

Érosion chimique et mécanique sur le bassin amont du Niger (Guinée, Mali). Découpage d'hydrogramme en quatre écoulements

*Chemical and mechanical erosion in the upper Niger basin
(Guinea, Mali). Hydrograph separation of four components*

Jean-Loup BOEGLIN¹ et Yves TARDY²

¹ ORSTOM (Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération) 213, rue La Fayette, 75480 Paris cedex 10 ;

² Université Louis-Pasteur, Institut de géologie et Centre de géochimie de la surface (CNRS) 1, rue Blessig, 67084 Strasbourg cedex, France

RÉSUMÉ

Une méthode de découpage d'hydrogramme faisant intervenir quatre écoulements (nappe profonde, nappe superficielle, ruissellement hypodermique différé, ruissellement de surface) est présentée ici, utilisant un échantillonnage serré sur les eaux du bassin amont du Niger, à l'exutoire de Bamako (Mali). On a fait l'hypothèse que la composition de chaque réservoir reste constante, alors que la contribution des différents écoulements est variable tout au long du cycle hydrologique. Le pourcentage d'écoulement revenant à chacun des quatre réservoirs est déterminé point par point, moyennant certaines hypothèses sur les concentrations des traceurs choisis.

Mots clés : Écoulement, Ruissellement, Découpage d'hydrogramme, Chimie des eaux, Bassin du Niger

ABSTRACT

A model for hydrograph separation of four components (deep groundwater, superficial groundwater, hypodermic runoff and surface runoff) is proposed, using a dense sampling of river waters from the upper Niger basin at the Bamako station (Mali). The composition of each component is supposed to remain constant, while the four different contributions to the total flow are variable during the hydrological cycle. The flow percentage attributed to each component is calculated point by point, which requires some hypotheses on the concentrations of the selected tracers.

Keywords: Groundwater flow, Runoff contribution, Hydrograph separation, Water chemistry, Niger basin

Abridged version (see p. 130)

I. Introduction

La modélisation du comportement d'un bassin, quelle que soit sa taille, ne peut se concevoir qu'à partir d'une évaluation des variations de contribution des différents écoulements au fil d'un cycle hydrologique annuel ou au cours

Fonds Documentaire ORSTOM

Cote : B* 11 780 Ex : 1

de fluctuations climatiques interannuelles : années moyennes, très humides ou très sèches.

Les eaux des fleuves, recueillies à l'exutoire des bassins-versants, proviennent de plusieurs types d'écoulements. Ceux-ci sont attribués à la vidange de réservoirs spécifiques, situés à différentes profondeurs au sein des sols et

Note présentée par Georges Pédro

Note remise le 23 septembre 1996, acceptée après révision le 7 avril 1997

Fonds Documentaire ORSTOM



010011780

des profils d'altération ; ils sont souvent dénommés nappe profonde (Np), nappe superficielle (Ns), ruissellement hypodermique (Rh), ruissellement de surface (Rs). Au cours des variations saisonnières et interannuelles qui affectent les cycles climatiques et hydrologiques, la contribution de chacun des écoulements varie en valeur absolue et en valeur relative (Pilgrim et al., 1979 ; Hooper et Shoemaker, 1986 ; Robson et Neal, 1990). Il est généralement admis que l'érosion mécanique est principalement le fait du ruissellement de surface (Rs) qui transporte les particules en suspension (MES), tandis que l'érosion chimique se produit surtout en solution dans l'écoulement de nappe profonde (Np) ou de nappe superficielle (Ns). Le terme de ruissellement hypodermique (Rh) désigne un écoulement intermédiaire dont les caractéristiques ne sont pas déterminées avec précision (Roche, 1963), mais qui peut correspondre à ce que Hewlett et Hibbert (1967) ont appelé écoulement de surface différé ; cet écoulement est aussi responsable d'une érosion mécanique de faible intensité.

La détermination des contributions de deux ou trois réservoirs au flux total a été tentée par des méthodes différentes (Tardy, 1986) : hydrologiques (Barnes, 1939 ; Langbein, 1940 ; Castany, 1963 ; Roche, 1963, 1967 ; Chow, 1964 ; Lambert, 1968 ; Rambert, 1971 ; Linsley et Franzini, 1972), isotopiques (Fritz et al., 1976) ou chimiques (Pinder et Jones, 1969 ; Gac, 1980 ; Takeuchi et al., 1984 ; Etchanchu et Probst, 1986 ; Kattan et al., 1987 ; Probst, 1992 ; O'Brien et Hendershot, 1993 ; Mortatti et al., 1994 ; Tardy et al., 1995).

La méthode de découpage proposée ici est fondée sur un modèle de mélange de quatre pôles, encore appelés réservoirs. Tout au long des cycles hydrologiques annuels ou interannuels, les caractéristiques chimiques de chacun des réservoirs sont supposées constantes ; seules varient dans le temps les valeurs absolues et les proportions relatives de chacun des écoulements. Cependant, il n'est pas possible de déterminer sans a priori à la fois les contributions et les concentrations des différents réservoirs, mais il est possible de vérifier a posteriori que les choix qui ont été faits donnent une solution satisfaisante à plusieurs titres.

II. Milieu naturel, échantillonnage

Le bassin amont du Niger à l'exutoire de Bamako (Mali), d'une superficie de 117000 km², est pour la plus grande partie situé en Guinée (figure 1). Les altitudes s'échelonnent entre 800 et 320 m.

Les roches du bassin sont essentiellement les formations du Birimien : schistes, granites et grauwackes, ainsi que les formations gréseuses du Précambrien terminal (Besolles, 1977 ; Milesi et al., 1986 ; Bassot et al., 1981). La couverture latéritique est constituée de cuirasses ferrugineuses et bauxitiques qui coiffent d'épais profils kaoliniques (Maignien, 1958 ; Michel, 1973).

La pluviosité moyenne, mesurée sur 30 années qui furent, dans l'ensemble, plus humides que les 3 années de prélèvement (1990 à 1992), est de 1 568 mm/an (figure 2),

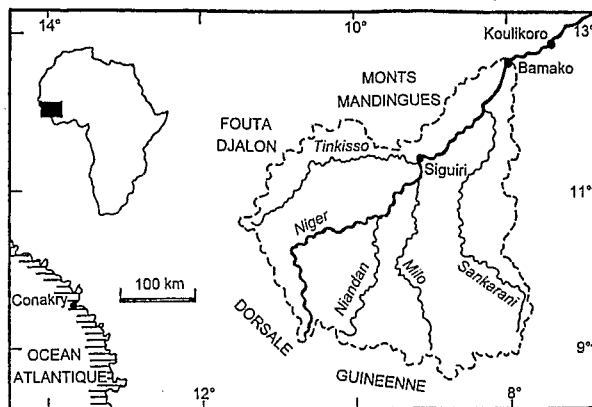


Figure 1. Carte de situation du bassin amont du Niger.

Location map of the upper Niger basin.

comprise entre 2 000 mm à l'amont et 1 100 mm à l'aval (d'après Boulvert, 1992). On estime que, pour la période considérée, la pluviosité moyenne est de 1 300 mm/an, comprise entre 1 750 mm/an à l'amont et 980 mm/an à l'aval. A une pluviosité moyenne de 1 300 mm/an correspond une hauteur de lame d'eau écoulee égale à 198 mm/an à Bamako.

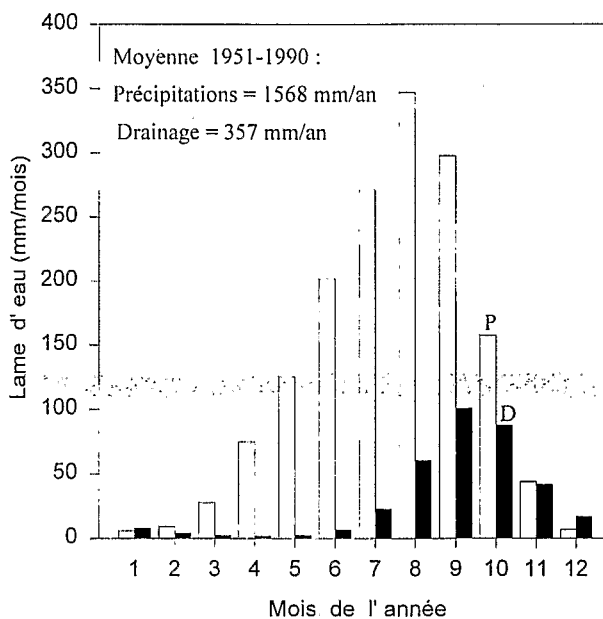


Figure 2. Précipitations et écoulements mensuels moyens sur le bassin amont du Niger.

Monthly mean rainfall and water discharge on the upper Niger basin.

Les 72 échantillons d'eau du Niger, prélevés à quelques kilomètres en amont de Bamako, le 14 et le 28 de chaque mois au cours des 3 années civiles 1990, 1991 et 1992 ont été analysés au laboratoire de géochimie des eaux du CGS de Strasbourg (Boeglin et Probst, 1996). Les hydrogrammes et les débits moyens annuels de chacune de ces 3 années sont très voisins, ainsi que les concentrations mesurées en solution et en suspension aux mêmes dates.

Tableau I. Valeurs mesurées et calculées de la composition des eaux du Niger à Bamako, pour huit points caractéristiques de l'année moyenne 1990-92.

Measured and calculated values of Niger water composition for eight points characteristic of the mean year 1990-92 at Bamako.

Numéro	Qt	Np	Ns	Rh	Rs	(Na ⁺)	(Na ⁺)	(K ⁺)	(K ⁺)
1	177	143	34	0	0	134,6	139,6	36,9	36,4
6	97	69	28	0	0	136,0	130,3	44,3	32,0
11	262	232	21,5	0	8,5	145,4	145,0	49,1	44,7
14	994	485	225	160	124	94,7	94,3	41,1	41,6
17	2 564	1 140	510	732	182	87,3	88,3	30,0	32,4
18	2 746	1 160	610	881	95	86,2	86,9	26,0	26,1
20	1 576	820	350	382	24	100,5	100,8	25,6	27,2
22	536	320	216	0	0	117,2	119,3	28,1	26,9
Année	727	379	162	151	35	99,7	100,3	31,6	31,9
Écart %							0,6		0,9
(Mg ²⁺)	(Mg ²⁺)	(Ca ²⁺)	(Ca ²⁺)	SCat	SCat	(HCO ₃ ⁻)	(HCO ₃ ⁻)	(Cl ⁻)	(Cl ⁻)
54,6	56,9	71,8	72,9	424,3	435,6	406,2	422,5	10,0	9,9
60,4	51,3	78,4	64,8	457,9	394,5	434,0	382,5	10,3	9,2
56,4	61,0	81,5	80,8	470,3	473,3	441,7	456,3	13,1	11,9
36,7	38,5	46,4	52,7	302,3	318,3	270,3	295,7	10,4	13,4
37,8	37,6	47,3	47,5	287,5	290,9	261,0	274,3	8,9	10,7
40,2	37,0	56,5	44,3	305,6	275,6	286,4	263,1	7,3	8,9
40,6	42,2	50,9	51,1	309,3	314,6	293,6	303,0	7,6	8,6
46,2	44,6	55,6	55,1	348,9	345,6	332,1	335,2	8,3	8,3
41,3	41,6	54,4	52,5	322,8	320,4	299,8	295,4	8,9	10,2
	0,7		-3,5		-0,7		-1,5		14,6
(SO ₄ ²⁻)	(SO ₄ ²⁻)	SA _n	SA _n	(SiO ₂)	(SiO ₂)	MES	MES	pH	pH
1,7	1,5	419,8	435,4	272,8	268,1	1,9	1,9	7,43	7,50
1,7	1,4	447,9	394,5	247,8	279,2	3,0	2,9	7,59	7,43
1,0	2,7	457,5	473,6	250,5	250,1	12,2	12,2	7,45	7,55
3,7	4,7	289,7	318,5	224,2	240,7	51,6	50,0	7,23	7,22
2,3	3,0	275,7	291,0	238,2	238,2	33,9	34,0	7,21	7,24
0,9	1,8	295,5	275,6	236,8	244,6	22,6	22,4	7,28	7,25
1,3	1,4	303,8	314,4	264,0	253,0	13,6	13,6	7,32	7,32
1,0	1,1	343,1	345,7	283,3	292,3	4,2	4,0	7,34	7,33
1,9	2,4	313,1	310,5	247,9	249,9	24,5	24,6	7,30	7,30
	26,3		-0,8		0,8		0,4		0

Débit total (Qt), débits de la nappe profonde (Np), de la nappe superficielle (Ns), du ruissellement hypodermique (Rh), du ruissellement superficiel (Rs) en m³/s ; concentrations mesurées en caractères droits, concentrations calculées en italiques ; concentrations des espèces dissoutes en µmol/l, des matières en suspension (MES) en mg/l ; somme des cations (SCat) et somme des anions (SA_n) en µéq/l ; écart % représente la déviation entre les valeurs annuelles calculées et mesurées.

Chacun des 24 points considérés peut donc être caractérisé par une valeur moyenne du débit et de la composition chimique calculée à partir de trois points, correspondant au même jour de prélèvement au cours des 3 années prises en compte (voir tableau I pour quelques exemples).

III. Principe du découpage

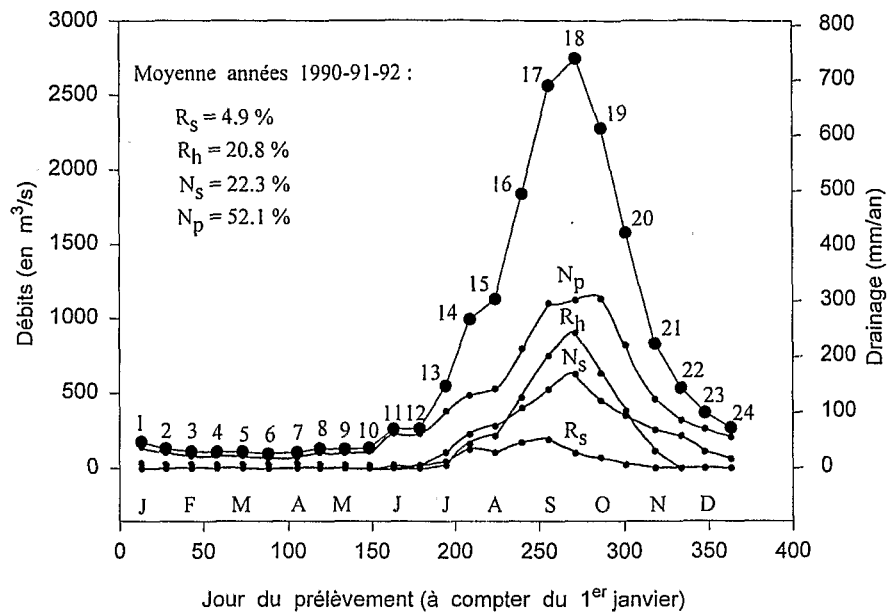
Dans un modèle de mélange, il n'est pas possible de déterminer simultanément les concentrations dans les différents réservoirs et les contributions au débit total sans formuler d'hypothèses préliminaires. On procède donc par étapes, en faisant chaque fois les hypothèses qui s'imposent pour la poursuite des opérations.

Le découpage de l'hydrogramme est fondé sur le suivi des variations de trois marqueurs (tableau I) : les concentrations en sodium ou en bicarbonate (Na⁺, HCO₃⁻, µmol/l) et en matières en suspension (MES, mg/l). Les

concentrations en sodium et en bicarbonate sont tout d'abord supposées maximales dans la nappe profonde (Np) et minimales dans les eaux du ruissellement de surface (Rs). En revanche, la concentration des MES est supposée maximale dans Rs et minimale dans Np. En effet, Na⁺ et HCO₃⁻ montrent un taux de décroissance accusé, et MES un taux d'accroissement élevé lorsque le débit augmente, et que la part des réservoirs superficiels (Rs, Rh) croît par rapport à celle des écoulements plus profonds (Np, Ns). En revanche, lorsque le débit diminue, la contribution des réservoirs profonds croît et celle des réservoirs superficiels décroît. Lorsque Q tend vers zéro, seule la nappe profonde est opérante ; les concentrations en Na⁺ et en HCO₃⁻, ainsi d'ailleurs que celles en Mg²⁺, Ca²⁺ atteignent une valeur maximale, tandis que MES tend à s'annuler. MES augmente avec le débit jusqu'au point 14, puis se maintient à une valeur assez élevée jusqu'en 17 avant de chuter à partir de 18. Cela permet de situer la

Figure 3. Variations du débit des différents écoulements du Niger à Bamako pour l'année moyenne 1990-1992.

Discharge variations of the different flow components for the Niger river at Bamako during the mean year 1990-1992.



pointe de crue de R_s en 17, en avance de 2 semaines par rapport au pic du débit total (18). Les points de crue de R_h et N_s sont en coïncidence avec le maximum du débit total (18), tandis que les plus fortes valeurs de N_p s'étalent entre 17 et 19. En régime de décrue, MES chute brutalement en 22, si bien qu'on considère que $R_s = R_h = 0$ à partir de ce point jusqu'en 7, MES recommençant à augmenter au point 8. Seuls subsistent donc les écoulements N_s et N_p pour les 10 points 22 à 24 et 1 à 7 (figure 3), alors que les précipitations sont très faibles (figure 2).

On commence donc par utiliser, en période de décrue, un modèle de mélange à deux réservoirs. Les parts revenant à N_p et N_s sont calculées à partir des concentrations en Na^+ estimées par régression sur les dix points retenus, au moyen de l'équation suivante :

$$(Na^+) = (31.668 + 62 Qt)/(200 + Qt)$$

dans laquelle les concentrations sont exprimées en $\mu\text{mol/l}$, les débits en mm/an ; cette relation fournit pour Na^+ une valeur de $158 \mu\text{mol/l}$ dans N_p quand Qt tend vers zéro, et de $62 \mu\text{mol/l}$ pour N_s quand Qt tend vers l'infini. Au moyen de fonctions analogues, on détermine MES et les autres concentrations dans N_p et dans N_s (tableau II). Au cours de cette période, entre fin novembre et mi-avril, la relation $(Na^+)/MES$ est linéaire, ce qui justifie l'hypothèse que, dans chacun de ces deux réservoirs au moins, les concentrations sont constantes au cours de la décrue. Les caractéristiques de la nappe profonde et de la nappe superficielle sont donc acquises. On calcule alors la concentration de tous les autres éléments dans ces deux réservoirs.

L'ensemble des points compris entre 8 et 12 ne concerne que les trois écoulements N_p , N_s et R_s . On utilise ici les deux marqueurs Na^+ et MES. Dans R_s , on fait l'hypothèse que $Na^+ = 0$; cette valeur correspond à $MES = 350 \text{ mg/l}$, calculé par la régression linéaire

Na^+/MES ; on parvient d'ailleurs au même résultat par la fonction suivante, ajustée sur les points 8 à 12 :

$$MES = (-8840 + 350 Qt)/(687 + Qt)$$

avec Qt en mm/an.

On calcule de la sorte les contributions de N_p , N_s et R_s , ainsi que les concentrations des autres éléments dans ces trois réservoirs.

L'ensemble des points compris entre 13 et 21 concerne les quatre écoulements N_p , N_s , R_s et R_h . On utilise alors trois traceurs, soit Na^+ , MES et HCO_3^- , soit Na^+ , MES et SiO_2 , pour lesquels on peut raisonnablement estimer la concentration dans l'écoulement hypodermique. Une telle estimation est fondée sur l'idée simple que les concentrations dans R_h doivent être, soit approximativement à mi-chemin entre celles de R_s et de N_s ($0 < Na^+ = 20 \mu\text{mol/l} < 62$; $60 < HCO_3^- = 80 \mu\text{mol/l} < 99$; $80 < SiO_2 = 180 \mu\text{mol/l} < 361$), soit beaucoup plus proches de N_s que de R_s ($10 < MES = 25 \text{ mg/l} < 350 \text{ mg/l}$).

A partir des valeurs supposées constantes dans chacun des quatre réservoirs, on détermine en chaque point, de proche en proche, la contribution de chacun des réservoirs (N_p , N_s , R_h , R_s) au débit total écoulé. Ces valeurs de débits ponctuels sont ensuite appliquées au calcul de la concentration des autres éléments dans chacun des quatre écoulements (tableau II).

IV. Résultats

On obtient les écarts entre valeurs mesurées dans l'écoulement total et valeurs calculées à partir du modèle (tableau I). Les écarts les plus élevés (mis à part ceux, non significatifs, obtenus sur les concentrations en chlorures et en sulfates) correspondent en général aux faibles valeurs

Tableau II. Caractéristiques des quatre écoulements du Niger amont : concentrations en espèces dissoutes, en matières en suspension (MES) et pH pour l'année moyenne 1990-92 à Bamako.

Features of the four upper Niger flow components: dissolved species and suspended load concentrations, pH values for the mean year 1990-92 at Bamako station.

	%	(Na ⁺)	(K ⁺)	(Mg ²⁺)	(Ca ²⁺)	SCat	(HCO ₃ ⁻)
Rs	4,9	0	150	0	50	250	60
Rh	20,8	20	6	19	12	88	80
Ns	22,3	62	0	10	5	92	99
Np	52,1	158	45	68	89	517	487

	(Cl ⁻)	(SO ₄ ²⁻)	SAn	(SiO ₂)	MES	pH	log fCO ₂	R _e
50	30	170	80	350	6,35	-2,73	3,76	
4,7	0	85	180	25	7,07	-3,33	-1,38	
3,9	0	103	361	10	6,85	-3,01	-3,51	
11,3	1,9	502	246	0	7,66	-3,13	2,59	

Concentrations des espèces dissoutes en µmol/l, des matières en suspension (MES) en mg/l ; somme des cations (SCat) et somme des anions (SAn) en µéq/l ; log fCO₂ = 7,84 + log (HCO₃⁻) - pH d'après Stumm et Morgan (1981).

du débit total. Pour plus de la moitié des 24 points, les écarts sont inférieurs à 1 %. Le découpage de l'hydrogramme livre donc des résultats cohérents, du point de vue hydrologique comme géochimique.

Les résultats du tableau II indiquent que, comme attendu, les concentrations en Na⁺, Mg²⁺, HCO₃⁻ et SiO₂ augmentent dans l'ensemble de la surface vers la profondeur. Pour Mg²⁺ et Ca²⁺, les concentrations les plus fortes sont effectivement dans la nappe profonde. Cependant, pour K⁺, SO₄²⁻ et Cl⁻, les maxima se retrouvent dans le ruissellement de surface, tandis que les minima sont, soit dans le ruissellement hypodermique, soit dans la nappe superficielle. On interprète une telle distribution en considérant que, dans l'ordre décroissant suivant : K⁺, SO₄²⁻, Cl⁻, Ca²⁺ et Mg²⁺, ces espèces sont prélevées aux solutions du sol par les plantes, puis concentrées dans les horizons supérieurs du profil et évacuées par les eaux du ruissellement de surface. De plus, les pointes de crue des deux réservoirs intermédiaires (Ns, Rh) et celle de l'écoulement total sont synchrones (point 18). Cependant, le maximum de l'écoulement de surface (Rs) se produit en avance de 6 semaines (autour du point 15), et l'écoulement de nappe profonde (Np) arrive en retard de 2 semaines par rapport à la pointe de crue du Niger (point 18).

Les pressions partielles de CO₂ dans l'atmosphère du sol sont calculées par la relation : log fCO₂ = 7,84 + log (HCO₃⁻) - pH (Stumm et Morgan, 1981). Comme attendu, la valeur la plus forte est observée dans l'horizon de surface toujours plus organique, tandis que la valeur moyenne dans l'ensemble de l'écoulement (log fCO₂ = -2,98) est de l'ordre de 3 à 4 fois supérieure à celle de l'atmosphère (log fCO₂ = -3,5).

Enfin, le rapport R_e défini par Tardy (1968, 1969) et repris par Drever (1982) et Velbel (1985), qui permet le bilan géochimique des processus d'altération, montre l'évolution suivante : très élevé en surface (3,76), R_e est minimum dans la nappe superficielle (-3,51) pour être égal à 2,59 dans la nappe profonde et à 2,03 dans l'écoulement total. La valeur moyenne proche de R_e = 2 indique un bilan global favorable à la kaolinite. Toutefois, on peut noter une tendance à la formation de smectite (correspondant à R_e = 3,5) dans les horizons correspondant à la nappe profonde dont la contribution domine à l'étiage, et à la formation de gibbsite (pour R_e = 0, en théorie) dans les niveaux du profil baignés par la nappe superficielle et le ruissellement hypodermique, qui dominent en pointe de crue.

Dans le détail des différents horizons entre lesquels se produisent d'importants transferts, l'interprétation est rendue difficile par le fait de la ponction de K⁺, Ca²⁺ et Mg²⁺ par la végétation dans l'horizon supérieur du profil, et leur rétrocession dans les eaux du ruissellement superficiel. Cette spécificité est peut-être liée à la pratique des feux de brousse.

V. Conclusion

Grâce à un échantillonnage serré de 72 prélèvements recoltés tout au long de trois cycles hydrologiques du Niger à Bamako, on propose ici un modèle de découpage de l'hydrogramme en quatre réservoirs, dont la composition est supposée constante, mais qui se mélangent en des proportions variables. On obtient ainsi les valeurs de 4,9 % pour le ruissellement de surface, principal responsable de l'érosion mécanique et de la charge en suspension du fleuve Niger (MES = 350 mg/l dans Rs et seulement 24,5 mg/l dans l'écoulement total), 52,1 % pour la nappe profonde et 22,3 % dans la nappe superficielle. Les 20,8 % restants, imputables à ce que l'on a appelé le ruissellement hypodermique, sont également, bien qu'à un moindre degré, responsables de l'érosion mécanique (25 mg/l).

Le découpage proposé fournit des écarts faibles entre les valeurs mesurées dans l'écoulement total et les valeurs calculées par le modèle. Sans prétendre pouvoir résoudre dans son intégralité le problème épineux d'une parfaite identification des différentes composantes de l'écoulement, nous pensons que ce modèle est apte à permettre une approche originale de plusieurs questions, qui ne concernent pas seulement le domaine de l'hydrologie.

L'objectif sera poursuivi dans plusieurs directions : 1) bilan géochimique de l'altération des grands bassins-versants tropicaux ; 2) relations écoulement-érosion chimique et ruissellement-érosion mécanique ; 3) modélisation de l'évolution des paysages en fonction des oscillations climatiques et paléoclimatiques.

ABRIDGED VERSION

Surface waters, collected at the watershed outlets, are mixtures of variable contributions that can be attributed to the individual discharge of at least four specific reservoirs. The groundwater flow may be arbitrarily divided into two parts originating from (1) the deep groundwater (Np) and (2) the superficial groundwater reservoir (Ns). The superficial runoff may also be separated into two units, called here: (3) the subsurface or hypodermic runoff (Rh) and (4) the surface runoff (Rs), following Roche (1963) or Chow (1964) for example. Dissolved species and suspended material concentrations are different in each reservoir. It is generally admitted that chemical weathering is essentially due to groundwaters where salinity is higher, whilst mechanical erosion is principally the result of surface waters where suspensions (TSS) are much more concentrated.

An hydrograph separation model of four components is proposed, using bimonthly sampling of Niger waters at Bamako (Mali) over 3 consecutive years, 1990, 1991 and 1992. This station is assumed to be representative of a typical tropical area: the upper Niger basin (117 000 km²). In order that our calculations were valid for the mean year 1990-91-92 (the three cycles considered being very similar), the following hypotheses had to be formulated: (1) the composition of each reservoir remains constant during the hydrological year; (2) sodium is absent in the surface waters (Rs); (3) suspended materials (TSS) are absent in the deep groundwaters (Np). The discharge proportions relative to each of the 24 mean samples were calculated point by point, with some hypotheses concerning the concentrations of the chosen tracers (Na⁺, TSS, HCO₃⁻ or SiO₂). The values of all other parameters (K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, pH) in each reservoir were determined subsequently. For the 24 sampling points, a fairly good coincidence can be observed between the concentrations measured in the total discharge and the corresponding calculated ones.

Groundwaters are stratified: the salinity is higher in the deepest compartment (Np) not often renewed, and generally lower near the water table (Ns) frequently diluted or visited by infiltration of water percolating through the leached soils

(Tardy, 1969). The deep groundwater (Np) flow fluctuates slowly along the hydrological annual cycle; its variations are dephased with regards to the total discharge hydrograph. On the contrary, the superficial groundwater (Ns) volume fluctuates to a greater extent, increasing as soon as the rainfall intensifies, and decreasing when it slows down. The variations of salinity in the reservoirs may be modeled in terms of constant concentrations in each reservoir (higher in Np, lower in Ns), but variable in the total discharge, owing to the different volumic contributions (Mortatti et al., 1994; Tardy et al., 1995).

The principal results are the following. (1) The concentration gradients as a function of depth are different for the two groups of chemical variables; as expected, Na⁺, Mg²⁺, HCO₃⁻ and SiO₂ concentrations roughly increase from the surface down owing to a progressive dissolution and evaporation taking place with time; for other species (K⁺, Cl⁻, SO₄²⁻) on the other hand, the highest concentrations are clearly found in the surface runoff, which could be due to a selective extraction of these dissolved elements by plants, from the intermediate levels (Rh and Ns) to the top of the lateritic profile. (2) TSS is very high in the superficial runoff, which is chiefly responsible for the physical erosion, and diminishes abruptly with depth, reaching zero in the deep water reservoir (Np). (3) The geochemical parameter R_c, supposed to indicate the nature of the clay mineral formed in the profiles, is meaningful as a function of the total discharge variations (annual R_c = 2.03, corresponding to kaolinitization), but it is meaningless in the upper reservoirs where K⁺ and Ca²⁺ are distorted by biological activity. (4) Finally, the annual discharge proportions for the four flows considered are: 52.1% for the deep groundwater (Np), 22.3% for the superficial groundwaters (Ns), 20.8% for the hypodermic runoff (Rh) and 4.9% for the surface runoff (Rs).

It should be noted that the period 1990-91-92 was particularly dry; however, we will show later that this model is able to predict the behaviour of such a basin during humid and even perhumid periods.

RÉFÉRENCES

- Barnes B.S. 1939. The structure of discharge recession curves, *Trans. Am. Geophys. Union*, 20, 4, 721-725
- Bassot J.P., Meloux J. et Traoré H. 1981. Carte géologique au 1 500 000^e de la République du Mali, *Dir. Nat. Géol. Mines, Bamako* (notice, 137 p.)
- Bessoles B. 1977. Géologie de l'Afrique. Le craton ouest-africain, *Mém. BRGM*, 88, 402 p.
- Boeglin J.L. et Probst J.L., 1996. Transports fluviaux de matières dissoutes et particulaires sur un bassin-versant en région tropicale : le bassin amont du Niger au cours de la période 1990-1993, *Sci. Géol. Bull., Strasbourg* (à paraître)
- Boulivert Y. 1992. Eléments d'atlas climatologique de la région guinéenne et péri-guinéenne, *rap. ORSTOM, Bondy*, 16 p.
- Castany G. 1963. *Traité pratique des eaux souterraines*, Dunod, Paris, 686 p.
- Chow V.T. 1964. *Handbook of applied hydrology*, Mac Graw Hill Book Company, New York, 1400 p.
- Drever J. I. 1982. *The geochemistry of natural waters*, Printice Hall Inc., 388 p.
- Etchanchu D. et Probst J.L. 1986. Érosion et transport de matières en suspension dans un bassin-versant en région agricole. Méthode de mesure du ruissellement superficiel, de sa charge et des deux composantes du transport solide dans un cours d'eau, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 302, série II, 1063-1068
- Fritz P., Cherry J.A., Weyer K.U. et Sklash M.G. 1976. Storm runoff analysis using environmental isotopes and major ions, *In: IAEA publ., Interpretation of environmental isotopes and hydrochemical data in groundwater hydrology*, 111-116
- Gac J.Y. 1980. Géochimie du bassin du Lac Tchad. Bilan de l'érosion, de l'altération et de la sédimentation, *Travaux et Documents ORSTOM, Paris*, 123, 241 p.
- Hewlett J.D. et Hibbert A.R. 1967. Factors affecting the response of small watershed to precipitation in humid areas, *Int. Symp. on Forest Hydrology*, Sopper W.E. et Lull H. W. (eds), Pergamon Press, Oxford, 275-291
- Hooper R.P. et Shoemaker C.A. 1986. A comparison of chemical and isotopic hydrograph separation, *Water Resour. Res.*, 22, 1444-1454

- Kattan Z., Gac J.Y. et Probst J.L. 1987. Suspended sediment load and mechanical erosion in the Senegal basin, estimation of the surface runoff concentration and relative contributions of channel and slope erosion, *J. Hydrol.*, 92, 59-76
- Lambert R. 1968. Recherche de la structure hydrologique d'un bassin-versant, *Ann. Géogr.*, 424, 687-706
- Langbein W.B. 1940. Some channel storage and unit hydrograph studies, *Trans. Am. Soc. Civ. Engin.*, 21, 620-627
- Linsley R.K. et Franzini J.B. 1972. *Water resources engineering*, Mac Graw Hill, New York, 3^e édition, 1979, 688 p.
- Maignien R. 1958. Le cuirassement des sols en Guinée (Afrique occidentale), *Mém. Serv. Carte géol. Alsace-Lorraine, Strasbourg*, 16, 239 p.
- Michel P. 1973. Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Étude géomorphologique, *Mém. ORSTOM, Paris*, 63 (1, 2, 3), 752 p.
- Milesi J.P., Diallo M., Feybesse J.L., Keyta F., Ledru P., Vinchon C. et Dommanget A. 1986. Caractérisation lithostructurale de deux ensembles successifs dans les séries birrimiennes de la boutonnière de Kédougou (Mali-Sénégal) et du Niandan (Guinée). Implications géologiques, *CIFEG, Publ. occasionnelle*, 10, 113-181
- Mortatti J., Probst J.L. et Tardy Y. 1994. Avaliação do escoamento superficial na bacia Amazônica a través do transporte de material fluvial, *Geochim. Brasiliensis*, 8 (2), 225-234
- O'Brien C. et Hendershot W.H. 1993. Separating stream flow into groundwater, solum and upwelling flow and its imputations for hydrochemical modelling, *J. Hydrol.*, 146, 329-339
- Pilgrim D.H., Huff D.D. et Steele T.D. 1979. Use of specific conductance and contact time relations for separating flow components in storm runoff, *Water Resour. Res.*, 15 (2), 329-339
- Pinder G.F. et Jones J.F. 1969. Determination of the groundwater components of peak discharge from chemistry of total runoff, *Water Resour. Res.*, 5 (2), 438-445
- Probst J.L. 1992. Géochimie et hydrologie de l'érosion continentale : mécanismes, bilan global actuel et fluctuations au cours des 500 derniers millions d'années, *Sci. Géol. Mém., Strasbourg*, 94, 161 p.
- Rambert B. 1971. Application de l'analyse des hydrogrammes des cours d'eau à l'évaluation de l'écoulement souterrain, *Rap. BRGM, SGN 389 Hydr.*, 34 p.
- Robson A. et Neal C. 1990. Hydrograph separation using chemical techniques : an application to catchments in Mid Wales, *J. Hydrol.*, 116 (1/4), 345-363
- Roche M. 1963. *Hydrologie de surface*, Gauthier-Villars, Paris, 430 p.
- Roche M. 1967. Essai de définition d'un hydrogramme standard, *Bull. AIHS*, 12 (4), 19-33
- Stumm W. et Morgan J.J. 1981. *Aquatic chemistry*, John Wiley, New-York, 780 p.
- Takeuchi K., Sakamoto Y. et Hongo Y. 1984. Discharge characteristics of NO₃ for the analysis of basin, wide circulation of water and environmental pollutants in a small river basin, *J. Hydrol.*, 2 (1), 73-85
- Tardy Y. 1968. Une méthode de détermination des types d'altération actuels par l'étude des eaux en pays granitiques et gneissiques, *C. R. Acad. Sci., Paris*, 278, série D, 1999-2002
- Tardy Y. 1969. Géochimie des altérations. Étude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique, *Mém. Serv. Carte géol. Alsace-Lorraine, Strasbourg*, 31, 199 p.
- Tardy Y. 1986. *Le cycle de l'eau. Climats, paléoclimats et géochimie globale*, Masson, Paris, 338 p.
- Tardy Y., Mortatti J. et Probst J.L. 1995. Érosion mécanique et chimique dans le bassin de l'Amazonie. Évaluation du ruissellement par la méthode dite des réservoirs à contribution variable mais à composition constante, *C. R. Acad. Sci., Paris*, 320, série IIa, 853-860
- Velbel M.A. 1985. Hydrochemical constraints on the mass balances in forested watersheds of the southern Appalachians, *In: The Chemistry of waters*, Drever, J. I. (ed), D. Reidel Publ. Company, 231-247

COMPTES RENDUS DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES

SCIENCES DE LA TERRE ET DES PLANÈTES

EARTH & PLANETARY SCIENCES

1997 — Tome 325 — Série II a — N° 2

Géomatériaux (Pétrologie)

- Données nouvelles sur le volcanisme cénozoïque du fossé de Garoua (Nord du Cameroun).
Ismaila NGOUNOUNO, Bernard DÉRUELLE,
Daniel DEMAÏFFE et Raymond MONTIGNY 87
- Les granitoïdes calco-alcalins, syn-cisaillement de Bandja dans la chaîne panafricaine nord-équatoriale au Cameroun.
Clovis NGUIESSI TCHANKAM, Jean-Paul NZENTI,
Emmanuel NKONGUIN NSIFA, Paul TEMPIER
et Felix TCHOUA 95

(Métallogénie)

- Gisements épithermaux et porphyriques : la connexion adakite.
Denis THIÉBLEMONT, Gilbert STEIN
et Jean-Luc LESCUYER 103

Géochimie (Géochronologie)

- Spéciation du radium dans les résidus de traitement acide du minerai d'uranium de l'Écarpière (Vendée, France).
Stéphanie SOMOT, Maurice PAGEL
et Jacques THIRY 111

(Géochimie isotopique)

- Variations spatio-temporelles de la composition chimique et des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des eaux minérales de la Limagne d'Allier.
Philippe NÉGREL, Christian FOUILLAC
et Michel BRACH 119

Géosciences de surface (Hydrologie)

- Érosion chimique et mécanique sur le bassin amont du Niger (Guinée, Mali). Découpage d'hydrogramme en quatre écoulements. FD
Jean-Loup BOEGLIN et Yves TARDY 125

(Pédologie)

- Biodégradation des cyanures libres par le champignon *Fusarium solani* : relation avec le pH et la distribution des espèces cyanurées en solution.
Alain DUMESTRE, Noureddine BOUSSERRHINE
et Jacques BERTHELIN 133

(Paléoclimatologie)

- Changements limnologiques et climatologiques dans le bassin du lac Titicaca (Bolivie), depuis 30 000 ans. FD
Philippe MOURGUIART, Jaime ARGOLLO,
Thierry CORRÈGE, Louis MARTIN,
Maria Eugenia MONTENEGRO,
Abdelfettah SIFEDDINE et Denis WIRRMANN 139

Paléontologie

- *Bachea huilensis* nov. gen., nov. sp., premier Tselfatioidei (Teleostei) de Colombie.
María E. PÁRAMO-FONSECA 147

Préhistoire

- Le site d'Okala, Province de l'Estuaire, Gabon, et son importance pour la compréhension du passage à la sédentarisation en Afrique centrale.
Bernard CLIST 151