,3		< 1							<0,3				<0,3		<0,3	<0,3	
	Intervalle de confiance		1,2 à 2,0		64 à 12,5	13 à 35,5	1,4 à 3,6	0,4 à 1,8	1,3 à 24	0,8 à 2,4		0,4 à 3,6	0,4 à 23,7	<0,3 à 0,4		13,4 à 21,8			
	Effectif	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Béoumi	Médiane	0,4 à 1,5	4,1 à 22	< 1 à 3,9	27 à 100	7,5 à 30	1,5 à 65	0,5 à 1,5	0,5 à 4,5	0,5 à 8,9	0,15 à 0,5	0,7 à 13	2,2 à 4,4	<0,3 à 1	<0,3 à < 1	0,4 à 8,1	1,1 à 10	<0,3 à 1,5	
	Intervalle de confiance																		
	Effectif	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Duibo	Médiane	1,3 à 0,8	2,3 à 1,7	< 10 à 4,4	32 à 87	20 à 38	1,9 à 4,2	1,4 à 2,4	1,6 à 2,0	1,6 à 2,9	< 1	1,4 à 1,9	3,0 à 3,8	<0,5	0,9 à 1,0	0,6 à 0,4	0,5 à 0,3	<1,0	
	Intervalle de confiance																		
	Effectif	16	16	14	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
Bafécao	Médiane	0,4 à 0,3	2,9 à 2,6	< 3	18,6 à 12,8	13,8 à 8,9	2,8 à 2,0	1,2 à 0,7	1,4 à 0,6	1,0 à 0,7	<0,5	1,2 à 1,0	2,8 à 1,7	<0,5	0,6 à 0,3	0,7 à 0,5	0,7 à 0,5	< 1	
	Intervalle de confiance																		
	Effectif	23	23	20	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	20	23	23	20	20
Ziénoa	Médiane	1,6 à 1,2	3,8 à 2,5	< 10	25 à 17	16 à 9	6,3 à 3,6	2,2 à 1,7	1,9 à 1,7	2,8 à 2,0	< 1	1,8 à 1,6	3,6 à 3,2	<0,6	0,9 à 0,8	0,7 à 0,5	1,1 à 0,7	< 1	
	Intervalle de confiance																		
	Effectif	19	19	17	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	17	19	19	19	17
Tiassalé	Médiane	0,8 à 0,5	3,2 à 2,6	< 3	34 à 18	19,2 à 14	3,3 à 1,8	1,5 à 1,3	1,5 à 1,1	2,6 à 1,4	< 1	1,7 à 1,0	1,7 à 1,5	<0,5	0,7 à 0,5	0,8 à 0,5	0,8 à 0,4	0,6	
	Intervalle de confiance																		
	Effectif	29	29	22	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	24	29	29	29	24

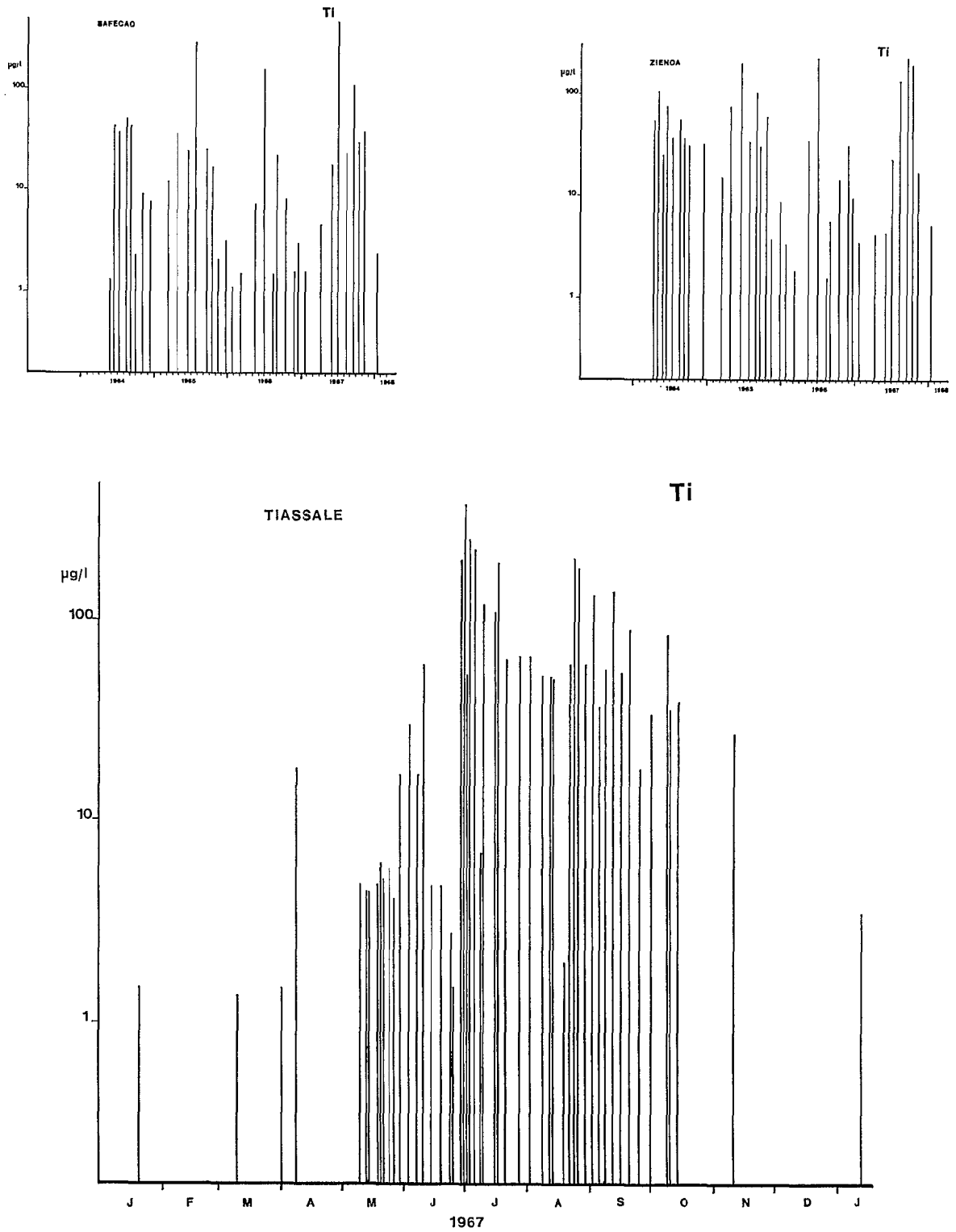


FIG. 4. — Titane, concentration en µg/l.

TRANSPORT EN SOLUTION D'ÉLÉMENTS EN TRACES PAR LE BANDAMA

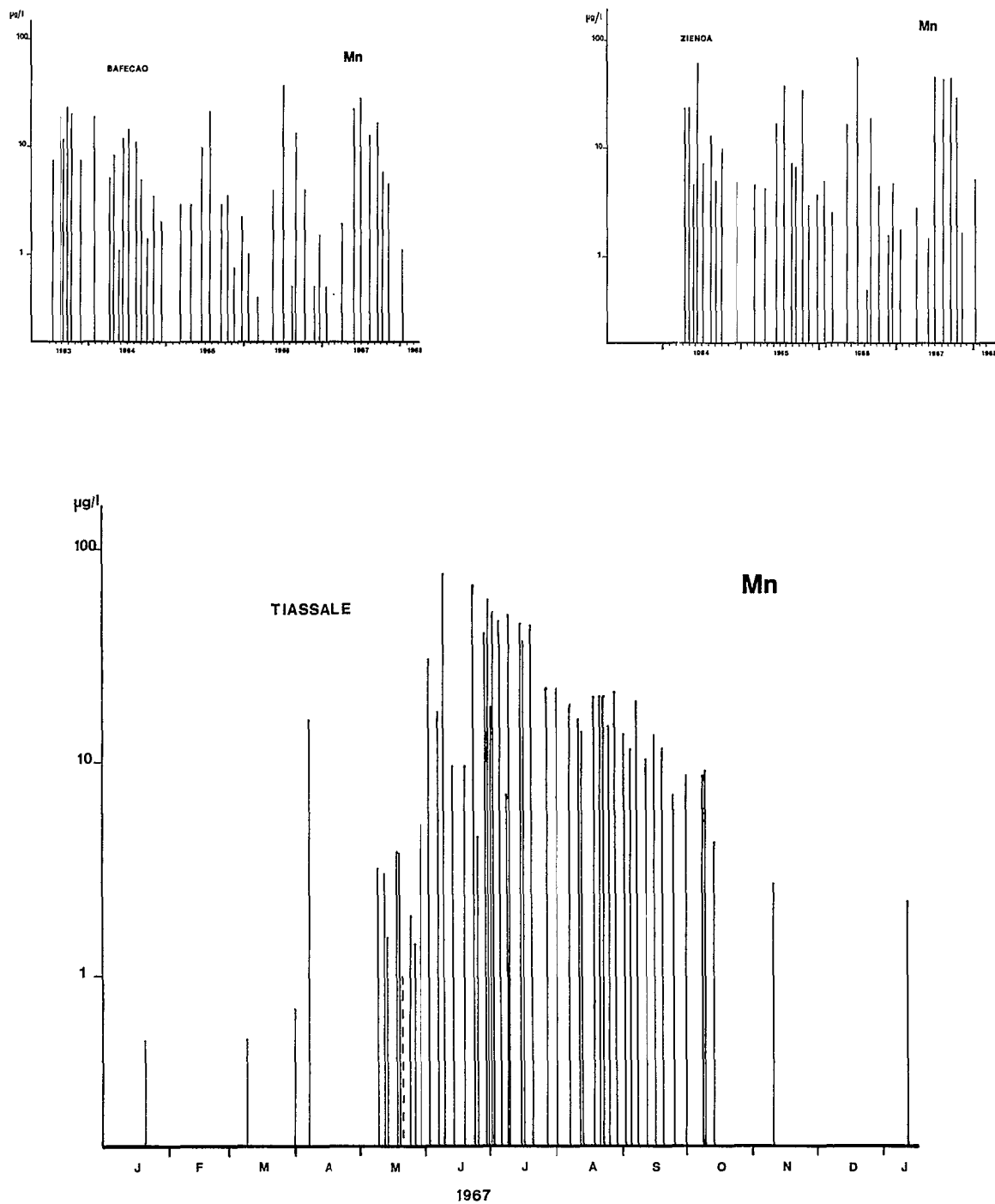


FIG. 5. — Manganèse, concentration en µg/l.

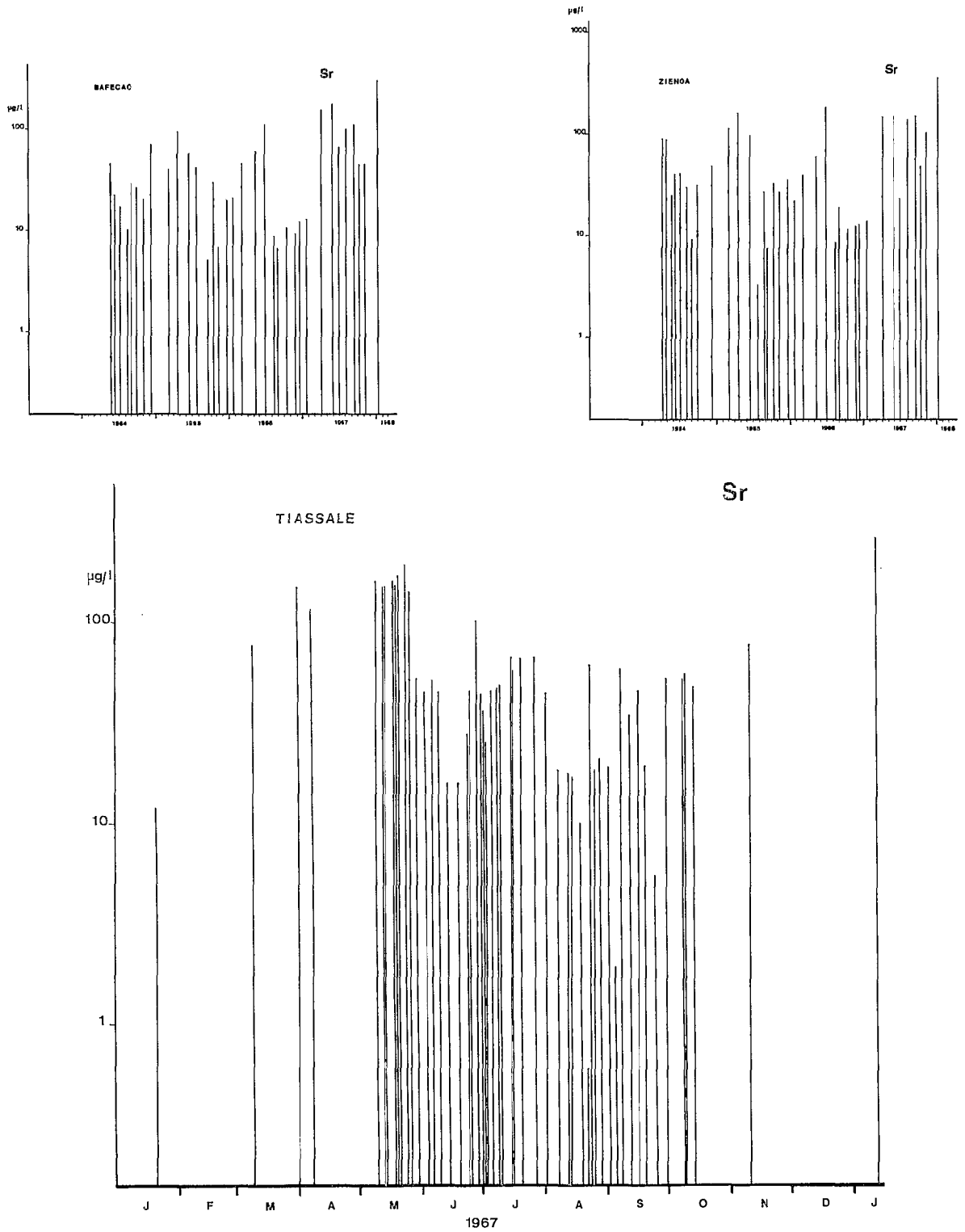


FIG. 6. — Strontium, concentration en µg/l.

Après avoir donné un aperçu sur l'influence des régimes hydrologiques aux diverses stations d'étude sur la concentration des éléments en traces, nous allons reprendre chacun d'eux en essayant de donner leur comportement au cours du cycle hydrologique (tableaux III, IV, V, VI et VII). Pour illustrer l'évolution des concentrations de quelques éléments (Ti, Mn et Sr), nous avons reporté sur les figures 4, 5, 6, les valeurs analytiques obtenues à Bafécoa et Ziénoa pendant toute la durée de l'étude et celles de Tiassalé en 1967 où l'échantillonnage fut plus serré.

ÉVOLUTION DES CONCENTRATIONS

Lithium. — La concentration de cet élément dans les eaux de surface est voisine sur tout le bassin de 1 $\mu\text{g/l}$ en étiage, valeur en accord avec la médiane de 1,1 donnée par DURUM et HAFFTY (1963), pour les grands fleuves d'Amérique du Nord, mais beaucoup plus faible que celle donnée par MOROZOV (1969) en U.R.S.S. L'influence des premières précipitations se traduit par une augmentation de la charge plus notable sur le Nzi que sur le Bandama. Sur ce dernier, les plus fortes concentrations, environ 3 $\mu\text{g/l}$, coïncident avec la montée de la grande crue mais lorsque le ruissellement devient très important, cette charge diminue, passe par son minimum (0,5 $\mu\text{g/l}$). A Tiassalé les teneurs sont supérieures en raison des apports du Nzi.

Rubidium. — Les variations de concentration du rubidium sont très faibles autour d'une valeur d'étiage de 3 à 4 $\mu\text{g/l}$. A titre de comparaison, en Amérique du Nord, la concentration donnée par DURUM et HAFFTY (1963) est de 1,5 $\mu\text{g/l}$. Au Japon, YAMAGATA et NOBORU (1951) donnent de 0,3 à 2 $\mu\text{g/l}$. Il semble toutefois que l'influence des premiers ruissellements, en particulier ceux de la zone forestière méridionale, provoque une légère augmentation.

Le rapport du poids des concentrations Li/Rb est toujours inférieur à l'unité, surtout pour les forts débits, alors qu'il est donné pour environ 1,25 par MOROZOV (1969).

Césium. — Les concentrations de cet élément étant souvent voisines des limites de détection, il est difficile d'apprécier son comportement. Il semble cependant que les premiers ruissellements sur le bassin amènent une légère augmentation des teneurs.

Strontium. — L'influence de la végétation forestière se fait sentir sur la concentration de cet élément dans les eaux de surface. En région de savane, les concentrations sont relativement faibles (de l'ordre de 10 $\mu\text{g/l}$) à l'étiage ou en crue. D'amont en aval, par contre, avec la végétation qui devient de plus en plus abondante pour aboutir à la forêt sempervirente, les concentrations augmentent considérablement lorsque les ruissellements se produisent sous couvert forestier. L'influence de ce facteur avait déjà été montrée par DEFOSSEZ *et al.* (1967), MATHIEU et MONNET (1970).

Les concentrations rencontrées sont toutefois voisines de celles citées par TUREKIAN, HARRISS et JOHNSON (1967) sur une rivière de Caroline du Nord (50 $\mu\text{g/l}$) ; FABRICAND, IMBIMBO et BREY (1968) sur l'Hudson (140 $\mu\text{g/l}$) ; ANGINO *et al.* (1969) dans le bassin du bas Kansas (110 $\mu\text{g/l}$). Des concentrations beaucoup plus fortes (supérieures à 500 $\mu\text{g/l}$) sont citées par SKOUGSTADT et HERR (1960), elles ont été interprétées en fonction du débit des rivières, et ils pensent qu'en général, les teneurs sont plus importantes en basses eaux.

Baryum. — Les concentrations de cet élément subissent également l'influence de la végétation. A l'occasion des ruissellements sous forêt, les charges sont plus élevées, que ce soit sur le Bandama ou sur le Nzi. Ce dernier fournit, semble-t-il, moins de baryum. Il ne faut pas négliger l'apport donné par le débit de base surtout lorsque celui-ci est important, à la fin de la crue annuelle du Bandama. Les teneurs observées, de l'ordre de quelques dizaines de $\mu\text{g/l}$, sont analogues à celles données par DURUM et HAFFTY (1963), KRONER et KOPP (1965), TUREKIAN *et al.* (1967).

Titane. — La concentration en titane varie en fonction de la quantité relative des eaux ruisselées, surtout si celles-ci proviennent de la région Nord du bassin. Les eaux correspondant au débit de base de

l'étiage sont relativement pauvres (quelques $\mu\text{g/l}$). Pendant les crues, lorsque les eaux ruisselées sont abondantes, nous trouvons plusieurs dizaines de $\mu\text{g/l}$ de titane. Ceci est vraisemblablement dû à la haute concentration en titane dans les argiles des horizons de surface, comme l'a montré SHERMAN (1952) à Hawaï.

A la fin de la grande crue annuelle, le débit ruisselé est relativement faible par rapport au débit de base dont les eaux sont moins chargées ; ceci entraîne une baisse sensible de la concentration en titane.

Nous retiendrons surtout la mise en solution rapide de cet élément par les eaux de surface en particulier dans le Nord du bassin, provoquant des variations importantes de concentration.

Vanadium. — Le comportement de cet élément semble indiquer l'influence du substratum sur la mise en solution, qui est plus rapide sur les altérations granitiques. L'alimentation des zones de surface doit être relativement lente, en raison de la diminution rapide des teneurs en pointe de crue. Ceci se rapproche en partie des observations de LINSTEDT et KRUGER (1969) qui font correspondre les plus grandes teneurs aux plus faibles débits. Les concentrations observées (quelques $\mu\text{g/l}$), sont du même ordre de grandeur que celles données par SUGAWARA, KEN, NAITO et YAMADA (1956), DURUM et HAFFTY (1963).

Chrome. — La concentration en chrome (quelques $\mu\text{g/l}$), varie faiblement en cours d'année, mais les eaux du débit de base sont en général moins chargées que les eaux ruisselées surtout si celles-ci ont circulé en savane sur des granites altérés.

Manganèse. — La concentration en manganèse dans les eaux correspondant au débit de base est relativement faible (de l'ordre du $\mu\text{g/l}$). A la surface du sol, la mise en solution est rapide puisque les eaux ruisselées présentent des concentrations beaucoup plus importantes. La diminution progressive des concentrations pendant toute la crue est due à l'effet du lessivage en surface. Les teneurs données par KONOVALOV (1959), DURUM et HAFFTY (1963), KONOVALOV *et al.* (1966), FABRICAND *et al.* (1968), ANGINO *et al.* (1969), sont voisines des concentrations observées sur le Bandama ; par contre, HABERER (1969), PASTERNAK et ANTONIEWICZ (1970), ont travaillé sur des rivières chargées à 100 $\mu\text{g/l}$ de manganèse.

Cobalt. — Les concentrations de cet élément sont en général inférieures à 1 $\mu\text{g/l}$. Les techniques analytiques utilisées ne permettent pas d'en déduire son évolution, cependant il semble que cet élément soit moins abondant dans les eaux ayant ruisselé sur la partie méridionale du bassin.

Nickel. — La charge est voisine de 1 $\mu\text{g/l}$ dans les eaux d'étiage. Elle est en général supérieure dans les eaux ruisselées, surtout si celles-ci correspondent aux premières crues sous forêt au début de saison.

Les teneurs sont relativement faibles, comparées à celles données par KRONER et KOPP (1965), KONOVALOV *et al.* (1966), FABRICAND *et al.* (1968), ANGINO *et al.* (1969).

Cuivre. — Les variations de concentration de cet élément sont restreintes. Le ruissellement a une influence notable surtout en forêt, il provoque une augmentation importante des concentrations qui peuvent dépasser la dizaine de $\mu\text{g/l}$. Ceci est confirmé par KOLESNIKOVA et KONOVALOV (1966), d'après leurs observations sur les fleuves d'U.R.S.S. Ils pensent que la mobilité du cuivre est surtout déterminée par le processus biologique de dissociation des substances organiques en surface. Un phénomène du même ordre peut certainement se rencontrer en zone intertropicale et les régions forestières, avec une végétation dense fourniront certainement davantage de cuivre. Le transport dépendra donc surtout des ruissellements sur les parties forestières du bassin.

Molybdène. — La teneur en molybdène dans les eaux de surface est souvent inférieure à 0,5 $\mu\text{g/l}$. Il semble cependant que cette charge augmente dans de faibles proportions au début des crues. VEGELI et KING (1969) signalent que dans le Colorado, suivant les rivières étudiées, les concentrations augmentent ou diminuent en hautes eaux.

Gallium. — La concentration en gallium est de l'ordre du $\mu\text{g/l}$ dans les eaux de surface, et seuls les débuts de ruissellements sous forêt, en particulier dans le cours inférieur du Nzi, présentent des concentrations plus fortes.

Etain. — Cet élément est représenté à la concentration de 1 $\mu\text{g/l}$ dans les eaux de surface ; seules les eaux de ruissellement présentent des charges supérieures surtout dans la partie amont du bassin.

Plomb. — Les augmentations de la concentration en plomb sont dues à l'action des eaux ruisselées, en particulier sur la partie Nord du bassin du Bandama et sur le Nzi. Le lessivage de la surface des sols par le ruissellement conduit à une diminution des teneurs au cours de la grande crue sur le Bandama. Les valeurs faibles se retrouvent en fin de crue et à l'étiage.

Bismuth. — La teneur en bismuth est souvent inférieure à 1 $\mu\text{g/l}$ et les eaux ruisselées sont généralement les moins chargées.

CONCLUSION

Au cours du cycle hydrologique, la composition chimique des eaux de surface évolue. Chaque élément ne peut être caractérisé par une teneur statique. Nous avons vu que la concentration des éléments en traces provient pour une bonne part de l'influence des eaux ruisselées à composition très variable, sur les eaux du débit de base alimenté par les nappes. Dans ces eaux d'origine souterraine les éléments présentent une certaine stabilité qui est troublée par les précipitations localisées, faisant intervenir les conditions naturelles particulières à chaque bassin élémentaire.

Les régions septentrionales où dominent les altérations sur granites, les étendues cuirassées recouvertes par une végétation réduite laissent entraîner par les eaux de surface davantage de titane, lithium, cuivre, gallium, étain et plomb. Par contre les régions méridionales, recouvertes par une importante végétation fourniront plus abondamment strontium, baryum, nickel et rubidium. Certains éléments comme le manganèse et le vanadium, tout en présentant des concentrations nettement plus élevées dans les eaux ruisselées que dans l'écoulement de base, semble être indifférents, pour un même bassin, à la nature du couvert végétal.

La concentration des éléments en traces n'est certainement pas à mettre en corrélation directe avec le débit même si en première approximation une croissance générale des teneurs est observée lorsque le débit du Bandama augmente. La relation entre ces deux facteurs est beaucoup plus complexe, mais il est significatif que les eaux ayant circulé seulement en surface sont plus chargées en éléments en traces que les eaux souterraines alimentant le débit de base. La mise en solution en surface est plus ou moins importante selon les éléments. Les plus grandes augmentations de concentration dans les eaux ruisselées sont observées pour certains éléments, en particulier le titane et le manganèse qui sont donnés pour être peu solubles dans les altérations au voisinage de la roche saine.

Il est également intéressant de noter que les valeurs citées pour les autres fleuves du monde, en particulier d'Amérique du Nord et d'U.R.S.S. s'inscrivent dans la gamme des concentrations obtenues sur le Bandama, situé en zone intertropicale. Encore faut-il que les comparaisons soient faites pour des conditions hydrologiques semblables, mais ces dernières ne sont malheureusement pas toujours indiquées avec une précision suffisante.

BIBLIOGRAPHIE

- ANGINO (E.E.), GALLE (O.K.), WAUGH (T.C.), 1969. — Fe, Mn, Ni, Co, Sr, Li, Zn. and SiO_2 in streams of the Lower Kansas River Basin. *Water Resources Research*, 5, 3, pp. 698-704.
- DEFOSSEZ (M.), MANGIN (J.Ph.), PINTA (M.), 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, pp. 257-276.
- DURUM (W.H.), HAFFTY (J.), 1960. — Occurrence of minor elements in water. *US Geol. Surv. Circ.*, 445, 11 pages.

- DURUM (W.H.), HAFFTY (J.), 1963. — Implications of the minor element content of some major streams of the world. *Geoch. et Cosmoch. Acta.*, 27, pp. 1-11.
- FABRICAND (B.P.), IMBIMBO (E.S.), BREY (M.E.), 1968. — Concentration changes of Ca, Cu, Li, Mg, K, Na and Sr in the Hudson River, New York. *Journ. Sediment. Petrol.*, 38, pp. 671-674.
- HABERER (K.), 1969. — Ergebnisse Spurenanalytischer untersuchungen an Fließgewässern in Süddeutschland. Vom Wasser, Dtsch., 35, pp. 62-75.
- KOLESNIKOVA (T.Kh.), KONOVALOV (G.S.), 1966. — Départ de Br, I, Zn, Cu dissous dans l'eau des rivières d'URSS. *Gidrokhim. Mater.*, SSSR, 42, pp. 85-93.
- KONOVALOV (G.S.), 1959. — The transport of microelements by the most important rivers of the USSR. *Akad. Nauk SSSR Doklady*, 129, pp. 912-915.
- KONOVALOV (G.S.), IVANOVA (A.A.), KOLESNIKOVA (T.Kh.), 1966. — Eléments rares et dispersés dans l'eau et dans les substances en suspension des rivières du territoire européen de l'URSS. *Gidrokhim. Mater.*, 42, pp. 94-111.
- KRONER (R.C.), KOPP (J.F.), 1965. — Trace elements in six water systems of the United States. *J. Amer. Wat. Works. Ass.*, pp. 150-156.
- LINSTEDT (K.D.), KRUGER (P.), 1969. — Vanadium concentrations in Colorado River Basin Waters. *J. Amer. Wat. Works. Ass.*, 61, 2, pp. 85-88.
- LIVINGSTONE (D.A.), 1963. — Chemical composition of rivers and lakes. Data of Geochemistry, U.S. Geol. Surv. Profess. Paper, 440 G.
- MATHIEU (Ph.), MONNET (C.), 1970. — Apports chimiques par les eaux de pluie en savane et sous forêt en climat intertropical (Côte d'Ivoire). *Rapp. ORSTOM, multigr.*, 153 pages.
- MOROZOV (N.P.), 1969. — Géochimie des éléments alcalins dans le débit des rivières. *Geokhimiya, SSSR*, 6, pp. 729-739.
- PASTERNAK (K.), ANTONIEWICZ (A.), 1970. — Preliminary investigations on the content of some trace components in surface waters of Southern Poland. *Acta Hydrobiol.*, 12, 2-3, pp. 111-124.
- SHERMAN (G.D.), 1952. — The Titanium content of Hawaiian soils and its significance. *Soil. Sci. Soc. Amer. Proc.*, 16, pp. 15-18.
- SKOUGSTADT (M.W.), HERR (C.A.) 1960. — Occurrence of Strontium in natural water. *US Geol. Surv. Circ.*, 420, 6 pages.
- SUGAWARA, KEN, NAITO, YAMADA, 1956. — Geochemistry of Vanadium in natural waters. *Jour. Earth Sci.*, Nagoya Univ., 4, pp. 44-61.
- TUREKIAN (K.K.), HARRISS (R.C.), JOHNSON (D.G.), 1967. — The variations of Si, Cl, Na, Ca, Sr, Ba, Co and Ag in the Neuse River, North Carolina. *Limnology and Oceanography*, 12, pp. 702-706.
- VOEGELI (P.T.), KING (R.V.), 1969. — Occurrence and distribution of Molybdenum in the surface water of Colorado. *Geol. Surv. Wat. Supply Paper*, 1535-N, III, 32 pages.
- YAMAGATA, NOBORU, 1951. — Geochemical Studies on rare alkalies. IX. Rare alkali content of Japanese rivers. *Chem. Soc. Japan Jour.*, Pure Chem. Sec., 72, pp. 753-756.