

BILANS HYDROLOGIQUES ET GEOCHIMIQUES D'UN ECOSYSTEME FORESTIER EQUATORIAL DE L'AFRIQUE CENTRALE : LA NGOKO A MOLOUNDOU (CAMEROUN)

L. SIGHA-NKAMDJOU, P. CARRE & P. SEYLER

RESUME :

Le bassin versant de la Ngoko constitue le cours amont de la Sangha, un des affluents principaux de la rive droite du Congo. Formée du Dja et de la Boumba, la Ngoko draine un bassin versant de 67000 km², lithologiquement homogène et couvert à 95 % de forêt dense primaire. Ce bassin, caractéristique de l'écosystème forestier tropical humide, a été choisi en raison de son caractère strictement forestier et de son éloignement de possibles sources de contamination anthropique.

Durant 3 cycles hydrologiques (1989-1992), des campagnes de mesures et de prélèvements ont été effectuées aux exutoires des sous-bassins et à celui du bassin principal, ainsi que sur 9 stations pluviométriques. Les éléments majeurs ont été analysés sur l'ensemble des échantillons; sur certains, le carbone organique dissous et particulaire ont aussi été dosés.

Le suivi des régimes des précipitations a mis en évidence l'existence d'une zone de faible pluviosité à la frange Est du bassin. Le bilan hydrologique fait ressortir un déficit d'écoulement de 75 % pour une lame d'eau précipitée de 1470 mm. an-1 et une lame écoulée de 360 mm.an-1. Le transport de matières minérales en suspension, constituées essentiellement de kaolinite, a augmenté de 8 t.km².an-1 à 14 t.km².an-1 au cours des trois cycles étudiés, vraisemblablement en raison de l'augmentation des surfaces d'exploitation forestière.

L'étude des transports chimiques dissous a montré trois types de comportements liés à l'origine atmosphérique, lithologique ou partiellement biologique des éléments. Les bilans de transferts élémentaires ont été calculés et les implications concernant les mécanismes d'érosion et d'altération sont discutés.

ABSTRACT :

The Ngoko River, addition of both Dja and Boumba Rivers, constitutes the upper part of the Sangha river, a tributary of the Zaïre-Congo river. It is a strictly undisturbed watershed (67 000 km²) located in southeastern Cameroon and covered at 95 % by evergreen forest.

From 1989 to 1992, daily and weekly measurements of stream flow and solid transport, respectively, were carried out at the outlets of the main basin (Ngoko at Moloundou station) and of the Dja and Boumba sub-basins. Rainfall samples were also collected at nine sites within the catchment. Rain and stream water were both analyzed for the ions and, for some samples, dissolved and particulate carbon were also analysed.

The study of the precipitations showed an area where rainfall is markedly lessened, at the eastern bound of the basin. This rainfall shortage might be ruled by a natural orographic barrier, formed by a series of hills which extend from North to South, possibly slowing the mousson flow eastward. The annual water balance shows that evapotranspiration accounted for 75 % of the total precipitation (1470 mm) over the period of study, while stream flow was around 360 mm.year-1. The suspended matter load increased from 8 t.km².yr-1 in 1989 to 14 t.km².yr-1 in 1992, likely in relation with the growing deforestation activity over the basin. The mineral part of these matters were basically formed of clays (80 %), generally kaolinite.

Chemical analyses show seasonal cycles for most parameters, with maximum values at the end of the long dry season (March) and minimum values at the end of the long wet season (November). With regard to the solute transport, the concentration of some chemical species (Conductivity, HCO₃⁻, Ca²⁺, Mg²⁺) decreased with increasing discharge, whereas K⁺, SO₄²⁻, NO₃⁻ and Cl⁻ displayed no consistent relationship with discharge and were relatively steady throughout the year. Elemental balances between rainfall inputs and river outputs are calculated and geochemical implications for erosion and denudation processes on a medium-size basin of the humid tropical zone are discussed.

1. INTRODUCTION

La plupart des études hydrochimiques réalisées sur les rivières et fleuves de la zone équatoriale ont considéré de très larges entités, tel que l'Amazonie (GIBBS, 1967;1972;1977; SCHMIDT, 1972; MEADE et al, 1979; STALLARD et EDMOND, 1981, 1983; FURCH, K., 1984) ou le Congo-Zaïre (SYMOENS, 1968; MEYBECK, 1978; SHOLKOVITZ et al, 1978, MOLINIER, 1979; DERONDE et SYMOENS, 1980; MOUKOLO et al, 1990; KINGA MOUZE, 1983; NKOUNKOU et PROBST, 1987; PROBST et al, 1992). Si l'étude de ces grands systèmes permet d'avoir une estimation correcte des apports à l'océan, elle ne permet pas, en général, d'avoir des informations directes sur les contributions respectives de chacune des unités lithologiques, climatiques ou végétales qui composent le bassin versant.

L'étude des entités "amonts", représentatives et homogènes a été prise en compte dans le programme "Grands Bassins Fluviaux" par l'installation d'observatoires permanents, en particulier sur le bassin du Dja-Ngoko. Ce bassin, caractéristique de l'écosystème forestier tropical humide, a été choisi en raison de son homogénéité lithologique, de sa couverture exclusivement forestière et de son éloignement de possibles sources de contamination.

L'objectif à long terme de cette étude est de comprendre le comportement naturel de cet écosystème encore intact et de quantifier les transferts biogéochimiques entre les compartiments du système. Cet article est consacré aux résultats concernant les principaux régimes hydro-pluviométriques et à l'origine, aux variations et aux bilans de transfert des éléments majeurs, obtenus à l'issue de 3 campagnes de mesures (1989-1992).

2. CADRE PHYSIQUE ET METHODES D'ETUDE

2.1. LE MILIEU NATUREL

Le Dja et la Boumba confluent à 1,5 km en amont de Moloundou (extrême sud-est du Cameroun) et prennent le nom de Ngoko. Celle-ci forme, avec la Kadey et la Mambéré, la Sangha, deuxième affluent rive droite du Congo après l'Oubangui (Fig. 1). A leur confluence le Dja et la Boumba drainent des superficies respectives de 39 700 km² et de 27 300 km², soit dans l'ordre 60 et 40 % de celle de la Ngoko. L'ensemble du bassin est une pénéplaine de 700 à 900 m d'altitude dans sa partie occidentale, s'inclinant progressivement au sud-est dans la cuvette congolaise à 350 m dans la région de Moloundou en passant par 600 m dans la boucle du Dja. Le bassin s'étend de 11° à 16° Est de longitude et de 1°30' à 5° Nord de latitude.

Le climat est de type équatorial à 4 saisons: 2 saisons sèches (décembre-mars et juillet-août) et 2 saisons des pluies (avril-juin et septembre-novembre). En moyenne, la température est de 25°C, l'humidité est de 80 %, l'insolation effective de 1500 à 1750 heures par an (SUCHEL, 1972). L'évapotranspiration potentielle est évaluée à 1 200 mm suivant la formule de TURC (OLIVRY, 1986).

A l'exception des formations carbonatées de Mintom (Fig. 2) et du complexe andésito-doléritique des bassins de Lokomo-Bangué, la géologie est constituée principalement des roches du socle protérozoïque (grès, quartzites, schistes, micaschistes, gneiss et granites charnockitiques). Les sols qui en dérivent sont de type ferrallitique rouge sur les versants et hydromorphe dans les plaines marécageuses. (SEGALLEN, 1967). Ils supportent une forêt dense primaire sempervirente (forêt congolaise), délimitée à l'ouest et au nord par la forêt semi-caducifoliée (Fig. 3). Une information plus complète sur la climatologie, la géomorphologie, la géologie et la végétation du Sud Cameroun peut être obtenue dans LETOUZEY (1968) et OLIVRY (1986).

2.2. PRELEVEMENTS ET ANALYSES

Les pluies ont été collectés au moyen de pluviomètres standards en plexiglass (norme OMM), installés généralement aux abords des stations du réseau météorologique camerounais. Les pluviomètres étant continuellement ouverts, il n'a pas été possible de différencier les retombées sèches (poussières) et des retombées humides (pluies). Les

échantillons de pluie brute (bulk fallout) sont cumulés par période de 1 mois et une aliquote est filtrée sur 0,45 µm avant analyse.

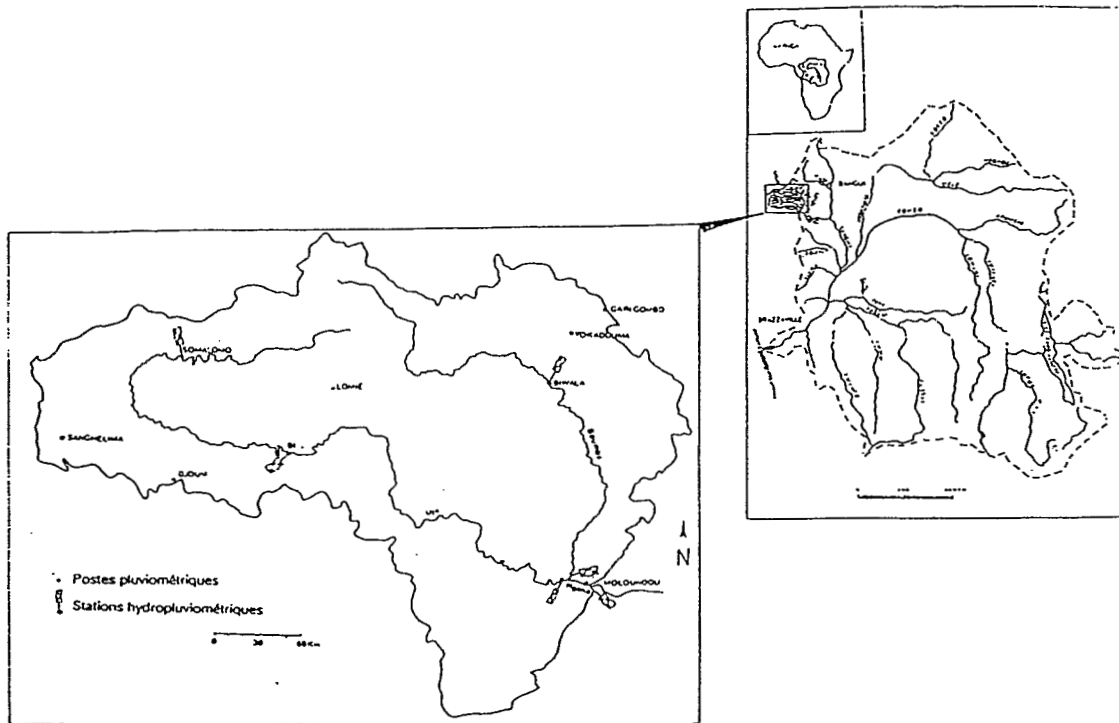


Figure 1

Situation du bassin versant de la Ngoko et localisation des sites d'échantillonnage.

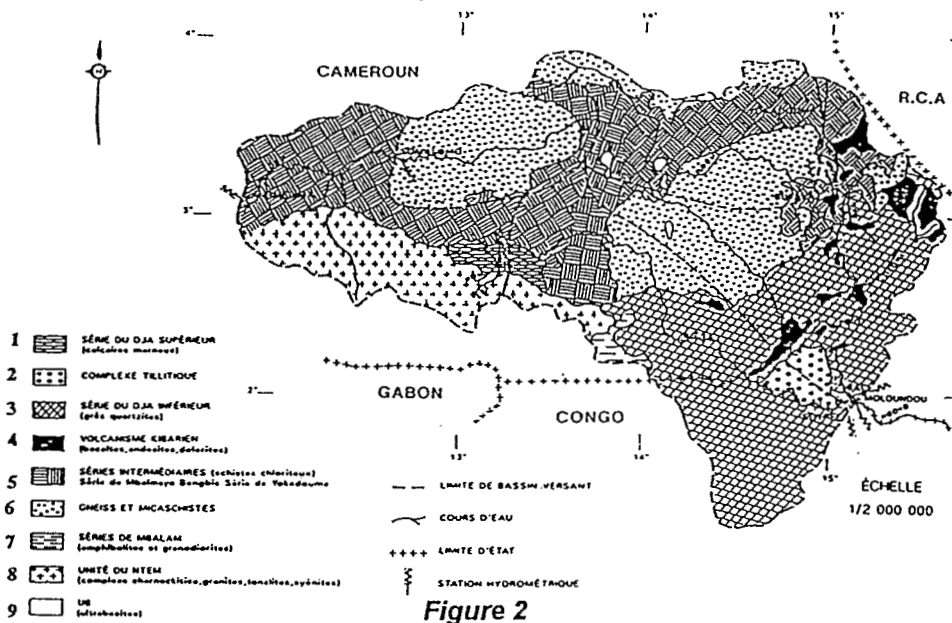


Figure 2

Unités lithologiques par sous-bassins versants, selon Anonyme (1987), modifié.

Les hauteurs d'eau sont enregistrés en continu au moyen d'un limnigraphe installé à l'exutoire du bassin principal, et au moyen d'échelles de crue implantées sur les stations secondaires (Moloundou-Bac et Biwala sur la Boumba, Moloundou-Sotref, Bi et Somalomo sur le Dja). Les prélèvements pour l'évaluation des flux en suspension sont effectués chaque semaine aux différentes stations. Périodiquement, un échantillonnage complet de matière en suspension est réalisé en 3 points sur 5 verticales, simultanément avec un jaugeage liquide (mesure des vitesses de courants). La corrélation entre la concentration moyenne obtenue lors d'un jaugeage complet et celle mesurée sur un seul échantillon pris au milieu du cours d'eau au même moment permet de corriger les concentrations obtenues lors des prélèvements hebdomadaires (Sigha Nkamdjou, 1993).

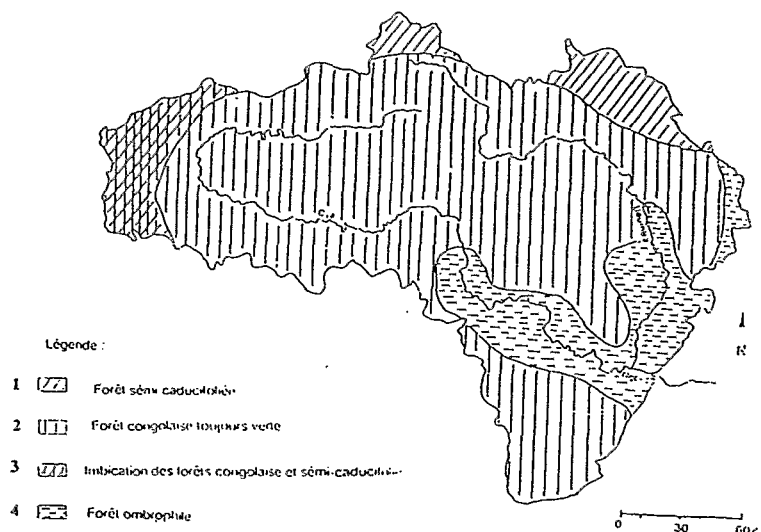


Figure 3

Végétation du bassin versant de la Ngoko. 1 : forêt semi-caducifoliée ; 2 : forêt congolaise sempervirente ; 3 : imbrication des forêts congolaise et semi-caducifoliée ; 4 : forêt ombrophile.

Les échantillons sont filtrés à 0,45 μm et pesés après séchage à 105 °C. Les prélèvements d'eau pour l'analyse chimique (1 litre) sont prélevés à la main dans des flacons en polyéthylène préalablement lavés et rincés. Les échantillons sont filtrés le jour du prélèvement sur filtre Millipore 0,45 μm pour les majeurs et sur filtre GFF pour le carbone organique particulaire (COP) et conservés à l'abri de la lumière jusqu'à l'analyse. L'aliquote correspondant à l'analyse du carbone organique dissous (COD) est conservé en ampoule scellée en présence de chlorure mercurique. La température, le pH, la conductivité et l'alcalinité sont mesurées sur le terrain.

Les minéraux ont été déterminés par diffractométrie X sur des échantillons de MES et l'analyse chimique a été effectuée par spectrométrie de fluorescence X directement sur poudre séchée et broyée provenant des culots de centrifugation.

Les éléments majeurs des échantillons de pluie et de rivière ont été dosés par spectrométrie d'émission de flamme (Ca, Mg), par spectrométrie d'absorption atomique (Na, K), par chromatographie ionique (Cl, SO₄, NO₃) et par spectrométrie d'émission de plasma (SiO₂). Les limites de détection sont inférieures à 5 μM pour l'ensemble des ions et à 2 μM pour la silice. Les reproductibilités sont comprises entre 1 et 5 %. Les mesures du carbone organique ont été réalisées par combustion à haute température dans un four après décarbonatation (CAUWET, 1975).

Les données d'analyses dont les taux de balance ionique sont supérieures à 10% ont été écartées (SCHOELLER, 1962). Pour l'ensemble des échantillons (plus de 400) la moyenne de la déviation standard des taux de balance ionique est de $\pm 5\%$.

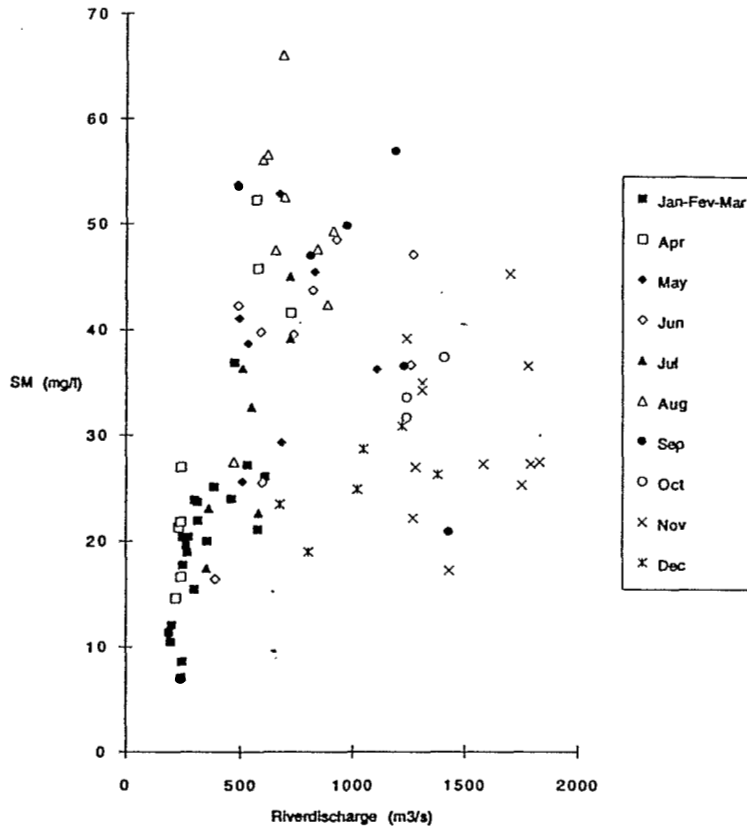


Figure 4

Evolution des matières en suspension (MES en $mg.l^{-1}$) en fonction du débit de la Ngoko à Moloundou.

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1. REGIMES ET BILANS HYDROLOGIQUES

Le tableau 1 donne les précipitations moyennes annuelles et interannuelles sur le bassin et les sous-bassins versants de la Ngoko. A l'échelle interannuelle (1950-1991), elles varient entre 1385 mm sur la Boumba à Moloundou-Bac et 1710 mm sur le Dja à Bi. Elle est de 1510 mm sur la Ngoko à Moloundou. Pour les trois cycles étudiés, en moyenne elles sont comprises entre 1365 mm sur la Boumba au Bac de Moloundou et 1695 mm sur le Dja à Somalomo. La moyenne à Moloundou sur la Ngoko est de 1470 mm. A l'échelle spatiale, la Boumba à Moloundou-Bac enregistre une pluviométrie plus faible que celle des autres bassins, en raison sans doute de la succession de collines, orientées nord-sud en aval de Biwala, qui constitueraient une "barrière orographique" à l'avancée de la mousson du Golfe de Guinée vers l'axe Yokadouma-Moloundou au sud-est du bassin (SIGHA NKAMDJOU, 1993).

D'un point de vue hydrologique, la réponse du bassin aux précipitations indique dans l'ensemble de faibles écoulements. En effet, ramenés à l'unité de surface, les modules (tableau 2) sont compris entre 10,4 $l.s^{-1}.km^{-2}$ (Boumba à Biwala) et 12,1 $l.s^{-1}.km^{-2}$ (Dja à Somalomo) pour les stations d'observations de longue durée. Pour les trois cycles étudiés, en moyenne, ils varient entre 10,7 $l.s^{-1}.km^{-2}$ (Boumba à Moloundou-Bac) et 13,3 $l.s^{-1}.km^{-2}$ (Dja à Bi). A la station principale (Moloundou sur la Ngoko) le module est de 11,3 $l.s^{-2}.km^{-2}$.

Le bilan hydrologique (tableau 3) fait ressortir des lames écoulées interannuelles variant entre 325 mm sur la Boumba à Biwala et 380 mm sur le Dja à Somalomo. Le déficit d'écoulement est du même ordre de grandeur sur les deux bassins (80 et 77 %). Pour les trois années d'observations, en moyenne, elles varient entre 340 mm (Boumba à Moloundou-Bac) et 425 mm (Dja à Bi) soit un déficit d'écoulement de 75 % sur les deux bassins. D'après les observations isotopiques, il serait essentiellement dû à l'évapotranspiration, et on peut conclure que les pertes par infiltration profonde dans le bassin sont négligeables (SIGHA NKAMDJOU, 1993).

Tableau 1
Pluviométrie moyenne annuelle (1989-1992) et interannuelle (1950-1991) par bassin versant en mm

C. D'EAU	STATIONS	1989/1990	1990/1991	1991/1992	1989/1992	Moyenne interannuelle
Boumba	Biwala	1685	1705	1530	1640	1640
Boumba	Moloundou-Bac	1350	1390	1365	1365	1385
Dja	Somalomo	1705	1545	1840	1695	1660
Dja	Bi	1705	1620	1690	1675	1710
Dja	Moloundou-SOTREF	1605	1610	1520	1580	1635
Ngoko	Moloundou	1480	1500	1440	1470	1510

Tableau 2
Modules des cycles hydrologiques 1989/90, 1990/91 et 1991/92 entre parenthèses : modules interannuels de l'origine des observations à 1992.

Q : débit annuel en $m^3.s^{-1}$; q : débit spécifique en $l.s^{-1}.km^{-2}$; mc : moyen de 1989 à 1992 ; ia : interannuel ; * : cette étude ; ** : Olivry (1986) ; () : débit estimé.

Cours d'eau	Station	1989/90		1990/91		1991/92		1989/92		Modules interannuels			
		Q	q	Q	q	Q	q	Qmc	qmc	Qi	Qia*	Qia**	Qia**
Boumba	Biwala	110	10,7	114	11,1	139	13,5	121	11,7	106	10,4	108	10,1
Boumba	Moloundou-Bac	288	10,5	294	10,8	283	10,7	291	10,7			285	(10,4)
Dja	Somalomo	81,7	14,9	70,7	12,9	66,8	12,2	73,1	13,4	66,1	12,1	66	12,3
Dja	Bi	(290)	(14,2)	(257)	(13,2)	231	11,8	259	13,3	221	11,3	220	11,3
Dja	Moloundou-SOTREF	451	11,4	488	12,3	457	11,5	465	11,7			(428)	(10,3)
Ngoko	Moloundou	734	10,9	780	11,8	756	11,3	757	11,3			(713)	(10,5)

Tableau 3
Bilans hydrologiques. P : pluviométrie moyenne sur le bassin versant ; Ve : volume écoulé en km^3 ; Le : lame d'eau écoulée en mm ; De : déficit d'écoulement en mm ; Ke : coefficient d'écoulement en % ; moyenne interannuelle de l'origine des observations à 1992.

C. D'EAU	STATIONS	1989/1990					1990/1991					1991/1992					1989/1992					Moyenne interannuelle					
		P	Ve	Le	De	Ke	P	Ve	Le	De	Ke	P	Ve	Le	De	Ke	P	Ve	Le	De	Ke	P	Ve	Le	De	Ke	
Boumba	Biwala	1685	3,47	340	1345	20,2	1705	3,6	350	1355	20,5	1530	4,38	425	1105	27,8	1640	3,82	370	1270	22,6	1640	3,34	325	1315	19,8	
Boumba	Mol-Bac	1350	9,02	330	1020	24,4	1390	9,27	340	1050	24,5	1365	9,24	340	1025	24,9	1365	9,18	340	1025	24,9	1385					
Dja	Somalomo	1705	2,58	475	1230	27,9	1545	2,23	410	1135	26,5	1840	2,11	385	1455	20,9	1695	2,31	425	1270	25,0	1660	2,08	380	1280	22,9	
Dja	Bi	1705	9,15	470	1235	27,6	1620	8,1	415	1205	25,6	1690	7,28	375	1315	22,2	1675	8,17	420	1255	25,1	1710	6,97	360	1350	21,1	
Dja	Mol-SOTREF	1605	14,2	360	1245	22,4	1610	15,4	390	1220	24,2	1520	14,4	365	1155	24,0	1580	14,7	370	1210	23,4	1635					
Ngoko	Moloundou	1480	23,1	345	1135	23,3	1500	24,6	370	1130	24,7	1440	23,8	355	1085	24,7	1470	23,9	360	1110	24,5	1510					

Tableau 4

Transport particulaire sur le Dja, la Boumba et la Ngoko. C : concentrations de MES en mg.l^{-1} ; Fp : flux particulaires en 10^3 t ; TSP : transport spécifique particulaire en $\text{t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$.

Année	Dja			Mol.- SOTREF Boumba (Mol.-BAC)			Moy Dja-Boumba			Ngoko (Moloundou)		
	C	Fp	TSP	C	Fp	TSP	C	Fp	TSP	C	Fp	TSP
1989/90	23,4	333	8,4	24,4	221	8,1	23,9	277	8,2	23	543	8
1990/91	37,4	458	11,8	33,7	313	11,5	35,6	386	12,7	34,7	853	11,5
1991/92	39,8	574	14,4	38,1	353	12,9	39	464	13,7	42,2	940	13,9
Moyenne	33,5	455	11,5	32,1	296	10,8	32,8	376	11,2	33,3	779	11,5

Tableau 5

Ngoko à Moloundou : caractéristiques granulométriques des matières en suspension en %.
R : taille des éléments.

Période	date	Argilles	Limons fins	Limons grossiers	Sabls
		$0 < 2\mu$	$2 < 20\mu$	$20 < 50\mu$	$0 > 50\mu$
		%	%	%	%
Etiage secondaire	12/07/90	84,8	9,9	3,9	1,5
Décru principale	31/01/91	78,7	15,7	3,9	1,6
Etiage principale	18/03/91	78,8	16,3	3,5	1,5
Crue secondaire	7/06/91	83,8	10,9	3,9	1,4
Crue principale	5/10/91	82,5	14,7	1,0	1,8
Crue principale	7/11/91	73,2	19,5	4,9	2,4

Tableau 6

Ngoko à Moloundou : composition chimique des MES, comparée à celle de quelques cours d'eau africains et à la moyenne mondiale (en % d'oxydes).

Fleuve	Ngoko	Sénégal	Niger	Chari	Oubangui	Congo	Monde
Ref.	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
SiO ₂	45,8	50,2	60,4	44,1	45,3	50,7	60,1
Al ₂ O ₃	32,3	24,0	26,3	28,6	27,9	30,0	17,0
Fe ₂ O ₃	16,1	9,7	7,8	8,5	21,9	13,6	7,4
TiO ₂	0,24	0,9	0,6	1,3	1,45	0,8	1
MgO	2,23	1,22	1,7	0,46	0,53	1,2	1,8
K ₂ O	0,22	1,72	1,10	0,94	1,23	1,10	2,50
CaO	0,62	0,25	0,50	0,20	0,41	0,80	3,43
Na ₂ O	1,22	0,20	-	0,22	0,21	-	0,96
MnO	1,31	0,04	0,08	0,05	0,23	0,15	0,13
P ₂ O ₅	0,33	-	0,7	-	0,69	0,48	-
CO ₂	6,9	1,2	2,2	-	3,7	6,7	1,0

(1) cette étude; (2) GAC et KANE, 1986; (3) MARTINS et PROBST, 1990; (4) GAC, 1980; (5) JOUANNEAU et al, 1990; (6) SHOLKOVITZ et al, 1978; (7) MARTIN et MEYBECK, 1979.

Tableau 7

Concentrations moyennes et extrêmes des éléments en solution dans les rivières étudiées (μM). CE : conductivité ($\mu\text{S.cm}^{-1}$) ; N : nombre d'échantillons ; Moy : moyenne ; Méd : médiane ; ET : écart-type ; Min : minimum ; Max : maximum ; MD : matières dissoutes.

	Cond.	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	Cl	SO ₄	NO ₃	NO ₂	TDS
	($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	μM	μM	μM	μM	μM	μM	μM	μM	μM	(mg.l^{-1})
Dja à Moloundou-Sotref (N=12)											
Moy.	35,8	67	53	43	19	234	34	11	11	210	34,7
Méd.	35,3	61	48	46	13	223	30	11	10	172	31
ET	8,86	20	17	23	13	81	15	3	7	145	13
Min.	2,4	48	38	13	3	139	8	6	3	68	20,3
Max.	50	105	92	91	46	410	59	16	28	543	62,4
Boumba à Moloundou-Bac (N=13)											
Moy.	52,2	136	107	58	27	497	37	10	13	223	56,9
Méd.	50	115	88	52	26	461	31	9	11	182	53,8
ET	10,5	55	51	28	12	157	13	2	5	137	17
Min.	40,6	75	63	22	10	300	25	8	8	95	36,6
Max.	75	240	242	109	51	800	70	18	27	650	91,9
Ngoko à Moloundou (N=19)											
Moy.	42,2	89	72	53	32	310	35	17	12	255	44,4
Méd.	43	85	63	52	31	280	31	13	10	205	35,5
ET	14,1	33	28	28	25	113	14	17	9	165	17,2
Min.	20	40	42	9 LD	130	20	6	3	78	25,3	
Max.	72,6	155	142	96	77	530	65	78	35	592	78,3

3.2. TRANSPORTS PARTICULAIRES

Sur le Dja, la Boumba et la Ngoko, les concentrations moyennes annuelles des matières en suspension (MES) sont comparables pour chaque cycle (tableau 4) La charge en suspension est maximum au début de la grande saison des pluies (Août), diminue au fur et à mesure que le débit augmente jusqu'à la fin de la saison des pluies (mi-novembre) et atteint un palier qui dure tout le long de la saison sèche (Fig. 4) A l'échelle interannuelle (1989-1992) les concentrations moyennes ont varié du simple (23 mg.l-1 en 1989/90) au double (40 mg.l-1 en 1991/92). La moyenne des trois cycles est de l'ordre de 33 mg.l-1.

Qualité chimique et minéralogique des matières en suspension

Au niveau granulométrique, la fraction argileuse est la plus abondante avec des proportions supérieures à 73 % des MES en toutes saisons. Les limons, au sein desquels prédomine la fraction fine, présentent des variations saisonnières (liées à la compétence du cours d'eau et donc au débit) et varient entre 1 et 20 %. La fraction sableuse est la plus faible (1 à 2,5 %) (tableau 5). Les proportions d'argiles transportées par la Ngoko (80% en moyenne) sont supérieures à celles des cours d'eau de régime tropical soudanien, tels que le Bandama (62 %) et la Gambie (60 % ; GAC et al, 1987), ou le Sénégal (65 % ; ORANGE, 1990). Ces résultats concordent avec la granulométrie très fine des matières en suspensions des rivières équatoriales qui drainent des sols particulièrement bien protégés contre l'érosion mécanique par leur couvert forestier

La composante argileuse associe la kaolinite (50%), l'illite (16 à 23%), les chlorites (10%), et une fraction de smectites et d'interstratifiées assez variable (7 à 24%). Les variations saisonnières sont très faibles (quelques %), sans doute en raison de la monolithologie du bassin et de l'uniformité des zones d'apports. La paragenèse kaolinite/illite/chlorite, tout à fait habituelle en milieu tropical, résulte de l'altération des sols ferrallitiques qui couvrent 80% du bassin versant de la Ngoko.

Les résultats de la composition chimique des suspensions de la Ngoko à Moloundou sont reportées dans le tableau 6 avec celles d'autres fleuves africains et de la moyenne mondiale. Ces concentrations soient toutes assez proches, à l'exception de celles du fer (et dans une moindre mesure, de celle du manganèse), qui sont 2 à 3 fois plus fortes dans les rivières équatoriales (Ngoko, Oubangui et Congo) que dans celles du domaine soudano-sahélien. Ce caractère souligne en fait l'appauvrissement en alcalino-terreux des sols du domaine tropical humide, traduisant le lessivage intensif auquel il sont soumis.

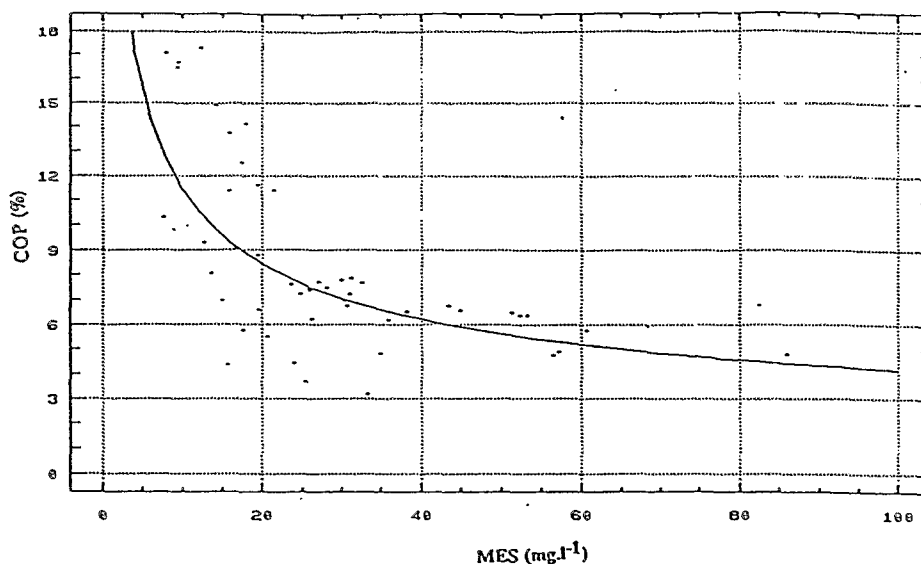


Figure 5
Evolution du COP (%) en fonction des MES (mg.l⁻¹).

Le carbone organique particulaire (COP) a été dosé pour l'essentiel sur des échantillons de l'exutoire des bassins (tab. 7). Comme dans de nombreux fleuves, les concentrations en COP (en %) sur la Ngoko (Fig. 5) tendent à diminuer lorsque la turbidité augmente, (COP = 32 / MES0,443 ; $r = -0,64$). Les fortes concentrations de matière organique s'observent en période d'étiage (saison sèche) au moment où l'érosion mécanique est la plus faible et où la production primaire des eaux est la plus importante. Cette observation traduit un phénomène de dilution de la charge en carbone organique particulaire par des suspensions peu organiques lors des crues. Les quantités de COP sont comparables dans le Dja, la Boumba et la Ngoko. En proportions pondérales moyennes des MES elles sont de 6,5%, 6,7% et 6,3%, pourcentages voisins de ceux obtenus par KINGA-MOUZEO (1986) et ceux cités par NKOUNKOU et PROBST (1987) sur le Congo à Brazzaville (7,1 et 6 % respectivement). A l'échelle régionale, les proportions de COP que nous avons mesurées sont supérieures à celles trouvées sur les rivières sahéliennes par ORANGE (1990) sur le Sénégal (1,2 %) et la Gambie (5,1 %).

Les flux de matières transportées en suspension

Les bilans mensuels et annuels des exportations en suspension ont été établis à partir de la formule suivante:

$F_p = \sum Ve_i \cdot Ci_i / Q_i$ avec: F_p : Flux de matière particulaire, mensuel ou annuel

Ci : Concentration de la semaine i

Q_i : Débit de la semaine i

Ve : Volume mensuel ou annuel écoulé.

Le tableau 4 regroupe les teneurs moyennes et les flux annuels ainsi que les transports spécifiques particuliers par bassin versant et par cycle hydrologique. Comme dans la plupart des rivières tropicales, le débit solide augmente très rapidement avec le débit liquide. Ainsi 25% des matières en suspension sont exportées en 60 jours (Fig. 6).

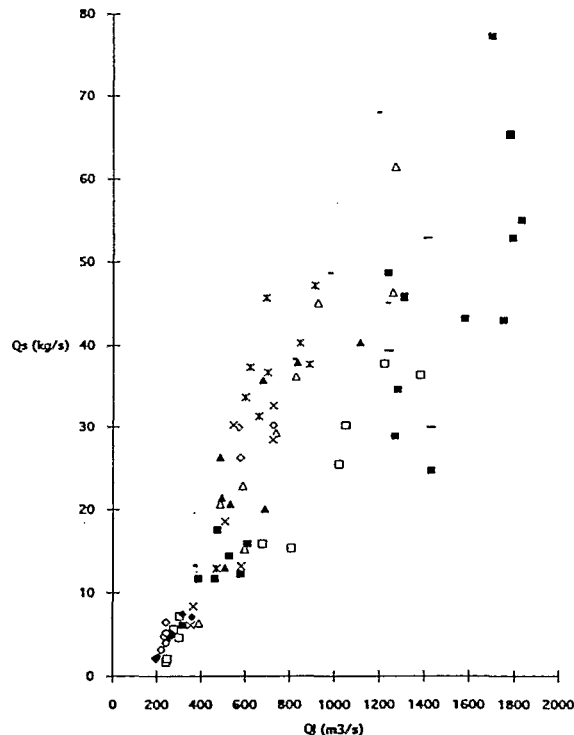


Figure 6

Evolution du transport solide en fonction des débits de la Ngoko à Moloundou

En terme de dégradation spécifique, les exportations de matières particulaires varient entre 8 t.km² an⁻¹ en 1989/90 et 14 t.km².an⁻¹ en 1991/92. Il est difficile de dire actuellement si cette augmentation est due dans la variabilité naturelle du système ou si elle est significative d'une influence anthropique. Dans ce dernier cas elle serait due à une progression des surfaces d'exploitation forestière, bien que nous n'ayons pas pu la mettre en évidence au moyen des statistiques officielles.

Pour les 3 années de mesure, la moyenne des exportations solides est de 11,5 t.km².an⁻¹ sur la Ngoko à Moloundou, chiffre en accord avec la moyenne calculée pour de ses deux affluents (11,2 t.km².an⁻¹). Cette valeur est inférieure à celle mesurée par BOUM et al (1983) sur le Ntem (13,2 t.km².an⁻¹) et à celle mesurée sur le Nyong (9 t.km².an⁻¹, OLIVRY, 1977), bassins voisins de la Ngoko et drainant une couverture forestière plus dégradée (LETOUZEY, 1968). A l'échelle régionale, elle est comparable à celle observée par sur le Congo à Brazzaville en 1988 (10,5 t.km².an⁻¹, MOUKOLO et al, 1990). Cette similitude n'est pas surprenante dans la mesure où les 2 bassins présentent, en grande partie, une lithologie et une couverture végétale identique. Cela confirme la bonne représentativité du bassin de la Ngoko pour la zone tropicale humide africaine. Par ailleurs, nos résultats sont voisins de ceux trouvés par FRITSCH et SARRAILH (1986) sur parcelles non défrichées dans l'écosystème forestier tropical guyanais (en moyenne: 11 t.km².an⁻¹).

Sur la base d'une moyenne de 779 103 t an⁻¹ pour l'ensemble du bassin de la Ngoko et pour les 3 années hydrologiques étudiées, on obtient un flux de 358 103 t.an⁻¹ de silice particulière et la charge cationique exportée représente: Al₂O₃ (257 103 t.an⁻¹), Fe₂O₃ (125 103 t.an⁻¹), TiO₂ (17 103 t.an⁻¹), MgO (10 103 t.an⁻¹), K₂O (9 103 t.an⁻¹), CaO (5 103 t.an⁻¹), Na₂O (2 103 t.an⁻¹), MnO (2 103 t.an⁻¹), P₂O₅ (2 103 t.an⁻¹). Les exportations de carbone organique particulière s'élèvent à 46, 5 t.an⁻¹.

3.2. LES TRANSPORTS EN SOLUTION

La composition chimique des eaux du Dja, de la Boumba et de la Ngoko

Les caractéristiques physico-chimiques des eaux du Dja à la SOTREF, de la Boumba au Bac et de la Ngoko à Moloundou sont rassemblées dans le tableau 7. En moyenne, les trois cours d'eau ont des valeurs de pH proches de la neutralité (6,9 à 7,1). La conductivité électrique (CE), comprise entre 35 µS.cm⁻¹ (Dja) et 52 µS.cm⁻¹ (Boumba) indique des eaux faiblement minéralisées. Très classiquement, il existe une relation bien définie entre la conductivité mesurée (et corrigée en température) et la charge totale dissoute définie ici comme la somme des cations + anions + silice dissoute (Fig. 7).

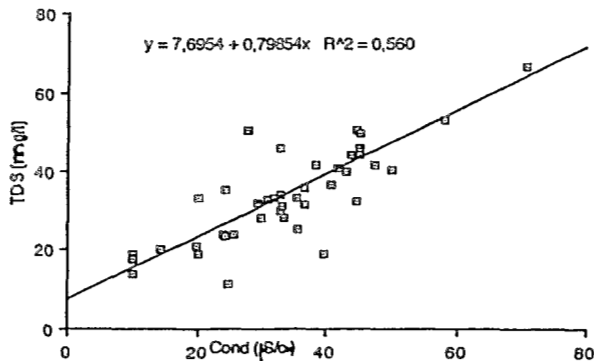


Figure 7

Evolution de la charge solide dissoute (cations+anions+silice dissoute) en fonction de la conductivité (µS.cm⁻¹).

Les eaux de la Boumba sont plus minéralisées que celles du Dja (57 contre 35 mg.l⁻¹), vraisemblablement en raison de la plus forte altérabilité du complexe andésito-doléritique drainé par les affluents de la Boumba (Bidjar, Bangué et Lokomo) en aval de Biwala (SIGHA NKAMDJOU, 1993). Les bicarbonates et le calcium sont les ions les plus abondants, avec,

dans l'ordre, des teneurs de 14 à 30 mg.l-1 et de 2,7 à 5,4 mg.l-1. Les bicarbonates représentent 80% de la charge anionique. Les minima en HCO₃⁻ et Ca²⁺ sont observées sur le Dja et les maxima sur la Boumba. Du fait de leur enfouissement, les formations carbonatées de Mintom sur le Dja (Fig. 2) ne semblent pas participer à la charge carbonatée. Le reste des formations géologiques étant non carbonatées, on peut en déduire que l'essentiel (sinon la totalité) des bicarbonates provient du CO₂ atmosphérique. La silice, présente à des teneurs comparables sur les trois bassins (13 à 15 mg.l-1), est le second élément le plus abondant après les bicarbonates. Le Cl⁻ a des teneurs comparables dans les trois cours d'eau (1,2 à 1,3 mg.l-1). En proportions pondérales, les bicarbonates et la silice sont les éléments les plus abondants avec dans l'ordre 43 à 54 % et 21 à 33 %.

La moyenne des concentrations des matières dissoutes du Dja et de la Boumba (45,7 mg.l-1) est en accord avec la charge totale soluble de la Ngoko (44,4 mg.l-1). Cette similitude des bassins amont et aval de la Ngoko est également vérifiée au niveau du faciès géochimique qui est de type bicarbonaté calco-magnésien.

Comme pour le COP, les teneurs moyennes de COD sont voisines sur les trois bassins : 8,6 mg.l-1 (Dja), 10,9 mg.l-1 (Boumba) et 9,4 mg.l-1 (Ngoko). Ces concentrations sont 1,5 à 2 fois supérieures à la moyenne des fleuves de la ceinture tropicale humide (6 mg.l-1) et à la moyenne mondiale (5 mg.l-1, MEYBECK, 1984).

Les variations de la composition chimique et l'origine des éléments

Dans les rivières étudiées, comme dans de nombreux fleuves, la conductivité et la concentration de la plupart des éléments diminuent alors que les débits augmentent. Cette variation, observée par de nombreux auteurs, est due au phénomène général de dilution des eaux souterraines plus concentrées en éléments dissous par des eaux de surface moins chargées. (LIVINGSTONE, 1963, KENNEDY et MALCOLM, 1977; BUCKLEY, 1977; MILLER et DREVER, 1977; FOSTER, 1978; FELLER et KIMMINS, 1979).

Pour les rivières Boumba, Dja et Ngoko, on peut distinguer schématiquement 3 types de comportement en fonction du débit:

i) Le calcium, le magnésium, les bicarbonates et la charge solide dissoute (TDS) présentent une relation de type logarithmique ($C = a \log Q + b$), avec des coefficients de corrélation souvent significatifs, ce qui signifie qu'il y a bien dilution des eaux phréatiques par les eaux superficielles. En fait ces relations ne s'appliquent sans doute pas aux débits extrêmes. En étiage, les concentrations tendent vers celles des nappes et en crue, elle se rapprochent des eaux du ruissellement (Fig. 8a).

ii) Le sodium, le potassium, les chlorures et les sulfates ne sont pas significativement corrélés aux débits, bien que les concentrations les plus élevées soient associées aux faibles débits (Fig. 8b). A l'exception des chlorures, tous ces éléments peuvent avoir plusieurs origines: atmosphérique, végétale ou lithosphérique. Sachant qu'il n'existe pas, d'après les cartes géologiques (ANONYME, 1987), de dépôts évaporitiques dans ces bassins, on en déduit que la totalité des chlorures provient du réservoir atmosphérique. Les précipitations apportent également une partie du sodium et des sulfates, mais aucune relation satisfaisante entre Na⁺ et Cl⁻, et SO₄²⁻ et Cl⁻ n'a été obtenue. Le rapport Na/Cl est maximum en période d'étiage (1,16 en moyenne) et décroît lorsque le débit augmente (minimum 0,64). Ces résultats suggèrent que Na⁺ et SO₄²⁻ ont chacun une double origine: - atmosphérique et lithosphérique pour Na⁺, - atmosphérique et végétale pour les SO₄²⁻. KENNEDY et MALCOM (1977) ont montré qu'une partie de la charge en sulfates de la Mantole River (Californie) provenait de la dégradation de la matière organique des sols du bassin versant. Comme dans d'autres rivières (FELLER et KIMMINS, 1979), le potassium ne montre pas de relation stricte avec les débits. Son origine est également double: altération des minéraux alcalins mais aussi dégradation de la matière organique d'origine végétale (JOHNSON et al., 1969; BORMAN et al., 1969).

iii) Un troisième type de comportement élémentaire concerne les nitrates, le carbone organique dissous et la silice dissoute. (Fig. 8c). Pour les nitrates, les concentrations augmentent linéairement et corrélativement avec les débits. Pour le COD et la silice dissoute il n'y a pas de gradient marqué. Ce type de comportement est caractéristique des éléments dont le cycle géochimique est en partie gouverné par les processus biologiques. Leur recyclage, à partir du lessivage de la litière forestière conduit à un enrichissement des eaux de l'écoulement superficiel et hypodermique par rapport aux eaux souterraines (CLEAVES et al, 1970;

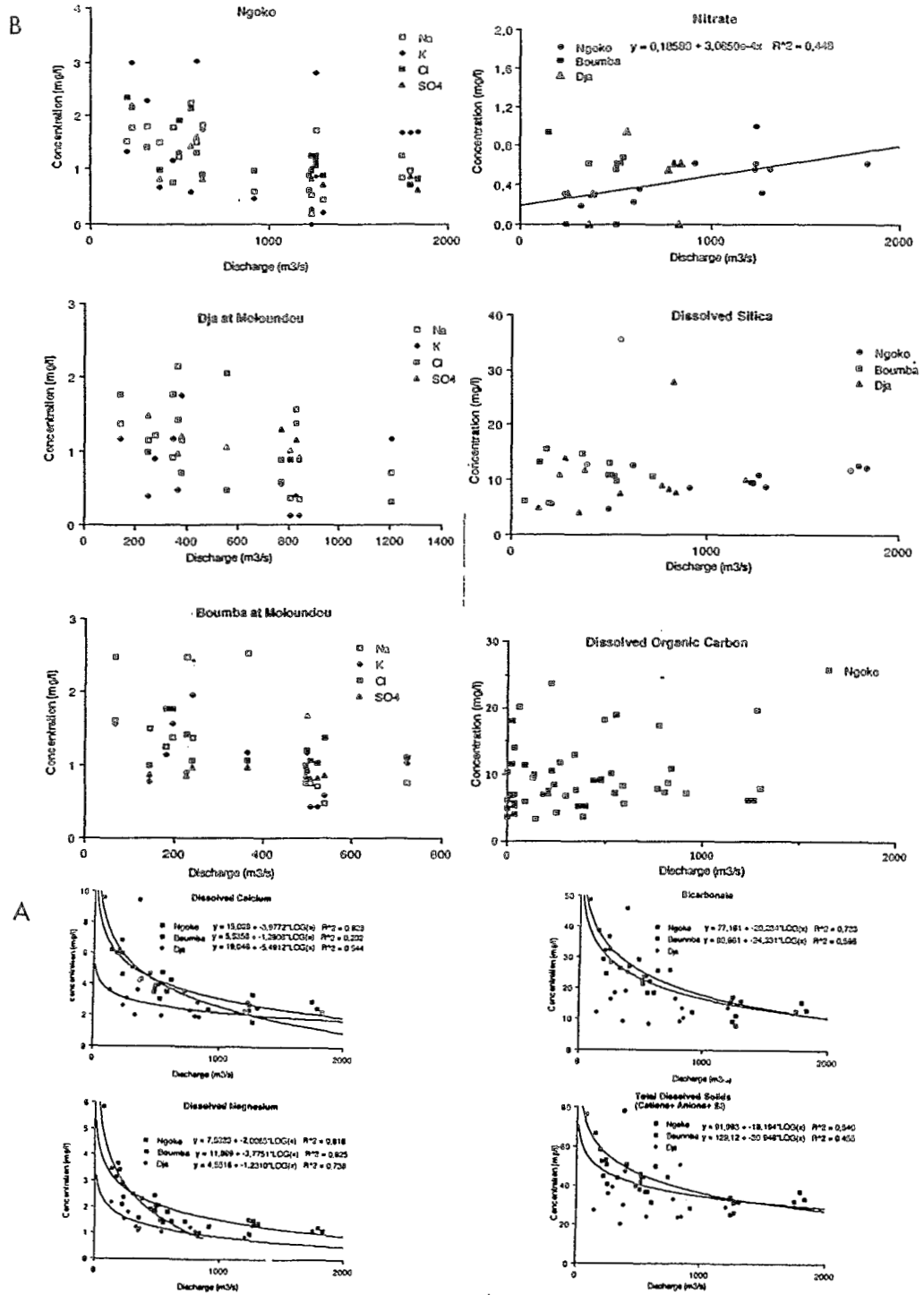


Figure 8

Evolution des concentrations chimiques en fonction des débits dans les rivières étudiées.

a : Ca, Mg, HCO₃, TDS

b : Na, K, Cl, SO₄

c : NO₃, SiO₂, DOC

LEWIS et GRANT, 1979). De plus, des processus internes au milieu aquatique (production algale, mise en solution à partir des MES) peuvent expliquer pro parte les variations rapides de concentrations de ces éléments (MEYBECK, 1983).

Les apports atmosphériques en solution

Les données d'analyses physico-chimiques et leurs coefficients de variation pour chacun des sites de prélèvements sont reportés dans le tableau 8. On a considéré que le pH et la teneur en K⁺ étaient de bon indice de "non contamination" des échantillons. Quand l'un ou l'autre était anormal, les données correspondantes ont été écartées. Les concentrations moyennes en éléments ne montrent pas de différence significative d'un site à l'autre, à l'exception de la station de Djoum qui présente des teneurs élevées pour tous les éléments. Cette station, appartenant au réseau météorologique national, est installée près d'une piste importante et il est vraisemblable que le pluviomètre subit l'influence des poussières dues au trafic routier, et les résultats acquis sur ce site de prélèvement ne seront pas pris en compte dans le bilan des apports météoriques.

A l'exception de cette station, le pH moyen varie de 5,37 à 6,89, valeurs habituelles pour les précipitations tropicales (FORTI et NEAL, 1992). Les concentrations moyennes des éléments sont généralement inférieures à celles trouvées dans les régions tempérées, et proches de celles obtenues dans les régions équatoriales (GALLOWAY et al, 1982; STALLARD et EDMOND, 1981; ANDREAEE et al, 1990; LACAUX et al, 1992; NEGREL, 1991).

Tableau 8

Concentrations moyennes en éléments dissous des précipitations (μm). ET : écart-type.

STATION		Ca	Mg	Na	K	Cl	SO ₄	NO ₃	SiO ₂	TDS
		μM	μM	μM	μM	μM	μM	μM	μM	mg l-1
MOLOUNDOU	MOYENNE	5	9	14	5	15	6	5	4	2,29
	ECART TYPE	3	6	13	3	8	4	0	19	2,57
YOKADOUMA	MOYENNE	8	5	19	5	12	9	5	10	3,14
	ECART TYPE	3	3	3	3	1	4	7	2	2,59
BIWALA	MOYENNE	5	10	7	5	12	9	7	2	2,59
	ECART TYPE	3	3	3	3	1	4	7	2	1,41
GARI GOMBO	MOYENNE	5	15	21	12	14	26	5	14	5,45
	ECART TYPE	4	5	0	9	1	5	0	0	1,14
BI	MOYENNE	6	10	6	5	14	10	5	6	2,76
	ECART TYPE	4	5	0	9	1	5	0	0	1,14
LOMIE	MOYENNE	5	10	21	5	7	22	ND	8	3,83
	ECART TYPE	0	5	21	2	5	15		7	2,7
SOMALOMO	MOYENNE	6	17	20	ND	12	15	10	5	3,89
	ECART TYPE	5	19	21		9	13	8	5	3,52
SANGMELIMA	MOYENNE	10	13	6	12	13	1	2	11	2,69
	ECART TYPE	168	11	285	24	29	74	172	951	134,46
DJOUM	MOYENNE	168	11	285	24	29	74	172	951	134,46
	ECART TYPE	120	3	238	16	9	70	120	491	48,29

3.3 LES BILANS DE TRANSFERTS

Les concentrations moyennes ont été pondérées par les débits dans le cas des éléments transportés par les eaux fluviales (tab. 9), et par les hauteurs de pluie en ce qui concerne les apports atmosphériques (tab. 10). Les flux des éléments atmosphériques ont été ensuite calculés pour chaque bassin versant au moyen de la méthode de THIESSEN (SEYLER et al, 1993). Concernant les transferts de substances dissoutes, il est plus élevé sur la Boumba (19,5 t.km⁻².an⁻¹) que sur le Dja (13,5 t.km⁻².an⁻¹), la moyenne sur les deux sous-bassins (16,5 t.km⁻².an⁻¹) étant voisine du bilan établi à Moloundou sur la Ngoko (17,5 t.km⁻².an⁻¹). La valeur supérieure du transport dissous de la Boumba par rapport à celle du Dja est, comme nous l'avons déjà indiqué, due aux apports des eaux plus fortement minéralisées des affluents de la Boumba (la Bidjar, de la Bangué et de la Lokomo), qui drainent une formation volcanique facilement altérable.

Les exportations de COD par unité de surface sont du même ordre de grandeur sur les deux sous-bassins : 3,1 t.km⁻².an⁻¹ (Dja) et 3,7 t.km⁻².an⁻¹ (Boumba). La moyenne de COD exporté par les deux cours d'eau (3,4 t.km⁻².an⁻¹) est égale à celle observée à Moloundou sur la Ngoko (3,3 t.km⁻².an⁻¹). A l'échelle continentale, le transport spécifique de COD de la Ngoko est largement supérieur à celui observé par MARTINS et PROBST (1990) sur le Niger à Lokoja (0,5 t.km⁻².an⁻¹) et sur l'Orange à Vioolsdrip (0,03 t.km⁻².an⁻¹), fleuves drainant un couvert végétal de type savane (Oubangui) et steppe (Orange). Le flux de COD

de la Ngoko est très comparable à celui du Congo à Brazzaville (3,07 t km² an⁻¹, d'après SEYLER et al, cet ouvrage), de l'Amazonie à Obidos, (3,1 t km² an⁻¹, PROBST et al, 1993), ce qui confirme la représentativité bioclimatique du bassin versant de la Ngoko. La moyenne des transports spécifiques de carbone organique total (COT) exporté par la Ngoko est de 4 t.km².an⁻¹. Le bilan total de matières (minéral dissous + organique dissous + particulaire) exportées à Moloundou est évalué à 32 t.km².an⁻¹, dont 64% à l'état dissous. Le chlore, le carbone organique et inorganique et les alcalins sont essentiellement transportés sous forme dissoute (Fig. 9).

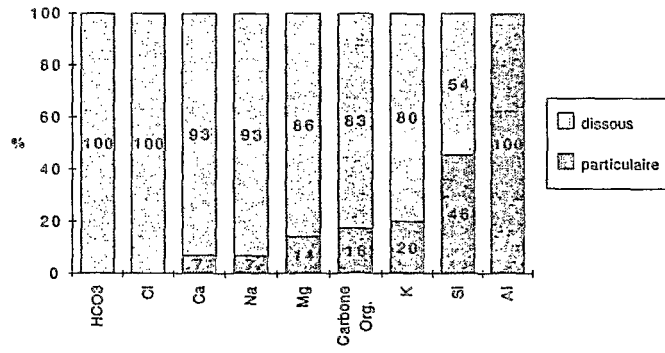


Figure 9
Importance relative des transports dissous et particulaire

L'examen du bilan des apports atmosphériques dissous montre que les sulfates représentent le flux entrant le plus important. De nombreux auteurs (GALLOWAY et al, 1982, DELMAS et SERVANT, 1983; CLAIRAC et al, 1988; LACAUX et al, 1992) citent, pour les zones forestières tropicales des apports météoriques en sulfates compris entre 0,6 et 2,5 t km² an⁻¹. Si l'on considère que le flux calculé ici (1,2 t km² an⁻¹) est représentatif de la zone étudiée, le gain net pour l'écosystème est de 0,63 t km² an⁻¹. En fait ce terme n'est interprétable que si l'on prend parallèlement en considération le flux sortant par l'aérosol forestier. Selon DELMAS et SERVANT (1983), ce flux serait compris entre 4 et 5 t.km².an⁻¹ (pour la zone forestière du sud de Côte d'Ivoire, très semblable à celle de la Ngoko), ce qui signifie que le flux net en sulfates est négatif et que la ceinture forestière équatoriale joue bien le rôle de source de sulfates qu'on lui attribue.

Tableau 9
Débits spécifiques (l.s⁻¹.km⁻²) et flux dissous exportés (t.km⁻².an⁻¹) par les rivières étudiées.

RIVIERE	STATION	q	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO ₄	NO ₃	SiO ₂	TDS
		l.s ⁻¹ .km ⁻²									
DJA	SOMALOMO	13,4	0,60	0,27	0,35	0,21	0,50	0,26	0,15	4,82	10,04
DJA	BI	13,3	0,59	0,20	0,32	0,47	0,24	0,22	0,07	3,56	8,80
DJA	MOLOUNDOU-SOTREF	11,7	1,01	0,47	0,37	0,27	0,45	0,42	0,28	4,64	13,00
	SD		0,20	0,15	0,20	0,10	0,20	0,07	0,14	3,29	4,86
BOMBA	BIWALA	11,7	0,87	0,48	0,50	0,34	0,55	0,24	0,68	4,85	13,28
	SD		0,33	0,09	0,21	0,15	0,20	0,10	1,08	3,79	6,03
BOMBA	MOLOUNDOU-BAC	10,7	1,83	0,85	0,43	0,35	0,44	0,33	0,21	4,50	18,84
	SD		0,75	0,42	0,22	0,16	0,16	0,09	0,17	3,02	6,02
NGOKO	MOLOUNDOU	11,3	1,27	0,62	0,43	0,47	0,45	0,61	0,26	4,74	14,36
	SD		0,47	0,24	0,21	0,33	0,18	0,65	0,21	3,30	5,00

Pour le chlore, le sodium et les nitrates le bilan est équilibré, ce qui semble indiqué qu'il est géochimiquement cohérent. L'atmosphère apparaît la source essentielle pour le chlore, majeure pour les nitrates (92%) et le sodium (86%). Le magnésium et le potassium

proviennent à part égale des réservoirs atmosphérique et lithosphérique. Le calcium et la silice dissoute ont une origine essentiellement terrigène (Tab. 11).

Tableau 10

Lames précipitées (mm) et flux dissous entrant ($t.km^{-2}.an^{-1}$) par les précipitations sur les bassins versants.

BASSIN VERSANT	LAME PRECIPITEE (mm)	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	NO3	SiO2
BOUMBA A MOLOUNDOU	1365	0,38	0,14	0,51	0,15	0,50	1,02	0,23	0,73
BOUMBA A BIWALA	1640	0,22	0,27	0,18	0,19	0,50	1,02	0,51	0,13
BOUMBA A MOLOUNDOU	1365	0,38	0,14	0,51	0,15	0,50	1,02	0,23	0,73
DJA A SOMALOMO	1695	0,27	0,48	0,53	-	0,49	1,69	0,71	0,37
DJA A BI	1675	0,29	0,29	0,16	0,22	0,56	1,13	0,16	0,42
DJA A MOLOUNDOU	1580	0,19	0,25	0,37	0,18	0,59	0,68	0,13	0,29
NGOKO A MOLOUNDOU	1470	0,26	0,29	0,37	0,19	0,49	1,24	0,24	0,4

Tableau 11

Bilans de transferts ($t.km^{-2}.an^{-1}$) des éléments dans le bassin de la Ngoko.

		Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	NO3	SiO2
FLUX ENTRANT		0,26	0,29	0,37	0,19	0,49	1,24	0,24	0,43
FLUX SORTANT		1,27	0,62	0,43	0,47	0,45	0,61	0,26	4,74
PERTE		1,01	0,36	0,06	0,28			0,02	4,31
GAIN						0,04	0,63		
SOURCES	ATMOSPHERIQUE (%)	20	46	86	40	108	203	92	9
	TERRIGENE (%)	80	54	14	60	0	0	8	91

Ainsi, après correction des apports atmosphériques, le taux d'altération des roches sur l'ensemble du bassin est évalué à $8,5 (\pm 1,5) t.km^{-2}.an^{-1}$ sur la Ngoko à Moloundou. Cette valeur est à comparer avec celles des taux d'érosion mécanique calculés plus haut (entre 8,0 et 14 $t.km^{-2}.an^{-1}$). Il faut souligner que ces dernières valeurs ne tiennent pas compte de la part due aux phénomènes d'érosion des berges (entre 5 et 10% en zone forestière, d'après ROBINSON, 1977 et EMMET, 1981).

4. CONCLUSION

Le bassin de la Ngoko constitue, en raison de ses caractéristiques environnementales (végétation dense ombrophile, faible anthropisation), un modèle expérimental pertinent pour étudier les mécanismes hydrologiques et géochimiques en région équatoriale humide. Le bilan hydrique, la qualité chimique des précipitations et des eaux d'écoulement, les transferts de matières sous forme dissoute et particulaire sont largement affectés par ce type de couverture forestière. Ceci est souligné par les fortes concentrations en sulfates mesurées dans les pluies ou encore par la récente augmentation du flux particulaire qui traduit sans doute et de manière quasi instantanée les effets du défrichement. D'une manière générale, les faibles valeurs mesurées pour les transports dissous et particulaire sont une des caractéristiques de cet environnement. Si on fait l'hypothèse que l'écosystème forestier du bassin de la Ngoko est en équilibre avec les conditions climatiques actuelles, on peut calculer un taux d'approfondissement des sols de l'ensemble du bassin compris entre 2,6 et 3,7 mm pour 103 ans (densité moyenne des roches = 2,65). De même, le taux d'érosion des sols par ablation mécanique serait compris entre 4 et 7 mm pour 10-3 ans (densité moyenne des latérites = 2,0). En raison des incertitudes sur certaines valeurs (transport de fond, taux d'érosion des berges, densité des sols) ces résultats doivent être considérés avec précaution.

REMERCIEMENTS :

Ce travail a été financé dans le cadre du programme PEGI (ORSTOM-INSU) et réalisé par l'IRGM/CRH et l'ORSTOM au Cameroun. Nous remercions F. SONDAG et M. DELAUNE du Laboratoire des Formations Superficielles de l'Orstom-Bondy pour les analyses chimiques et granulométriques ainsi que J.M. JOUANNEAU et H. ETCHEBER du Département de Géologie et d'Océanographie de Bordeaux I (URA CNRS 197) pour les analyses chimiques des suspensions et la détermination des concentrations de carbone organique.

REFERENCES

- ANDREAE, M. O., TALBOT, R. W., BERRESHEIM, H., BEECHER, K. (1990). Precipitation chemistry in Central Amazonia. *J. of Geophys. Res.* 95, p. 16987-17000.
- ANONYME (1987). Recherches Minières dans le Sud-Est du Cameroun. *Rap. de synth. final*, PNUD Yaoundé, 102 p.
- BORMAN, F. H., LIKENS, G. E., EATON, J. S. (1969) Biotic regulation of particulate and solution losses from a forested ecosystem. *Bioscience* 19, p. 600-610.
- BOUM J.P., SIGHA N., AYISSI G. (1983). Etudes hydrologiques du Ntem aux chutes de Menvé'ele. *Rap. Synth. 1980/1983, IRGM/DGRST* Yaoundé, 75 p.
- BUCKLEY, R. T. (1977) Chemical dynamics in a Tasmanian river. *Austral J. Mar. Freshwater Res.* 28, p. 261-268.
- CAUWET G. (1975). Optimisation d'une technique de dosage du carbone organique des sédiments. *Chemical Geology*, 16, p. 59-63.
- CLEAVES, E. T., GODFREY, A. E., BRICKER O. P. (1970) Geochemical balance of a small watershed and its geomorphic implications. *Geol. Soc. Am. Bull.* 81, p. 3015-3032.
- DERONDE L., SYMOENS J.J. (1980). L'exportation des éléments dominants du bassin du fleuve Zaïre: une réévaluation. *Ann. Limnol.*, 16 (2), p. 183-188.
- EMMETT, W.W. (1981). Measurement of bed load in rivers; In: Erosion and sediment transport measurement, *Proceedings of the Florence symposium, IAHS*, 133, p. 3-15.
- FELLER, M. C., KIMMINS, J. P. (1979) Chemical characteristics of small streams near Haney in south western British Columbia. *Wat. Resour. Res.* 15 (2), p. 247-258.
- FORTI M. C., NEAL C. (1992). Hydrochemical cycles in tropical rainforests: an overview with emphasis on central Amazonia. *J. of Hydrol.*, t. 134, p. 103-115.
- FOSTER I. D. L. (1978) A multivariate model of storm-period solute behaviour. *J. Hydrol.* 39, p. 339-353.
- FRITSCH J. M., SARRAILH J. M. (1986). Les transports solides de l'écosystème forestier tropical humide guyanais: effets du défrichement et de l'aménagement des pâturages. *Cah. ORSTOM, sér. pédo*, vol. XXII, N^o 2
- FURCH, K. (1984) Water chemistry of the Amazon. Distribution of the chemical elements among freshwaters. In: *The Amazon: Limnology and landscape ecology of a mighty tropical river and its basin* (ed. by H. Sioli), p. 167-200. Dr W. Jung Publishers, Dordrecht.
- GAC J.Y, BOUCHEZ J.M., BAMBA B.S., CARN M., ORANGE D. et DUVERT P. (1987). Géochimie des eaux du Fouta-Djalou, flux dissous et particulaire en Haute Gambie (Kédougou et Gouloumbou). *Mono. ORSTOM*, Paris, 102 p.
- GALLOWAY, J. N., LIKENS, G. E., KEENE, W. C., MILLER, J. M. (1982) The composition of precipitation in remote areas of the world. *J. Geophys. Res.* 87, p. 8771-8786.
- GIBBS R. J. (1967). The geochemistry of the Amazon river system, part 1. The factors that control the salinity and the concentrations of suspended solids. *Geol. Soc. of Am., Bull.* 78, p. 1203-1232.

- GIBBS R. J. (1972). Water chemistry of the Amazon river. *Geochim. and Cosmochim. Acta*, Vol. 36, p. 1061-1066.
- GIBBS, R. J. (1977) Transport phases of transition metals in the Amazon river and the Yukon river. *Geol. Soc. of Amer. Bull.*, 88, p.829-843.
- JOHNSON, N. M., LIKENS, G. E., BORMANN, F.H., FISCHER, D.W., PIERCE, R. S. (1969) A working model for the variation in stream water chemistry at the Hubbard Brook experimental forest, New Hampshire. *Wat. Resour. Res.* 5 (6), p.1353-1363.
- KENNEDY, V.C., MALCOLM, R. L. (1977) Geochemistry of the Mattole River of northern California. *US Geol. Surv. Open File Report*, p.78-205, Menlo Park, California.
- KINGA-MOUZEO (1986). Transport particulaire actuel du fleuve Congo et de quelques affluents: enregistrement quaternaire dans l'éventail détritique profond (sédimentologie, minéralogie et géochimie). *Th. Doc. Univ. Perpignan*, 262 p.
- KLING G. (1987). Comparative limnology of lakes in Cameroon, West Africa. *Ph. D. Thesis*, Duke University USA, 242 p.
- LACAUX J. P., LOEMBA-NDEMBI J., LEFEUVRE B., CROS B., DELMAS R. (1992). Biogenic emissions and biomass burning influences of the chemistry of fogwater and stratiforms precipitations in the African equatorial rain forest. *Atm. Env.*, 26 A (4), p. 541-551.
- LETOUZEY R. (1968). Etude phytogéographique du Cameroun. Lechevalier Ed., Paris, 511 p.
- LEWIS W. M., GRANT M. C. (1979). Relationship between stream discharge and yield of dissolved substances from a Colorado mountain watershed. *Soil. Sci.*, 128, 6, p. 353-363.
- LIVINGSTONE D. A. (1963) Chemical composition of rivers and lakes, in: *Data of geochemistry*, 6th ed., Prof. Pap. 440-G, p.1-64, U.S. Geol. Surv.
- MARTINS O., PROBST J.L., (1990). Biogeochemistry of Major African Rivers: Carbon and Mineral transport. In: *Biogeochem. of major world rivers*, DEGENS, KEMPE et RICHEY Eds, Scope, J. Wiley and Sons Ltd, chapter 6, p. 129-157.
- MEADE R. H., NORDIN, C. F., CURTS, W. F., COSTA RODRIGUES, F.M., VALE, C. do, EDMOND, J. M. (1979) Sediments loads in the Amazon river. *Nature*, 278(5700), p.161-163.
- MEYBECK M. (1978) Note on elemental contents of the Zaïre river. *Neth. J. of Sea Res.* 12 (3/4), p. 293-295.
- MEYBECK M. (1983) Atmospheric inputs and river transport of dissolved substances. In: *Dissolved Loads of River and Surface Water Quality Relationship*. Proc. Symp. Hambourg IAHS Publ. no 141, p. 173-192.
- MEYBECK M. (1984). Les fleuves et le cycle géochimique des éléments. *Th. Doc. Sc., Géologie*, Uni. Paris VI, 558 p.
- MEYBECK M. (1986). Composition chimique des ruisseaux non pollués en France. *Sc. Géol.*, t. 39, p. 3-78.
- MILLER W. R., DREVER, J.I. (1977) Water chemistry of a stream following a storm, Absoraka Mountains, Wyoming. *Geol. Soc. Am. Bull.* 88, p.286-290.
- MOLINIER M. (1979). Note sur les débits et la qualité des eaux du Congo à Brazzaville. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, XVI, 1, p. 55-66.
- MOUKOLO N., BRICQUET J.P., BIYIDI B. (1990). Bilans et variation des exportations de matières sur le Congo à Brazzaville, de janvier 1987 à décembre 1988. *Hydrol. Cont.*, vol. 5, n° 1, p. 41-52.
- NEGREL Ph., (1992). Utilisation des isotopes du strontium, des alcalins et alcalino-terreux pour la détermination des bilans des éléments chimiques dans les rivières: apports atmosphériques, altération des roches, *Thèse de Doc. Univ. Paris 7*, 180p.
- NKOUNKOU R.R., PROBST J.L. (1987). Hydrologie and geochemistry of the Congo river system. *Mitt. Geol. Paläont. Inst. Hambourg*, SCOPE/UNEP, 64, p. 483-508.

- OLIVRY J.C. (1977). Transports solides en suspension au Cameroun. In : *Erosion and Solid matter Transport in Inland Waters* Proc. Symp Paris, AIHS, publ. n_ 122, p. 134-141.
- OLIVRY J.C. (1986). Fleuves et Rivières du Cameroun. Coll. "Mono. Hydro.", 9, Ed. MESRES-ORSTOM, Paris, 733 p.
- ORANGE D. (1990). Hydroclimatologie du Fouta Djallon et dynamique d'un vieux paysage latéritique (Afrique de l'Ouest). *Thèse Doc.*, ULP Strasbourg, 220 p.
- PROBST J.L., NKOUNKOU R. R., KREMP G., BRICQUET J. P., THIEBAUX J. P., OLIVRY J. C. (1992). Dissolved major elements exported by the Congo and Ubangi rivers during period 1987-1989. *J. of Hydrol.*, 135, p. 237-257.
- ROBINSON A. R. (1977). Relationship between erosion and sediment delivery. In : *Erosion and Solid matter Transport in Inland Waters*. Proc. Symp. Paris, IAHS publ., 122, p 159-167.
- SCHMIDT G. W. (1972) Amounts of suspended solids and dissolved substances in the middle reaches of the Amazon over the course of one year (Aug. 1969- July 1970). *Amazonia III/II*, p.208-223.
- SCHOELLER H. (1962) *Les eaux souterraines*. Ed. Masson. Paris
- SEGALEN P. (1967). Les sols et la géomorphologie du Cameroun. *Cah. ORSTOM sér. pédo*, Vol. V, n_ 2, p. 146-179.
- SEYLER P., OLIVRY J.C, SIGHA-NKAMDJOU L. (1993). Hydrochemistry of the Ngoko river, Cameroon : Chemical balances in a rain-forest equatorial basin. In: *Hydrology of Warm Humid Regions* Proc. Symp. Yokohama, Japan, AISH Publ. n_ 216, p. 87-105.
- SEYLER P., ETCHEBER H., ORANGE D., LARAQUE A., SIGHA NKAMDJOU L., OLIVRY J.C. (1993) Concentrations, fluctuations saisonnières et flux de carbone dans le bassin du Congo. In *Compte rendu du Colloque PEGI-Grands Bassins Fluviaux*, Paris, Dec. 1993.
- SHOLKOVITZ E. R., VAN GRIEKEN R., EISMA D. (1978) The major element composition of the suspended matter in the Zaïre river and estuary. *Neth. J. of Sea Res.* 12 (3/4): 407-413.
- SIGHA-NKAMDJOU L. (1993). Caractérisation et fonctionnement hydrochimique d'un bassin versant en milieu forestier équatorial humide: L'exemple de la Ngoko à Moloundou (sud-est du Cameroun). *Th. Doc.*, Uni. Paris XI, 380 p.
- STALLARD R. F., EDMOND J. M. (1981). Geochemistry of the Amazon. 1. Precipitation chemistry and the marine contribution to the dissolved load at time of peak discharge. *J. of Geoph. Res.*, 86, n_ C10, p. 9844-9858.
- STALLARD R. F., EDMOND J. M. (1983). Geochemistry of the Amazon. 2. Influence of geology and weathering environment on dissolved load. *J. of Geoph. Res.*, 88, n_ C14, p. 9671-9688.
- SUCHEL J. B. (1987). Les climats du Cameroun. *Th. Doc. d'Etat*, Univ Bordeaux III, 3 vol., 1186 p.
- SYMOENS J. J. (1968). L'apport de quelques bassins versant à la minéralisation du Congo. XVIIth Int. Congr. Limnol. (Jerusalem, 2-19 Aout 1968), Abstracts.