

UNE MESURE DE L'ÉROSION HYDRIQUE MÉCANIQUE ET CHIMIQUE SUR UN PETIT BASSIN VERSANT GRÉSEUX EN ZONE TROPICALE SOUDANIENNE : LE CAS DU DOUNFING, MALI.

Jean Philippe Droux*, Michel Mietton*, Jean Claude Olivry**

* Centre d'études et de recherches éco-géographiques (Cereg), UMR 7007 CNRS, Université Louis Pasteur, 3 rue de L'Argonne, 67083 Strasbourg Cedex, France.
Email : droux@geographie.u-strasbg.fr

** Institut de recherche pour le développement (IRD), BP5045, 34032 Montpellier Cedex 1, France.

RESUME

En 1994 et 1995, 247 échantillons ont été collectés dans les eaux du Dounfing (Mali), qui draine un bassin-versant gréseux de 17,5 km². Les analyses effectuées et le suivi des débits durant ces deux années hydrologiquement très contrastées ont permis de calculer les flux pour les principales espèces dissoutes (par ordre décroissant : HCO₃⁻ >> SiO₂ > Mg²⁺ > Ca²⁺ > Na⁺ > Cl⁻ > K⁺ > SO₄²⁻ > NO₃⁻), et les flux de matières en suspension. Le flux spécifique de TDS, caractéristique de l'intensité de l'altération chimique, est de 27 t.km⁻².an⁻¹ en 1994 et de 11 t.km⁻².an⁻¹ en 1995. La forte teneur en magnésium s'expliquerait par la présence, en profondeur, de sills de dolérite. Le flux spécifique de matières particulaires, révélateur de l'intensité de l'érosion hydrique mécanique à cette échelle, varie de 38 t.km⁻².an⁻¹ en 1994 à 3 t.km⁻².an⁻¹ en 1995.

Mots clés : Mali, Afrique tropicale, Bassin versant, Hydrologie, Grès, Flux particulaires, Chimie des eaux, Flux dissout.

ABSTRACT

During the period 1994-1995, 247 samples were collected in the waters of Dounfing river (Mali) which drain a small sandstony basin (17,5 km²). The samples analysis and the discharge measurement allowed us to calculate fluxes of different solute elements (in decreasing order : HCO₃⁻ >> SiO₂ > Mg²⁺ > Ca²⁺ > Na⁺ > Cl⁻ > K⁺ > SO₄²⁻ > NO₃⁻) and of suspended matter. The specific flux of TDS is estimated to 27 t.km⁻².year⁻¹ in 1994 and 11 t.km⁻².year⁻¹ in 1995.

The high concentration of magnesium could be explained by doleritic sills included in the sandstony bedrock of the catchment. The suspended sediment yield, wich characterizes the mechanical erosion rate at this scale, is estimated to 38 t.km⁻².year⁻¹ in 1994 and 3 t.km⁻².year⁻¹ in 1995.

Key-words : Mali, tropical Africa, catchment, hydrology, sandstone, particular fluxes, hydrochemistry, dissolved fluxes.

1. INTRODUCTION

Dans le cadre du programme EQUANIS (Environnement et Qualité des Apports du Niger au Sahel et, plus largement, du Projet sur l'Environnement de la Géosphère Intertropicale (PEGI), des chercheurs de l'IRD et du CNRS ont mesuré les flux hydriques, les flux de matières solides en suspension et en solution sur le bassin supérieur du Fleuve Niger au Mali. Les données, collectées sur plusieurs années hydrologiques, ont permis de bien caractériser l'érosion hydrique mécanique et chimique à l'échelle de ce grand bassin dans des contextes hydropluviométriques contrastés.

En revanche, il n'existe dans cette région d'Afrique que très peu de données concernant l'érosion et les transports solides sur **petits bassins versants**, notamment sur **substratum gréseux**. Cet article présente les résultats obtenus sur les flux de matières solides (aspects quantitatif et qualitatif de la dégradation) sur un tel type d'unité hydrologique : le bassin du Dounfing au Mali, qui couvre une superficie de 17,5 km².

2. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

Le bassin du Dounfing (12°41'N-8°03'W, à 8 km de Bamako) connaît un climat tropical pur à deux saisons contrastées, avec une pluviométrie annuelle moyenne de 1054 mm (Bamako, période 1922-1996) concentrée entre mai et octobre et une ETP de 2015 mm (Bamako, moyenne 1980-1993). Le cours d'eau présente un écoulement de saison des pluies, caractérisé par un faible écoulement de base et des crues sporadiques parfois violentes.

Situé sur le rebord oriental du plateau Mandingue, le bassin présente un relief relativement accusé pour la région (Indice de pente globale 'I_g' - défini par Dubreuil, 1974 - de 22 m.km⁻¹) et qui s'organise suivant la toposéquence classique de cette zone : plateau et glacis cuirassés, bas-fond. Le substratum est constitué pour l'essentiel de grès à ciment siliceux et ferrugineux (Dars, 1960), fracturés en surface, et les sols gravillonnaires hérités du démantèlement des cuirasses (sols minéraux bruts d'érosion sur cuirasse) sont les plus représentés.

Le couvert végétal est constitué d'une savane arborée avec tapis graminéen annuel.

Les bas de versants sont en grande partie cultivés et des jardins mettent en valeur le bas-fond. La mise en culture (labour manuel, sans intrants) concerne environ 20 % de la superficie du bassin.

3. METHODOLOGIE : HYDROPLUVIOMETRIE ET MESURE DES TRANSPORTS SOLIDES

Un suivi hydropluviométrique classique a permis d'obtenir pour 1994 et 1995 les chroniques des précipitations et des débits instantanés ainsi que les bilans hydrologiques simplifiés. La précision des débits peut être considérée comme très satisfaisante, le rapport entre la hauteur d'eau maximale observée et la hauteur d'eau maximale jaugée étant de 0,95.

Deux cent quarante sept (247) prélèvements manuels d'échantillons d'eau d'un litre (1 l) ont été effectués au niveau de la station hydrométrique en un point de la section mouillée, tout au long des crues observées (montée, pic, décrue) et lors de l'écoulement de base. Les matières en suspension (MES) ont été recueillies par filtration à travers des membranes de porosité 0,22 µm et les filtrats obtenus ont été utilisés pour doser les éléments majeurs (HCO₃⁻, Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, Mg²⁺, Ca²⁺, Na⁺, K⁺) et la silice dissoute (SiO₂).

Pour les MES comme pour les matières dissoutes, les chroniques des concentrations instantanées n'étant pas continues dans le temps, nous avons adopté pour le calcul des tonnages exportés la procédure suivante (méthode dite des « bilans partiels ») :

L'hydrogramme annuel est découpé en périodes successives jugées homogènes sur le plan des concentrations. Ces périodes sont de durée variable, de quelques heures à plusieurs jours suivant les variations des concentrations mesurées. Pour chaque période, le flux de matières solides est calculé selon l'équation suivante (procédure « 4 » de Walling & Webb., 1981) :

$$L_{\Delta j} = [(\sum_{i=1}^n C_i Q_i) / (\sum_{i=1}^n Q_i)] V_{e_{\Delta j}}$$

avec : $L_{\Delta j}$ quantité de matières solides exportées durant la période Δj ; $V_{e_{\Delta j}}$ volume d'eau écoulé durant la période Δj ; C_i concentration instantanée (MES ou élément dissous) associée à chaque prélèvement ; Q_i débit instantané associé à chaque prélèvement ; n nombre de prélèvements effectués durant la période Δj .

La charge totale annuelle est ensuite obtenue en cumulant les charges calculées pour chaque période.

Concernant la détermination des majeurs et la silice, les protocoles suivants ont été adoptés :

- Ca^{2+} , Mg^{2+} sont dosés par absorption atomique, K^+ , Na^+ , par émission de flamme. La limite de détection est de 0,01 mg.l-1.
- Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} sont dosés par chromatographie ionique, avec une limite de détection de 0,1 mg.l-1
- la teneur en HCO_3^- est déterminée par dosage potentiométrique (limite de détection 0,5 mg.l-1).
- la teneur en SiO_2 est déterminée par spectrométrie d'émission de plasma, avec une limite de détection de 0,02 mg.l-1.

Trente (30) échantillons sur les 101 prélevés en 1994 ont été soumis à un dosage complet, au centre IRD de Bondy. La conductivité électrique (CE), le pH, et la température ont été mesurés au laboratoire sur tous les échantillons prélevés. Du fait de la bonne relation existant entre la CE et la concentration totale en ions majeurs d'une part et de celle existant entre la concentration en silice dissoute et celle des majeurs d'autre part, la minéralisation totale (Ctds) a pu être estimée pour chaque échantillon non dosé.

Une pollution anthropique accidentelle a rendu inutilisables les relevés de 1995 pour l'analyse des matières dissoutes.

4. RESULTATS

Les résultats concernant les caractéristiques hydrologiques, les flux de MES, la minéralisation des eaux et les flux de matières dissoutes seront traités successivement.

4.1 Variables hydrologiques

Avec 1298 mm de précipitations, l'année 1994 est très excédentaire (récurrence proche de la décennale humide, période de référence 1919-1991). La lame d'eau écoulée est de 270 mm, ce qui correspond à un coefficient d'écoulement K_e de 20,8 %.

L'ETR a été estimée, à partir de l'ETP Penmann et suivant la méthode de Thornthwaite et Matter (1955), à 740 mm. La mise en réserve dans les nappes serait de 290 mm cette année-là.

L'année 1995 est au contraire très déficitaire, avec 765 mm de pluie et une lame écoulée de 102 mm ($K_e = 12,9 \%$). L'ETR estimée est de 725 mm.

Pour les 2 années, l'écoulement de base, nettement supérieur à l'écoulement rapide de crue (ruissellement), représente entre les 2/3 (1994) et les 4/5 (1995) de l'écoulement total. Ceci souligne le rôle important des aquifères sis dans les grès de ce bassin.

Les débits instantanés du Dounfing sont très contrastés (*figure 1*), compris entre 0 et $35 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Les débits moyens annuels sont respectivement de $320 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$ en 1994 et $71 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$ en 1995.

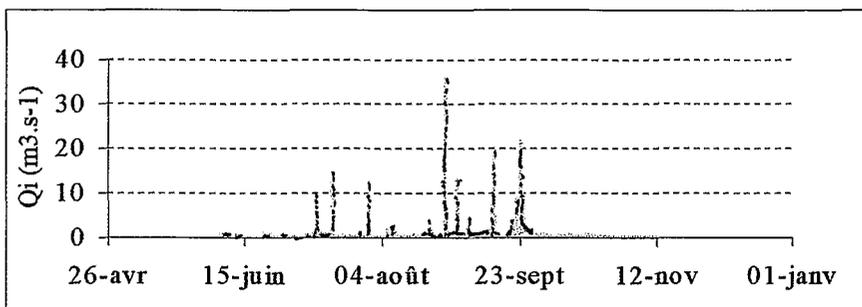


Figure 1 : Hydrogramme des débits instantanés, Dounfing 1994.

4.2 Flux de matières en suspension

4.2.1 Analyse quantitative

Les 247 concentrations en MES mesurées (concentrations instantanées) varient de quelques $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ à $2700 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$, valeur atteinte lors de la plus grosse crue de la période d'observation. S'il existe une tendance évidente à l'augmentation de ces concentrations avec les débits instantanés, la dispersion demeure trop importante pour établir une relation statistique significative entre ces deux variables. Ceci n'est guère surprenant connaissant la diversité des facteurs qui conditionnent les transports de sédiments par les cours d'eau (caractéristiques des écoulements, caractéristiques des pluies à l'origine de ceux-ci, états de surface du sol et leur dynamique saisonnière pour ne citer qu'eux). A la classique hystérèse existant entre crue et décrue (concentrations plus faibles en décrue qu'en montée de crue, à débit équivalent) s'ajoute une nette diminution saisonnière de la turbidité pour un même débit (*figure 2*) : à mesure que l'on progresse dans l'hivernage, le développement de la couverture végétale limite l'érosion pluviale et la fourniture de matériaux au cours d'eau.

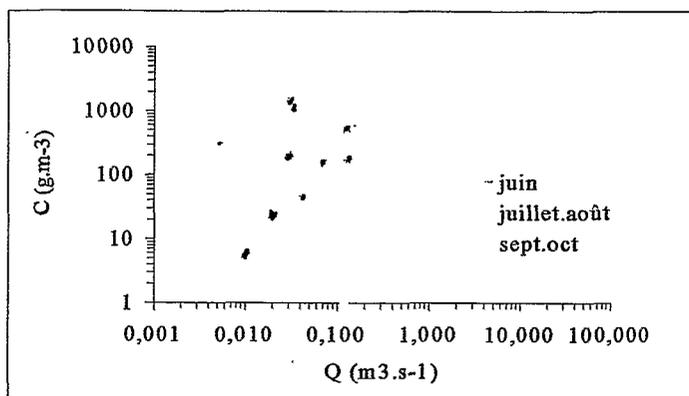


Figure 2 : Relations entre les concentrations instantanées en MES et les débits instantanés en fonction des différentes périodes de l'hivernage ; Dounfing 1994

Les flux de MES annuels (année hydrologique) ont été estimés respectivement à 660 t.an^{-1} (1994) et 57 t.an^{-1} (1995), ce qui correspond à des dégradations spécifiques de 38 et $3 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$. L'écart entre ces 2 valeurs est du à la différence de pluviométrie et d'hydraulicité d'une année à l'autre.

L'analyse des flux de MES à l'échelle de la crue montre que les 3 ou 4 principaux événements contribuent à eux seuls aux $2/3$ du tonnage annuel évacué. En outre, il existe une bonne relation entre les flux de MES par crue et le débit de pointe de crue $Q_{r \max}$ (figure 3).

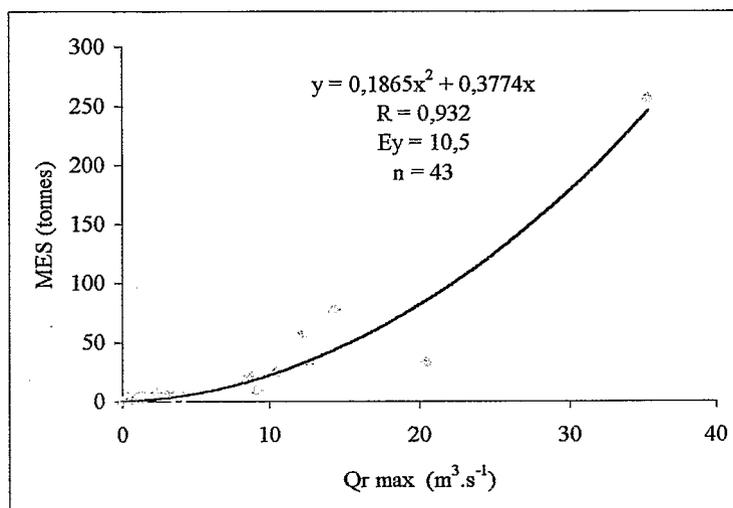


Figure 3 : Relation MES/ $Q_{r \max}$; Dounfing 1994 et 1995

4.2.2 Analyse qualitative

Concernant la granulométrie, les matières en suspension sont composées pour l'essentiel d'argiles (près de 50 % en moyenne) et de limons (40 %). Les diamètres médians des échantillons de MES sont compris entre $0,4$ et $8 \mu\text{m}$.

L'analyse minéralogique par diffractométrie X de 10 échantillons (fraction inférieure à $50 \mu\text{m}$) a permis d'établir que trois espèces constituent l'essentiel des particules transportées :

- la kaolinite (46 % en moyenne)
- la gibbsite (31 %)
- le quartz (23%)

4.3 Concentrations et flux de matières dissoutes

4.3.1 Minéralisation et faciès chimique des eaux de surface

Les dosages chimiques entrepris sont satisfaisants, l'erreur sur la balance ionique (τ (%) = $[(\Sigma\text{cations} - \Sigma\text{anions})/(\Sigma\text{cations} + \Sigma\text{anions})] \times 200$, les sommes étant exprimées en meq.l⁻¹) n'excédant 5 % que dans deux cas. Sur la base des 30 échantillons analysés, la minéralisation moyenne annuelle est de 122 mg.l⁻¹ (106 mg.l⁻¹ pour les majeurs et 16 mg.l⁻¹ pour la silice dissoute), et de 100 mg.l⁻¹ en moyenne pondérée par les débits (*tableau 1*).

Tableau 1 : Concentrations moyennes (arithmétiques et pondérées par les débits) des éléments dissous dans les eaux du Dounfing (mg.l⁻¹), sur la base de 30 analyses complètes

Dounfing 1994	CE μS.cm ⁻¹	pH	Ca	Mg	K	Na	HCO ₃	Cl	NO ₃	SO ₄	SiO ₂	Cmd	Ctds
Moyenne arithmétique	130,2	7,7	5,7	10,8	2,5	3,8	76,1	4,2	1,6	1,8	15,7	106,5	122,2
Ecart-type	24,2	0,2	0,8	3,1	1,3	0,6	19,3	0,9	2,61	1,8	3,2	20,9	23,6
Moyenne pondérée	124,6	7,6	5,2	8,3	2,8	3,1	60,2	3,7	2,6	2,0	13,0	87,9	100,9

Ces valeurs sont relativement élevées pour la région, comparées à celle établies par Meybeck (1979) pour la zone tropicale à climat contrasté (55 mg.l⁻¹ pour les majeurs), celles de Picouet (1999), Boeglin et Probst (1998), Gourcy (1994), Orange (1992) sur le fleuve Niger au Mali (de l'ordre de 35 à 50 mg.l⁻¹), ou sur petits bassins versants granitiques au Sud Mali (25 à 55 mg.l⁻¹, Droux, 1999).

En outre, les écoulements du Dounfing présentent un faciès chimique particulier : alors que 98 % des eaux de surface sont bicarbonatées calciques (Meybeck, 1979), celles du Dounfing présentent des teneurs en magnésium particulièrement élevées (eaux bicarbonatées magnésiennes, avec Mg représentant près de 60 % du total des cations exprimé en μeq.l⁻¹).

Plusieurs hypothèses peuvent être envisagées pour expliquer cette « anomalie ».

La première est qu'il existe au sein des grès de ce bassin des roches carbonatées et riches en magnésium, telles que de la dolomie ou des calcaires dolomitiques (contenant CaMg(CO₃)₂).

Cependant, les études géologiques de la région du Dounfing ne mentionnent pas la présence de telles roches et les grès de Kati présentent un ciment siliceux et non pas carbonaté (Dars, 1960).

La seconde hypothèse concerne la présence de dolérite, roche magmatique basique particulièrement sensible à l'altération chimique et riche en minéraux ferromagnésiens¹ (Bellair P., Pomerol C., 1984).

Ceci pourrait expliquer à la fois la forte minéralisation des eaux du Dounfing et leur faciès chimique original. Si cette dolérite n'affleure pas au sein même du bassin, sa présence en profondeur sous forme de sills est tout à fait plausible :

- on trouve de la dolérite en surface à proximité de Kati, à seulement 3 km au nord du Dounfing - Dars (1960) ;

¹ Notamment l'olivine, (Fe,Mg)₂SiO₄.

- il en existe de grands affleurements à une vingtaine de kilomètres au nord du bassin comme en témoigne la carte suivante (*figure 4*). Ces affleurements disparaissent à proximité de l'escarpement de grès dominant la vallée du Niger. L'érosion à l'échelle des temps longs a très vraisemblablement décapé la couverture doléritique sur ces reliefs perchés.

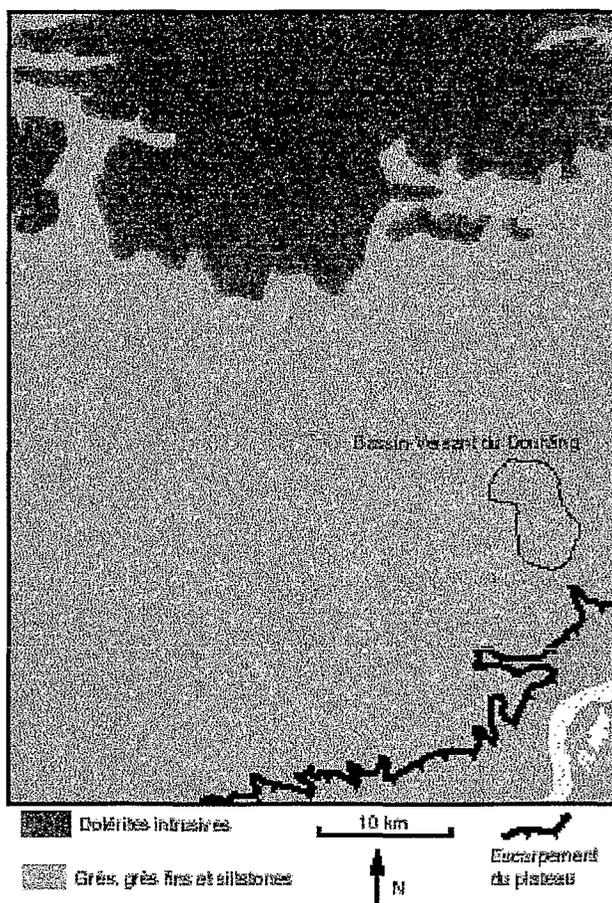


Figure 4 : Affleurements de dolérite au nord du bassin du Dounfing (d'après carte géologique 1/50 000, feuille Bamako-Ouest).

En outre, le rapport Ca/Mg (eq/eq) et la teneur en silice mesurés ici sont du même ordre de grandeur que les valeurs obtenues par Meybeck (1986) sur des petits bassins versants situés sur basaltes, ce qui conforte l'hypothèse de la présence de roches volcaniques au Dounfing. Au total, la présence de dolérite au Dounfing constitue l'explication la plus satisfaisante.

4.3.2 Flux de matières dissoutes

Les concentrations en matières dissoutes (majeurs + silice) utilisées pour le calcul sont celles de l'ensemble des échantillons prélevés, c'est à dire ceux qui ont fait l'objet d'une analyse complète et ceux pour lesquels seule la conductivité a été mesurée. Les résultats sont présentés au pas de temps mensuel puis totalisés sur l'année hydrologique (*tableau 2*). Pour les mois n'ayant pas fait l'objet de mesures (périodes de tarissement), les concentrations ont été estimées en se référant aux mesures les plus proches.

Ce calcul n'autorise que la distinction entre les flux de l'ensemble des ions majeurs et ceux de silice dissoute.

Tableau 2 : Flux de matières dissoutes mensuels et annuels au Dounfing en 1994

Dounfing 1994	Flux de matières dissoutes			
	Ve (10 ³ m ³)	Majeurs (t)	Silice (t)	TDS (t)
Juin	28,4	3,1	0,4	3,5
Juillet	605,8	50,5	7,0	57,5
Août	1128,0	70,0	9,0	79,0
Septembre	1736,0	147,1	20,6	167,7
Octobre	677,7	73,6	10,8	84,4
Novembre	307,7	37,9	5,7	43,6
Décembre	141,0	17,4	2,6	19,98
Janvier	61,2	7,5	1,1	8,67
Février	24,8	3,1	0,5	3,52
Mars	12,5	1,5	0,2	1,77
Total	4723	411,7	57,9	469,6
Flux spécifiques (t/km²/an)		23,5	3,3	26,8

Le flux annuel de TDS est d'environ 470 tonnes en 1994, ce qui correspond à une concentration moyenne de 100 mg.l⁻¹. Le mois de septembre est le plus contributif.

Une estimation du flux de matières dissoutes de 1995 a été faite en estimant la concentration moyenne du flux à partir du rapport [Ctds écoulement de base/Ctds écoulement de crue] établi en 1994 (2,5) et du rapport des écoulements correspondants (l'écoulement de base étant en 1995 plus important en valeur relative). Le flux total de 1995 aurait été de 192 tonnes (11 t/km²/an) pour une concentration moyenne de 108 mg.l⁻¹.

Les flux annuels pour chaque espèce (*tableau 3*) ont été calculés en appliquant aux flux mensuels de majeurs obtenus ci-dessus la part relative (en %) de chaque ion majeur déduite, pour chaque mois, des analyses complètes effectuées.

Tableau 3 : Flux annuels des différents éléments dissous

Dounfing 1994	Ca	Mg	K	Na	HCO ₃	Cl	NO ₃	SO ₄	SiO ₂	Majeurs	TDS
t.an ⁻¹	23,8	38,3	11,8	17,9	282,8	16,2	8,0	12,8	57,9	411,7	469,6
t.km ⁻² .an ⁻¹	1,36	2,19	0,68	1,02	16,16	0,92	0,46	0,73	3,31	23,52	26,83

Les concentrations moyennes annuelles ont été recalculées à partir de ces derniers flux obtenus. Elles diffèrent donc sensiblement des moyennes présentées plus haut mais sont plus pertinentes puisqu'elles prennent en compte à la fois le « poids » des débits et l'ensemble des échantillons prélevés (*tableau 4*).

Tableau 4 : Concentrations moyennes annuelles établies sur la base de 101 prélèvements; Dounfing 1994

Dounfing 1994	Ca	Mg	K	Na	HCO ₃	Cl	NO ₃	SO ₄	SiO ₂	TDS
mg.l ⁻¹	5,0	8,1	2,5	3,8	59,9	3,4	1,7	2,7	12,3	99,4

4.3.3 Prise en compte des apports atmosphériques

Le chlore observé dans les eaux de drainage est supposé d'origine exclusivement atmosphérique et les teneurs des autres ions Xi sont corrigées dans l'écoulement au prorata des rapports ioniques moyens Xi/Cl observés dans les pluies de la région. Pour cela, les rapports moyens établis par Boeglin et Probst (*tableau 5*) pour le bassin du Niger supérieur ont été utilisés.

Tableau 5 : Rapports ioniques moyens Xi/Cl des pluies dans la région du bassin du Niger supérieur (d'après Boeglin et Probst, 1998)

Xi	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	SiO ₂
Xi/Cl (mol/mol)	0,40	0,28	0,32	1,16	*	1	*	0,49	*

Aucune correction n'est effectuée sur les bicarbonates, les nitrates et la silice : soit l'apport atmosphérique est négligeable (SiO₂), soit la correction est sans objet vis les échanges atmosphériques très importants dans le cycle de l'élément tel le carbone ou l'azote (Meybeck, 1986).

Les concentrations et les flux de matières dissoutes corrigés figurent dans le *tableau 6* :

Tableau 6 : Flux annuels en matières dissoutes et concentrations moyennes pondérées, corrigés des apports atmosphériques

Dounfing 1994	Ca	Mg	K	Na	HCO ₃	NO ₃	SiO ₂	TDS
t.an ⁻¹	16,9	35,2	6,1	5,8	282,8	8,0	57,9	412,7
mg.l ⁻¹	3,6	7,5	1,3	1,2	59,9	1,7	12,3	87,4

Les différences entre valeurs initiales et valeurs corrigées sont très faibles. Les apports atmosphériques sont presque négligeables vis à vis des produits de l'altération des roches sur le bassin.

Ces flux peuvent être considérés comme représentatifs de l'altération chimique affectant le bassin pour une année particulièrement humide.

5. CONCLUSION

Les flux de MES obtenus au Dounfing donnent une mesure de l'essentiel de l'érosion hydrique mécanique à l'échelle d'un bassin versant gréseux d'une dizaine de km², pour deux années particulièrement contrastées. Les charges totales exportées annuellement à l'exutoire sont respectivement de 660 t.an⁻¹ (1994, année proche de la décennale humide) et 57 t.an⁻¹ (1995, année proche de la décennale sèche).

Les dégradations correspondantes, faibles dans l'absolu (38 et 3 t.km⁻².an⁻¹), entrent bien dans la fourchette de celles observées en Afrique subsaharienne (Walling, 1984).

Au pas de temps annuel, les flux de matières dissoutes obtenus sont de l'ordre de quelques centaines de tonnes : 470 t pour 1994 et près de 200 t pour 1995, ce qui correspond respectivement à des dégradations spécifiques de 27 et 11 t.km⁻².an⁻¹. Si ces valeurs spécifiques restent du même ordre de grandeur que celles obtenues en Afrique sur roches silicatées (Probst 1990, Meybeck 1979), elles leur sont supérieures dans la plupart des cas.

Les eaux du Dounfing sont fortement minéralisées, avec des concentrations en TDS de l'ordre de 100 mg.l⁻¹. Elles sont particulièrement riches en magnésium, vraisemblablement en raison de la présence (hautement probable) de sills de dolérite en profondeur au sein des grès de ce bassin.

Ce dernier résultat illustre bien le rôle précieux de l'analyse hydrochimique dans les investigations géomorphologiques.

Remerciements. Cette recherche n'aurait pu être menée à bien sans la contribution logistique et financière du département Eaux Continentales de l'IRD.

6. REFERENCES

- BOEGLIN J.L., PROBST J.L., 1998 : *Physical and chemical weathering rates and CO₂ consumption in a tropical lateritic environment : the upper Niger basin*. Chemical Geology, n°148, pp.137-156.
- DARS R., 1960 : *Les formations sédimentaires et les dolérites du Soudan occidental (Afrique de l'Ouest)*. Thèse Sciences, Géologie, Université de Paris, Mém. BRGM, Paris XII, 329 p.
- DUBREUIL P., 1974 : *Initiation à l'analyse hydrologique*. ORSTOM, Masson, Paris, 216 p.
- GOURCY L., 1994 : *Fonctionnement hydrogéochimique de la cuvette lacustre du fleuve Niger (Mali) : bilans et suivi des flux hydriques, particuliers et dissous et des flux de méthane*. Thèse de Doctorat, Université Paris XI Orsay, 272 p.
- MEYBECK M., 1979 : *Concentration des eaux fluviales en éléments majeurs et apports en solution aux océans*. Revue de géologie dynamique et de géographie physique, vol. 21, fasc. 3, Paris, pp. 215-246.
- MEYBECK M., 1986 : *Composition chimique des ruisseaux non pollués de France*. Sci. Géol. Bull., n°39, Strasbourg, pp. 3-77.
- OLIVRY J.C., GOURCY L., TOURE M., 1995 : *Premiers résultats sur la mesure des flux de matière dissoutes et particulières dans les apports du Niger au Sahel*. In : Grands bassins fluviaux périatlantiques : Congo, Niger, Amazone. Actes du colloque PEGI, CNRS-Insu-ORSTOM, 22-24 nov. 1993, Coll. Colloques et Séminaires, ORSTOM, Paris, pp. 281-292.
- ORANGE D., 1992 : *Hydroclimatologie du Fouta Djallon et dynamique actuelle d'un vieux paysage latéritique*. Sciences géologiques, mémoire n°93, Strasbourg, 220 p.
- PICOUET C., 1999 : *Géodynamique d'un hydrosystème tropical peu anthropisé : bassin supérieur et delta intérieur du fleuve Niger*. Thèse de Doctorat, Univ. Montpellier II, 464 p.
- PROBST J.L., 1990 : *Géochimie et hydrologie de l'érosion continentale. Mécanismes, bilan global actuel et fluctuations au cours des 500 derniers millions d'années*. Thèse Sciences, Géologie, Université de Strasbourg, 190 p.
- THORNTHWAITE C. W., MATHER J. R., 1955 : *The water balance*. Drexel Instit. of Technology Publ., Climatology, 8 (1), Centerton, New Jersey, 104 p.
- WALLING D.E., 1984 : *The sediment yields of African rivers*. In : Challenges in African Hydrology and Water Resources. Proceeding of the Harare symposium, IAHS publ., n°144, pp. 265-283.
- WALLING D.E., WEBB B.W., 1981 : *The reliability of suspended sediment load data*. In : Erosion and Sediment Transport Measurement. Proceeding of the Florence symposium, IAHS publ., n°133, pp. 177-194.



Pour citer cet article / How to cite this article

Droux, J. P.; Mietton, M.; Olivry, J. C. - Une mesure de l'érosion hydrique mécanique et chimique sur un petit bassin versant gréseux en zone tropicale soudanienne : le cas du Dounfing, Mali, pp. 68-77, Bulletin du RESEAU EROSION n° 20, 2000.

Contact Bulletin du RESEAU EROSION : beep@ird.fr