

Érosion chimique et mécanique sur le bassin amont du Niger (Guinée, Mali). Bilan géochimique de l'altération en milieu tropical

Chemical and mechanical erosion in the upper Niger basin (Guinea, Mali). Geochemical weathering budget in tropical environment

Jean-Loup BOEGLIN¹, Jefferson MORTATTI² et Yves TARDY³

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

² Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Université de São Paulo, av. Centenario, CP 96, 13400 Piracicaba, Brésil ;

³ Université Louis-Pasteur, Institut de géologie et Centre de géochimie de la surface (CNRS), 1, rue Blessig, 67084 Strasbourg cedex, France

RÉSUMÉ

Soixante-deux prélèvements ont été effectués sur le Niger à Bamako (Mali) au cours des 3 années hydrologiques 1990, 1991 et 1992. Les analyses permettent la reconstitution du bilan géochimique de l'altération, le calcul de l'érosion chimique et mécanique, l'évaluation de la vitesse d'approfondissement d'un profil moyen et la détermination du taux d'abaissement de la surface topographique d'un bassin tropical en période sèche. A titre de comparaison, les mêmes paramètres sont calculés sur les bassins de l'Amazone (Brésil) et du Chari (Tchad).

Mots clés : Érosion mécanique, Érosion chimique, Bilan géochimique de l'altération, Chimie des eaux, Bassin du Niger

ABSTRACT

Seventy-two water samples were collected in the Niger river at Bamako (Mali) during the years 1990, 1991 and 1992. Analyses allow the determination of the geochemical weathering budget, estimation of the rates of chemical erosion, physical erosion and profile thickening for a tropical basin under rather dry climatic conditions. For comparison, the same weathering parameters were determined for the basins of the Amazon (Brazil) and the Chari (Chad).

Keywords: Physical erosion, Chemical erosion, Weathering budget, Hydrogeochemistry, Niger basin

Abridged version (see p. 190)

Introduction

Le bilan géochimique moyen annuel de l'altération et de l'érosion chimique ou mécanique sur l'ensemble d'un bassin versant peut être conduit en combinant les mesures de débits et les valeurs des concentrations d'éléments

dissous et de matières en suspension, étalées tout au long d'un cycle hydrologique (Tardy, 1969 ; Gac, 1980 ; Gac et Tardy, 1980 ; Probst, 1983, 1992 ; Mortatti et al., 1994 ; Tardy et al., 1995).

Les bilans géochimiques présentés ont été établis dans plusieurs stations de trois grands fleuves tropicaux : 1) le

Note présentée par Jean Dercourt

Note remise le 20 janvier 1997, acceptée après révision le 28 avril 1997



bassin du Chari, à l'amont, à la latitude de Sahr et à l'aval, à Ndjamena, peu avant l'exutoire du Lac Tchad ; les données sont celles de Gac (1980) et de Gac et Tardy (1980) ; 2) le bassin de l'Amazone, à l'amont (Vargem Grande) et à l'aval (Obidos) ; les données sont celles du projet CAMREX (Richey et al., 1986 ; Mortatti et al., 1994 ; Tardy et al., 1993a ; Tardy et al., 1993b ; Tardy et al., 1995) ; 3) le bassin amont du Niger, en Guinée et au Mali, en trois stations : l'une sur le Milo à Kankan, l'autre sur le Niger à Siguiri (Orange, 1992) et la troisième sur le Niger à Bamako. Pour ce dernier, pris ici comme exemple de calcul, les bilans sont conduits à partir de 72 analyses d'eau (tableau I) prélevée au cours des trois cycles hydrologiques 1990, 1991, 1992 (Boeglin et Probst, 1996 ; Boeglin et Tardy, 1997).

Tableau I. Composition annuelle moyenne des eaux du Niger à Bamako pour la période 1990-1992.

Annual mean composition of the Niger river waters at Bamako during the period 1990-1992.

(Na ⁺) (K ⁺) Mg ²⁺	(Ca ²⁺) (HCO ₃ ⁻) (Cl ⁻)	(SO ₄ ²⁻) (SiO ₂)	MES	pH
99,7 31,6 41,3	54,4 299,8 8,9	1,9 247,9	24,5	7,30

Concentrations des substances dissoutes (en µmol/L ; S(cations) = 322,7 µéq/L, S(anions) = 312,5 µéq/L ; matières en suspension (MES) en mg/L.

Milieu naturel du bassin amont du Niger

1. Caractéristiques hydroclimatiques

Au cours du siècle écoulé (1907-1993), le débit du Niger à Koulikoro (environ 60 km en aval de Bamako) a beaucoup oscillé autour d'une valeur moyenne de 1 391 m³/s, soit 366 mm/an (Brunet-Moret et al., 1986). De plus, depuis 1970, à la suite d'un assèchement progressif du climat, l'écoulement n'a cessé de diminuer (figure 1). Pour les 3 années considérées (1990, 1991 et 1992), le débit moyen annuel est de 735 m³/s, soit 198 mm/an (annuaires DNHE), pour une superficie de 117 000 km² à Bamako. Sur l'ensemble du bassin amont, la pluviosité correspondant à ce débit est estimée à 1 300 mm/an, l'évapotranspiration à 1 100 mm/an, tandis que la température moyenne annuelle est de 26,7 °C (d'après Boulvert, 1992).

2. Géomorphologie

Deux grandes zones sont distinguées en amont de Bamako.

1) La zone haute couvre les reliefs du Fouta Djallon et de la Dorsale Guinéenne, où le Niger et ses affluents prennent leur source. Cette zone, limitée par l'altitude 450 m, correspondant à une nette rupture de pente sur le profil en long du Niger tracé par Brunet-Moret (1986), occupe 35 % de la superficie du bassin amont. Le climat y est

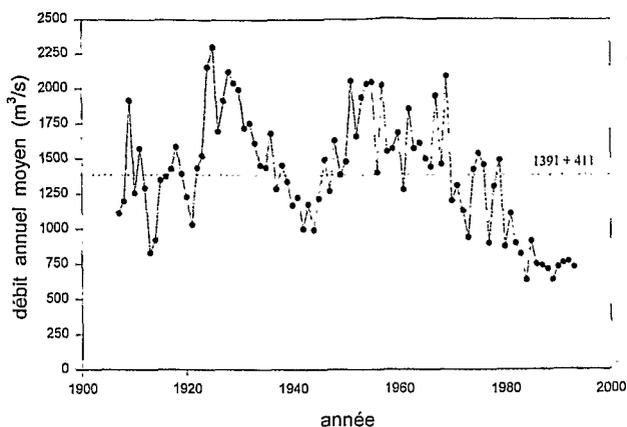


Figure 1. Variations du débit annuel moyen du Niger à Koulikoro.

Variations of the annual mean discharge of the Niger river at Koulikoro.

tropical humide (type guinéen forestier, précipitations P = 1 700 mm/an) et les pentes sont relativement fortes (0,6 %). Dans ce haut bassin, l'altération chimique domine et la sédimentation est peu représentée.

2) La zone basse, correspondant aux plaines alluviales de la Guinée du Nord-Est et du Mali méridional, aux altitudes comprises entre 450 et 320 m, occupe 65 % de la superficie du bassin considéré. Le climat apparaît progressivement plus sec et plus contrasté vers l'aval (type sud-soudanien, P = 1 100 mm/an). Les pentes sont très faibles : entre Siguiri et Bamako par exemple, la pente est de 0,013 %. Dans les plaines aval, coexistent altération et sédimentation. Les caractères physiographiques moyens de ces deux zones, ainsi que ceux de l'ensemble du bassin amont, sont récapitulés dans le tableau II.

3. Nature du substratum

Le substratum est essentiellement constitué de granites dans la zone haute, et de schistes métamorphiques dans la zone basse ; ces deux types de roches, d'âge Birrimien, ont été affectés par l'orogénèse éburnéenne (Bessoles, 1977 ; Milesi et al., 1986). Dans la partie septentrionale, apparaissent des formations sédimentaires, surtout gréseuses, d'âge Précambrien supérieur, de la bordure du bassin de Taoudéni (Bassot et al., 1981). Les formations du socle et de la couverture peuvent être intrudées par des dolérites permienues ou triasiques (Dillon et Sougy, 1974). Nous avons déterminé la fréquence des différents types de roches sur l'ensemble du bassin amont : 58,0 % de granites, 29,7 % de schistes métamorphiques, 4,4 % de dolérites, 3,6 % de grauwackes, 2,3 % de grès, 1,9 % de roches vertes. La composition de la roche mère moyenne, estimée à partir des données de Blanchot (1958), se trouve dans le tableau III. Nos calculs montreront, par ailleurs, que les roches sédimentaires ne sont que faiblement représentées dans ce bassin.

Tableau II. Caractères physiographiques moyens du bassin amont du Niger en amont de Bamako.*Physiographical mean features of the upper Niger basin.*

	Superficie	Altitude	Pente topo	Pluviométrie	Écoulement
Zone haute	41 000(35 %)	580 (450-950)	5	1 700	600
Zone basse	76 000(65 %)	390 (320-450)	0,3	1 100	–
Bassin amont	117 000(100 %)	460	1,2	1 300	198

Superficies (en km²) ; altitudes (en m) ; pentes (en 10⁻³) ; pluviométries et écoulements (en mm/an) correspondant à l'année moyenne 1990-1993.

Bilan géochimique de l'altération et de l'érosion sur le bassin amont du Niger

1. Méthode de calcul

La démarche, menée de façon conventionnelle en sept étapes, se réfère à la méthode utilisée par Garrels et Mackenzie (1971), Velbel (1985) et Drever (1997).

À partir de la composition chimique moyenne annuelle de l'eau du Niger (tableau I), on retrouve par calcul la norme de la roche moyenne du bassin, altérée dans 1 litre d'eau d'écoulement. Pour ce faire, on utilise les rapports molaires $R_1 = Ca/Na = 0,575$ et $R_2 = Mg/Na = 0,304$, déterminés à partir de nombreuses analyses d'eau de différents bassins cristallins (Feth et al., 1964 ; Tardy, 1969, 1971 ; Drever, 1997). Sur la base de ces rapports caractéristiques R_1 et R_2 et après déduction de la part de Na lié à NaCl et de Ca lié à CaSO₄ (apports atmosphériques ou dissolution d'évaporites sédimentaires), on parvient à calculer le nombre de moles des minéraux représentant la norme de la roche soumise à l'altération. Na restant après correction provient alors en totalité de l'albite NaSi₃AlO₈. K se partage entre le microcline KSi₃AlO₈ et le mica ferreux annite KFe₃Si₃AlO₁₀(OH)₂ ; la distribution calculée pour K₂O = 2,4 % et FeO = 3,5 % dans la roche mère moyenne (tableau III) correspond respectivement à 32 % et 68 % molaires d'annite et de microcline. Ca restant a pour origine l'anorthite CaSi₂Al₂O₈ et la calcite CaCO₃. Mg est réparti entre la gédrite Mg₄Al₆Si₅O₂₂(OH)₂ et la magnésite MgCO₃ entrant dans la composition de la dolomite CaMg(CO₃)₂. Le fer, l'aluminium et le quartz de la roche saine se retrouvent intégralement dans le profil d'altération.

Le rapport molaire Re, calculé à partir des concentrations dans les eaux, caractérise le type d'altération dominant (Tardy, 1968, 1969) ; cette méthode complète les travaux de Pédro (1966, 1968) dont elle s'est inspirée.

$$Re = \frac{3(Na^+) + 3(K^+) + 1,25(Mg^{2+}) + 2(Ca^{2+}) - (SiO_2 \text{ dans les eaux})}{0,5(Na^+) + 0,5(K^+) + 0,75(Mg^{2+}) + 1(Ca^{2+})}$$

Re = SiO₂/Al₂O₃ dans les produits d'altération ;

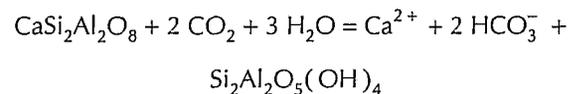
Re < 2 lorsque la gibbsite apparaît dans les profils ;

Re > 2 lorsque se forme aussi la smectite ;

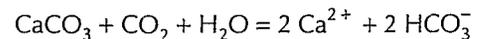
Re = 2 lorsque prédomine la kaolinite ou que les proportions de gibbsite et de smectite entre l'amont et l'aval sont comparables.

La pression partielle de CO₂ équivalente dans les solutions qui percolent dans les profils est calculée par la relation $\log fCO_2 = 7,84 + \log (HCO_3^-) - pH$, à 25 °C (Stumm et Morgan, 1981).

La consommation de CO₂ par altération dépend de la proportion des silicates et des carbonates présents dans les roches du bassin (Probst et al., 1994). L'altération d'une mole d'anorthite, par exemple, consomme 2 moles de CO₂ pour libérer 2 moles de HCO₃⁻ :



L'altération d'une mole de calcite ne consomme qu'une mole de CO₂ et libère 2 moles de HCO₃⁻ :

**Tableau III. Composition estimée du substratum moyen et composition calculée de la roche soumise à l'altération sur le bassin du Niger en amont de Bamako.***Estimated composition of the mean substratum and calculated composition of the rock in the process of weathering on the Niger basin upstream of Bamako.*

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	TiO ₂	PF	NaCl	CaSO ₄	Somme
Estimé	68,3	14,6	3,9	3,8	2,4	1,7	2,5	0,5	1,5	–	–	99,2
Calculé	66,8	16,9	3,0	3,5	1,9	2,1	3,7		1,2	0,6	0,3	100,0

Teneurs en % pondéraux ; PF, perte à 1 000 °C ; teneur moyenne estimée en quartz = 29,0 %.

Dès lors que le bassin comporte des formations calcaires ou dolomitiques, il n'y a pas de stricte équivalence entre le nombre de moles de bicarbonate présentes dans les eaux de drainage et celui de gaz carbonique consommé au cours des processus d'altération.

La vitesse d'érosion mécanique V_m (m/Ma) est déterminée à partir de la concentration des matières en suspension dans les eaux. Rapportée à 1 m^3 de sol et pour un drainage D (mm/an), la quantité de matière érodée mécaniquement chaque année par des eaux ayant une charge en suspension MES (mg/L) est de $D \cdot \text{MES}$ (mg). Pour un sol de densité moyenne 2,0, la vitesse d'érosion sera donc $2 \cdot 10^9 / D \cdot \text{MES}$ (années/m), ou $V_m = D \cdot \text{MES} / 2 \cdot 10^3$ (m/Ma). La valeur calculée de la sorte est la vitesse de décapage à la surface du profil, le principal agent d'érosion mécanique étant ici les eaux du ruissellement.

La vitesse d'érosion chimique V_{ch} (m/Ma) est calculée à partir de la norme de la roche soumise à l'altération et des concentrations évacuées en solution. La norme déterminée précédemment (moles/L) est convertie en concentrations molaires M_m des différents minéraux correspondant à 1 m^3 de roche, d'une densité supposée égale à 2,6. Cette opération nécessite la prise en compte de la teneur en quartz, qui est estimée à partir de la lithologie du bassin. On fait, en effet, l'hypothèse que le quartz primaire ne se dissout pas et se retrouve intégralement dans le profil d'altération (Tardy, 1969). Des valeurs de M_m sont alors déduites les concentrations molaires M_x des différents éléments (cations, silice, alumine), libérés par l'hydrolyse de 1 m^3 de roche. Par ailleurs, la quantité de l'élément x lessivée annuellement par m^3 de roche est égale au produit de sa concentration en solution C_x (moles/l) par l'intensité du drainage D (mm/an). La vitesse de l'altération déterminée à partir de cet élément x sera donc $M_x / C_x \cdot D$ (années/m), ou $V_{ch} = C_x \cdot D \cdot 10^6 / M_x$ (m/Ma). Cette valeur, identique quelle que soit l'espèce soluble considérée (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , sauf la silice, dont une partie est immobilisée dans le profil sous forme de kaolinite), caractérise la vitesse d'enfoncement du front de l'altération chimique à la limite roche-lithomarge. Dans cette zone située à la base du profil, l'altération est essentiellement le fait des eaux de percolation qui rejoignent la nappe.

La vitesse d'épaississement du profil $V_{ép}$ est la différence entre la vitesse de l'altération chimique, à la base, et de l'érosion mécanique, au sommet : $V_{ép} = V_{ch} - V_m$ (m/Ma). L'obtention d'une valeur négative pour $V_{ép}$ signifierait que le profil est plus rapidement décapé en surface qu'il ne se reconstitue en profondeur aux dépens de la roche mère. Si les conditions pour lesquelles ont été calculées V_{ch} et V_m se prolongent, un tel profil d'altération est appelé à régresser peu à peu, puis à disparaître complètement. Au contraire, si $V_{ép}$ est positif, le profil s'épaissit, l'altération chimique l'emportant alors sur l'ablation mécanique.

2. Résultats et discussion

L'ensemble des résultats obtenus en appliquant les méthodes ci-dessus aux données disponibles sur le Niger amont,

sur le Chari ou sur l'Amazone figurent dans les tableaux IV et V.

Le calcul de la norme de la roche soumise à l'altération est tout d'abord mené, à partir des données disponibles sur le bassin supérieur du Niger, dont la lithologie et la composition du substratum moyen sont bien connus. On rappelle que, dans les normes obtenues (tableau IV), les teneurs en NaCl et en CaSO_4 représentent ce qui provient des eaux de pluies, ainsi que de la dissolution des évaporites dans les dépôts sédimentaires. Après correction de ce qui revient aux évaporites, aux roches carbonatées et aux grès (présents entre Siguiri et Bamako), on peut déterminer pour la roche altérée restante la norme suivante : albite = 30,9 %, microcline = 8,6 %, annite = 7,0 %, anorthite = 14,5 %, gédrite = 10,0 %, quartz = 28,9 % (considéré comme insoluble). Cette composition moyenne des 3 bassins considérés correspond à l'altération du socle, dont on sait par ailleurs qu'il est essentiellement constitué de granites et de schistes métamorphiques. La composition moyenne de la fraction sédimentaire (carbonates, évaporites, quartz détritique) est par ailleurs déterminée et, pour chaque bassin, sont récapitulés les pourcentages de roches du socle et de roches sédimentaires (tableau IV). Pour tester la validité de cette méthode, on a comparé la composition chimique calculée pour la roche altérée (teneur en quartz supposée = 29,0 %) à la composition estimée du substratum moyen correspondant toutes deux au bassin en amont de Bamako (tableau III). Les écarts, assez faibles dans l'ensemble, sont imputables à la différence d'altérabilité des minéraux de la roche mère : ainsi, le léger excédent de calcium observé pour la roche altérée traduit-il probablement la présence d'un peu de calcaire dans le substratum qu'on avait supposé au départ non carbonaté.

La lithologie et la composition du substratum n'étant pas connues avec précision pour le bassin du Chari et encore moins pour celui de l'Amazone, on a été amené à procéder en quatre étapes : 1) détermination de la norme du socle cristallin soumis à l'altération, dans le cas d'une teneur en quartz de 28,9 % correspondant à la moyenne retenue pour le socle du bassin amont du Niger ; 2) calcul de la teneur théorique en quartz dans ce socle reconstitué, sur la base des proportions entre minéraux dans le socle moyen du bassin amont du Niger ; 3) détermination de la composition de la fraction sédimentaire, comprenant des minéraux carbonatés, évaporitiques et éventuellement du quartz (normatif), lorsque sa teneur théorique dépasse 28,9 % dans le socle ; 4) calcul des contributions relatives du socle et des roches sédimentaires (le quartz détritique étant considéré comme le seul constituant des grès).

Sur le bassin du Chari, on trouve dans le socle une teneur théorique en quartz de 24,4 % (soit dans la roche totale une teneur $qz = 23,1$ %) pour l'amont, et de 22,3 % ($qz = 20,8$ %) pour l'aval. Le socle de ces deux bassins s'avère donc légèrement moins riche en quartz que celui du bassin supérieur du Niger (28,9 %) pris comme référence. Par ailleurs, la contribution des roches sédimentaires, ici uniquement carbonatées, est minime (ta-

Tableau IV. Norme de la roche soumise à l'altération pour différents bassins de la zone tropicale.

Norm of rocks in the process of weathering for different basins of the tropical zone.

Bassin versant	Norme socle						Norme sédiment					Contribution	
	Quartz	Albite	Microcl.	Annite	Anorth.	Gédrite	CaCO ₃	MgCO ₃	NaCl	CaSO ₄	Quartz	%socle	%sédim.
Milo (Guinée)	28,3	31,4	8,7	5,8	17,1	8,6	15,4	20,5	64,1	0	0	97	3
Niger (Siguiriri)	30,3	29,7	9,2	8,4	9,8	12,6	45,3	27,3	24,8	2,6	0	92	8
Niger (Bamako)	28,2	31,5	7,9	6,8	16,7	8,9	20,4	15,7	14,1	7,8	42,0	94	6
Chari amont	28,9	31,2	9,2	6,0	14,1	10,7	71,0	29,0	0	0	0	95	5
Chari aval	28,9	31,2	10,0	5,4	13,4	11,0	74,1	25,9	0	0	0	93	7
Amazone amont	28,9	30,2	10,7	9,3	2,9	17,9	52,4	3,8	52,4	3,8	11,9	45	55
Amazone aval	28,9	24,0	15,9	13,7	0	17,4	45,6	5,4	45,6	5,4	15,0	51	49

Les quantités de minéraux sont données en pourcentages pondéraux du socle et du sédiment ; %socle et %sédim. représentent les proportions du socle (granites, schistes métamorphiques) et de roches sédimentaires (carbonates, évaporites, grès) dans l'altération ; le quartz du sédiment est un quartz normatif.

Tableau V. Comparaison des paramètres de l'altération pour différents bassins de la zone tropicale.

Comparison of weathering parameters for different basins of the tropical zone.

	Réf.	S	Q	Pente	log fCO ₂	CO ₂ alt.	Re	Quartz	Vméca.	Vchim.	Vépais.
Milo (Guinée)	(1)	9,6	437	3,4	-3,02	277	2,09	27,5	11,2	12,4	1,3
Niger (Siguiriri)	(1)	67,6	261	1,8	-2,93	246	2,14	27,7	6,0	6,2	0,2
Niger (Bamako)	(2)	117	198	1,2	-2,98	296	1,91	29,0	2,4	6,1	3,6
Chari amont	(3)	330	123	0,9	-2,50	432	2,09	23,1	4,9	4,7	-0,2
Chari aval	(3)	600	63	0,4	-2,74	466	1,84	20,8	2,4	2,5	0,1
Amazone amont	(4)	1 135	1 216	3,9	-2,55	584	2,14	19,8	273	57	-216
Amazone aval	(4)	4 619	1 074	2,0	-2,33	270	1,49	25,5	128	26	-102

Références pour les paramètres physiographiques : (1) Orange (1992) ; (2) Boeglin et Probst (1996) ; (3) Gac (1980) ; (4) Tardy et al. (1995) ; S, superficies en (10³ km²) ; Q, drainages (en mm/an) ; pentes en (10⁻³) ; CO₂ consommé par altération chimique en µmol/L ; quartz (en %) dans la roche totale (estimé pour le bassin amont du Niger, normatif pour les bassins du Chari et de l'Amazone) ; vitesses d'érosion mécanique, d'altération chimique et d'épaississement du profil (en m/Ma).

bleau IV). Sur le bassin de l'Amazone, on obtient une teneur théorique en quartz dans le socle de 44,2 % (soit qz = 19,8 %) à Vargem Grande, et de 48,3 % (qz = 24,5 %) à Obidos. L'excédent de quartz par rapport au socle du bassin amont du Niger est attribué à l'existence d'importantes formations gréseuses ou sableuses dans le bassin de l'Amazone, où l'on a vu par ailleurs que les dépôts calcaires sont également très bien représentés.

Le rapport Re, calculé à partir des seuls minéraux silicatés, montre dans l'ensemble une tendance à la kaolinisation (tableau V). Les valeurs de Re, généralement plus faibles à l'aval qu'à l'amont où le drainage est pourtant plus élevé, peuvent être imputées à des différences de lithologie : dans le cas de l'Amazone où un tel contraste est particulièrement marqué, les roches sont plus carbonatées dans les Andes et plus quartzieuses dans les plaines alluviales de l'aval.

La pression partielle de CO₂ équivalente dans les sols a ici des valeurs 3 à 15 fois supérieures à celle de l'atmosphère (logfCO₂ = -3,5) ; elle apparaît de plus en plus élevée quand on passe du bassin du Niger supérieur à

celui du Chari, puis à celui de l'Amazone (tableau V). Aussi bien entre ces différentes régions qu'au sein d'un même bassin, ces valeurs traduisent les variations de la densité du couvert végétal, d'autant plus abondant que le climat est plus humide.

La consommation de CO₂ par l'altération (après correction des carbonates) présente les caractéristiques suivantes : une valeur moyenne beaucoup plus élevée pour l'Amazone, et surtout le Chari, que pour le Niger supérieur ; une très nette diminution entre Vargem Grande et Obidos, alors que les valeurs entre amont et aval apparaissent assez homogènes sur les bassins africains considérés (tableau V). La consommation de CO₂ calculée ici rend compte de l'intensité de l'érosion chimique, considérée indépendamment du drainage.

La vitesse d'érosion mécanique présente une très forte variabilité, les valeurs obtenues sur l'Amazonie - zone extrêmement humide - étant de loin les plus élevées (tableau V). Pour chacun des cours d'eau considérés, cette vitesse décroît très nettement de l'amont vers l'aval. Cela s'explique par le fait que deux facteurs dominants de

l'altération mécanique, la morphologie et le drainage, vont ici dans le même sens. Dans les zones montagneuses où ces rivières prennent leur source, les pentes sont plus fortes et l'écoulement plus élevé que dans les plaines alluviales en aval.

La vitesse d'érosion chimique apparaît nettement reliée à l'intensité du drainage (tableau V) ; ont été prises dans le calcul les teneurs en quartz dans la roche totale, estimées précédemment pour les bassins amont et aval du Chari et de l'Amazone. Les très fortes vitesses obtenues à Obidos et surtout à Vargem Grande sont certainement dues, outre le drainage élevé, à l'altération des roches carbonatées abondantes en Amazonie.

La vitesse d'épaississement, obtenue à partir des deux paramètres précédents, témoigne d'un développement des profils sur le haut bassin du Niger, d'une stagnation sur le bassin du Chari, mais d'une vigoureuse régression de ces profils – à cause de la pente – en amont comme en aval du bassin de l'Amazone (tableau V). En règle générale, il apparaît que, si l'érosion mécanique et l'altération chimique sont toutes deux favorisées par une augmentation du drainage, la première l'emporte nettement sur la seconde dès lors que la pente est forte.

Si le calcul de la vitesse d'épaississement des profils est pleinement valide dans le cas de roches granito-gneissiques présentant des teneurs en quartz comparables (ici 29 %), il peut être remis en cause dans trois cas : a) s'il s'agit de roches gréseuses dans lesquelles la fraction hy-

drolisable n'est pas connue, l'erreur est faite sur la vitesse d'approfondissement du profil ; b) s'il s'agit de calcaires comportant une fraction argileuse non déterminée, l'erreur concerne la vitesse d'érosion mécanique ; c) s'il s'agit de roches argileuses (*shales*), le calcul des vitesses n'a de sens que lorsque les minéraux argileux primaires ont été dosés dans les suspensions (Konta, 1990).

Conclusion

On a proposé un protocole de calcul des vitesses d'érosion chimique et mécanique, applicable à des bassins versants de tailles, de morphologies, de lithologies diverses et soumis à des climats variés (semi-aride à très humide). En même temps, sont déterminés la norme de la roche soumise à l'altération, la nature des argiles dominantes formées dans les sols (rapport Re), l'agressivité chimique du climat ($f\text{CO}_2$ équivalent) et le bilan du gaz carbonique consommé par altération chimique. Une telle investigation sera poursuivie plus avant et débouchera sur un modèle d'évaluation de l'érosion du paysage tropical pour des substratums, des pentes ou des drainages différents. Il sera appliqué pour estimer les variations de l'érosion à la surface des continents africain et sud-américain depuis 150 Ma, c'est-à-dire depuis l'ouverture de l'Atlantique.

ABRIDGED VERSION

An estimation of the mean annual weathering budget on a given basin, independent of its size, can be performed by using runoff water compositions and discharge values during complete hydrological cycles (Tardy, 1969; Gac, 1980; Probst, 1992; Mortatti et al., 1994; Tardy et al., 1995). The mechanical erosion is related to the suspended material, while the chemical erosion is dependent on the dissolved species concentrations. Such budgets have been calculated here from results available on different stations of the Chari basin in Chad (Gac, 1980), the Amazon basin in Brazil (Mortatti et al., 1994; Tardy et al., 1995) and the upper Niger basin in Guinea and Mali (Boeglin and Probst, 1996; Boeglin and Tardy, 1997). Seventy-two samples collected during three hydrological years make the data on the Niger basin rather precise, so that this sampling is chosen here as an example of calculation.

The mineralogical composition (norm) of the fresh and of the weathered bedrock is determined, as well as the contribution from alteration of the crystalline and sedimentary rocks. The sedimentary contribution appears dominant only in the Amazon basin; limestones are widespread in the Andean zone, sandstones are more abundant in the alluvial plains, whereas granitic shields dominate in the lower part. The Niger and Chari basins in contrast involve a large contribution from crystalline rocks.

The values of the geochemical ratio Re (Tardy, 1969), between 1.5 and 2.2, show that kaolinite is the dominant clay mineral presently formed in the soil profiles; deviations are related to lithology more than to drainage variations. The CO_2 partial pressure equivalent in soils, where it is about 3 to 15 times higher than in the atmosphere, is particularly high in the Amazon basin, under a thick vegetation cover corresponding to a very humid climate. In areas where sediments, and particularly limestones, are absent, the CO_2 concentrations consumed by alteration ($\mu\text{mol/L}$) decreasing from the Chari (arid, $Q_t = 123 \text{ mm/y}$) to the Niger basins (less arid, $Q_t = 198 \text{ mm/y}$), reflect the chemical weathering intensity, independently of the drainage. However, the total amount of CO_2 consumed increases significantly from the Chari to the Niger and to the Amazon basins. The mechanical erosion rate is in close correlation with the runoff, the slope and the lithology (rock erodibility). Thus, the highest values are obtained for the Amazon basin, with smaller rates for its lower part and higher rates for its upper part, more steeply sloped and richer in sedimentary including carbonate rocks. The chemical erosion rate can be mainly related to the drainage and to the alterability of the constituting minerals, while slope does not play a significant role. The thickening rate, which is the difference between the chemical weathering and the mechani-

cal erosion rates, attests that the profiles continue to develop in the upper Niger basin (3.6 m/My upstream of Bamako), stagnate in the Chari area, and strongly decrease in the upper as in the lower Amazon basin (-216 and -102 m/My, respectively). Weathering budgets have been determined for other tropical basins, presenting variable morphology, lithology and very

different hydrological and climatic conditions. Characteristic parameters (CO_2 consumption, Re, alteration rates) could be calculated from these budgets. Such a method will be developed and applied to estimate the variations of these parameters for African and South-American great basins during the last 150 My, i.e. since the opening of the Atlantic Ocean.

Remerciements : Les auteurs remercient J.J. Drever, professeur à l'Université de Laramie, Wyoming, États-Unis, pour ses critiques pertinentes.

RÉFÉRENCES

- Bassot J.P., Meloux J. et Traoré H. 1981. *Carte géologique au 1 500 000^e de la République du Mali (avec notice, 137 p.)*, Dir. Nat. Géologie et Mines, Bamako
- Bessoles B. 1977. Géologie de l'Afrique. Le cratón ouest-africain, *Mém. BRGM*, 88, 402 p.
- Blanchot A. 1958. *Bull. Serv. Géologie et Prospection minière, Dakar* 27, 280 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)
- Boeglin J.L. et Tardy Y. 1997. Érosion chimique et mécanique sur le bassin amont du Niger (Guinée, Mali). Découpage d'hydrogramme en quatre écoulements, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 325, série Ila, 125-131
- Boulvert Y. 1992. Éléments d'atlas climatologique de la région guinéenne et péri-guinéenne, *Rapp. ORSTOM, Bondy* 16 p. + 23 cartes
- Brunet-Moret Y., Chaperon P., Lamagat J.P. et Molinier M. 1986. Monographie hydrologique du fleuve Niger. Tome I : Niger supérieur, *Monographies hydrologiques ORSTOM*, 8, 396 p.
- Dillon W.P. et Sougy J.M.A. 1974. Geology of West Africa and Canary and Cape Verde islands, *In: The ocean basins and margins, New York* 2, 315-390
- DNHE. *Annuaire hydrologiques du Mali*. Dir. Nat. Hydraulique et Énergie, Bamako
- Drever J.I. 1997. *The geochemistry of natural waters. Surface and groundwater environments*. 3rd édition, Prentice Hall, New Jersey, USA, 436 p.
- Feth J.H., Robertson C.E. et Polzer W.L. 1964. Sources of mineral constituents in water from granitic rocks, Sierra Nevada, California and Nevada, *U.S. Geol. Surv., Water Supp. Paper* 1535-i, 70 p.
- Gac J.Y. 1990. Géochimie du bassin du Lac Tchad. Bilan de l'altération, de l'érosion et de la sédimentation. *Trav. Doc. ORSTOM, Paris*, 23, 251 p.
- Gac J.Y. et Tardy Y. 1980. Géochimie d'un paysage tropical. Le bassin du Lac Tchad, *In: Géochimie des interactions entre les Eaux, les Minéraux et les Roches*. Tardy Y. (ed), Éléments, Tarbes, 199-239
- Garrels R.M. et Mackenzie F.T. 1971. *Evolution of sedimentary rocks*, Norton W. and Co. Inc., New York, 397 p.
- Konta J. 1990. Minerals in clay fraction of soils, rivers and detrital sediments: unity of relation, *In: Proc. 9th Intern. Clay Conf.*, Strasbourg, 1989, Farmer V.C. and Tardy Y. (eds). *Sci. Géol., Mém., Strasbourg*, 85, 1, 79-88
- Milesi J.P., Diallo M., Feybesse J.L., Keyta F., Ledru P., Vinchon C. et Dommangeat 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, Publi. occasionnelle*, 10, 113-181
- Mortatti J., Probst J.L. et Tardy Y. 1994. Avaliação de escoamento superficial na Bacia Amazônica através do transporte de material fluvial, *Geochim. Brasil.*, 8(2), 235-243
- Orange D. 1992. Hydroclimatologie du Fouta Djallon et dynamique actuelle d'un vieux paysage latéritique, *Sci. Géol., Mém., Strasbourg*, 93, 198 p.
- Pédro G. 1966. Intérêt géochimique et signification minéralogique du paramètre moléculaire $KI = \text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ dans l'étude des latérites et bauxites, *Bull. Gr. Fr. Argiles*, 18, 19-31
- Pédro G. 1968. Distribution des principaux types d'altération chimique à la surface du globe. Présentation d'une esquisse géographique, *Revue Géogr. Phys. Géol. Dyn., Paris*, 10(5), 457-470
- Probst J.L. 1983. Hydrologie du bassin de la Garonne, modèle de mélanges, bilan de l'érosion, exportation de phosphates et de nitrates, *Thèse 3^e cycle*, Univ. Paul Sabatier, Toulouse, 148 p.
- 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, 167 p.
- Probst J.L., Mortatti J. et Tardy Y. 1994. Carbon river fluxes and weathering CO_2 consumption in the Congo and Amazon river basins, *Applied Geochem.*, 9, 1-13
- Richey J.E., Meade R.H., Salati E., Deval A.H., Nordin C.F. jr et Dos Santos U. 1986. Water discharge and suspended sediment concentrations in the Amazon river : 1982-1984, *Water Resources Research*, 22(5), 756-764
- Stumm W. et Morgan J.J. 1981. *Aquatic chemistry*, Wiley, New York, 780 p.
- Tardy Y. 1968. Une méthode de détermination des types d'altération actuels par l'étude des eaux en pays granitiques et gneissiques, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 267, série D, 579-582
- 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*, 31, 199 p.
- Tardy Y. 1971. Characterization of the principal weathering types by the geochemistry of waters from some european and african crystalline massifs, *Chem. Geol.*, 7, 253-271
- Tardy Y., Mortatti J. et Probst J.L. 1995. Érosion chimique et mécanique dans le bassin de l'Amazone. Evaluation du ruissellement par la méthode dite des réservoirs à contribution variable mais à composition constante, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 320, série Ila, 853-860
- Tardy Y., Mortatti J., Victoria R., Martinelli L., Ribeiro A., Cerri C., Piccolo M., Leite de Moraes J., Probst J.L., Andreux F. et Volkoff B. 1993. Hydroclimatologie and biochemistry of the Amazon. 1. Erosion, *Chem. Geol.*, 107, 333-336
- Tardy Y., Mortatti J., Victoria R., Martinelli L., Ribeiro A., Cerri C., Piccolo M., Leite de Moraes J., Probst J.L., Andreux F. et Volkoff B. 1993. Hydroclimatologie and biochemistry of the Amazon. 2. Geochemical cycles, *Chem. Geol.*, 107, 411-414
- Velbel M.A. 1985. Geochemical mass balances and weathering rates in forested watersheds of southern Blue Ridge, *Amer. Journ. Sci.*, 285, 904-930

COMPTES RENDUS DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES

SCIENCES DE LA TERRE ET DES PLANÈTES

EARTH & PLANETARY SCIENCES

1997 — Tome 325 — Série II a — N° 3

Le point sur...

- Cathodoluminescence et géosciences.

Vincent BARBIN et Max SCHVOERER 157

Géophysique interne

- Structure crustale du bloc cadomien de Bretagne Nord (France) : sismique réflexion verticale et sondage magnétotellurique (projet GéoFrance 3D - Armor).

Adnand BITRI, Jean-Pierre BRUN, Jean CHANTRAINE, Pol GUENNOG, Guy MARQUIS, Jean-Michel MARTHELOT, José PERRIN, Frédéric PIVOT et Catherine TRUFFERT 171

Géomatériaux (Sédimentologie)

- La carbonatogenèse bactérienne dans les grottes. Étude au MEB d'une hélictite de Clamouse, Hérault, France.

Gaële Le MÉTAYER-LEVREL, Sabine CASTANIER, Jean-François LOUBIÈRE et Jean-Pierre PERTHUISOT 179

Géosciences de surface

- Érosion chimique et mécanique sur le bassin amont du Niger (Guinée, Mali). Bilan géochimique de l'altération en milieu tropical.

FDO Jean-Loup BOEGLIN, Jefferson MORTATTI et Yves TARDY 185

(Paléoclimatologie)

- Comparaison entre les lamines luminescentes et les lamines visibles annuelles de stalagmites.

Dominique GENTY, Andy BAKER et William BARNES 193

Océanographie

- Comparaison des données altimétriques Topex-Poséidon en Méditerranée avec un modèle de circulation générale.

Mounir BENKIRAN, Pierre DE MEY et Nadia AYOUB 201

Stratigraphie

- Le Jurassique de la Chaîne côtière (Jibal As-Sahilyeh) de Syrie : essai de biozonation par les grands foraminifères.

Mikhail MOUTY 207

Tectonique

- Gravity-induced recumbent folds and low-angle normal faults in the Alpujarras region (Betic Cordilleras, Spain): indications of Miocene extensional tectonics in the western Mediterranean.

Miguel OROZCO, Francisco M. ALONSO-CHAVES et Fernando NIETO 215

Paléontologie (Paléobotanique)

- Découverte d'une flore à Ptéridophytes et Gymnospermes dans le Crétacé inférieur de la région de Tataouine (Sud tunisien).

Georges BARALE, Marc PHILIPPE, Beya TAYECH-MANNAI et Mohamed ZARBOUT . 221

(Micropaléontologie)

- Un exemple de spéciation lié à l'eustatisme : l'apparition précoce de *Schackoia cabri* (foraminifère planctonique mésogéen).

Françoise MAGNIEZ-JANNIN, Jean-Gabriel BRÉHÉRET et Gérard DELANOY 225

(Paléontologie humaine)

- UR 501, the Plio-Pleistocene hominid from Malawi. Analysis of the microanatomy of the enamel.

Fernando V. RAMIREZ ROZZI, Tim BROMAGE et Friedemann SCHRENK 231