

Transports de matières en suspension sur petits bassins versants au Mali: influence des surfaces cultivées

J. P. DROUX, M. MIETTON

*Centre d'Etude et de Recherches Eco-Géographique (CEREG), Université Louis Pasteur,
3 rue de l'Argonne, F-67083 Strasbourg Cedex, France*

J. C. OLIVRY

*Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en coopération (ORSTOM),
BP 5045, F-34032 Montpellier Cedex 1, France*

Résumé Cet article présente les premiers résultats obtenus sur les transports solides en suspension de trois petits bassins versants au Mali, en zone de savane humide. Les flux annuels de matières en suspension y sont relativement faibles, compris entre 4 et 45 t km² an⁻¹, et varient dans le même sens que la pluviométrie et les écoulements annuels. Les transports solides varient également au cours de la saison des pluies, quelques crues importantes pouvant assurer l'essentiel du tonnage annuel exporté. L'influence de la mise en culture sur l'érosion est étudiée au pas de temps de la crue sur les deux bassins dont les occupations du sol sont les plus contrastées. Le bassin le plus cultivé s'avère être le plus ruisselant (en terme d'intensité maximale), ce qui favorise l'exportation de matières en suspension.

INTRODUCTION

Depuis 1990, l'ORSTOM et le CNRS (Olivry *et al.*, 1995; Boeglin & Probst, 1996) mesurent les flux de matières en suspension sur le fleuve Niger au Mali. Afin de déterminer l'origine des matériaux transportés, une étude a été menée en 1994 et 1995 sur trois petits bassins versants maliens (17-120 km²) représentatifs de différents paysages du bassin supérieur du Niger. L'un de ses principaux objectifs consiste à quantifier et comparer les exportations de matières en suspension de ces petites unités hydrologiques en fonction du contexte hydropluviométrique, de leurs caractéristiques physiques et de leur degré d'anthropisation. L'exportation des matières en suspension est tout d'abord comparée entre ces trois bassins au pas de temps annuel. Deux des trois bassins, comparables par leur taille mais avec une occupation du sol très différente, sont l'objet d'une étude sur l'érosion au pas de temps de la crue.

CONTEXTE GEOGRAPHIQUE DE LA ZONE D'ETUDE

La région étudiée connaît un climat tropical contrasté à deux saisons, avec une pluviométrie annuelle moyenne comprise entre 1050 et 1220 mm. La saison des pluies s'étend de mai à octobre. Le couvert végétal prédominant est de type savane

Tableau 1 Caractéristiques géographiques des bassins versants.

	Dounfing	Djitiko	Belekoni
Coordonnées géographiques	8°03'N -12°41'W	12°06'N - 8°25'W	11°21'N - 7°29'W
Superficie (km ²)	17.5	103	120
Pente globale I_g (m km ⁻¹)	22	4.6	1.2
Géologie	Grès	Granite	Granite
Surfaces cultivées	30%	20%	54%

arborée avec un tapis graminéen annuel. Le relief, souvent peu accusé, s'organise suivant la toposéquence classique de ces régions: plateau et glacis cuirassés, bas-fond.

Les cours d'eau drainant les bassins étudiés sont caractérisés par un écoulement de saison des pluies, avec un faible écoulement de base masqué par des crues sporadiques. Le Tableau 1 donne les caractéristiques géographiques des bassins. Le bassin du Dounfing se caractérise par sa petite taille et par un relief accusé (Indice de pente globale "g" — défini par Dubreuil, 1974 — de 22 m km⁻¹). Le substratum est constitué de grès fracturés et les sols gravillonnaires hérités du démantèlement d'une cuirasse sont les plus représentés. Les bas de versants sont en grande partie cultivés et des jardins mettent en valeur le bas-fond. La mise en culture concerne environ 30% du bassin et 6% sont occupés par une zone d'habitat dense située en tête de bassin.

Les bassins de Belekoni et de Djitiko couvrent respectivement 120 et 103 km², sur des substratums de granite. Les types de sols dominants sur les deux bassins sont semblables: sols gravillonnaires peu épais pour la partie supérieure des glacis, sols ferrugineux tropicaux lessivés, plus profonds, à l'aval. La pente globale de ces bassins est faible (1.22 m km⁻¹ à Belekoni et 4.6 m km⁻¹ à Djitiko).

Ces deux bassins se différencient essentiellement par leur occupation du sol: si celui de Djitiko est resté en grande partie à l'état "naturel" — moins de 20% de sa superficie sont cultivés — le bassin de Belekoni est occupé à plus de 50% par des cultures traditionnelles (mil, sorgho, arachide, coton). Les bas-fonds sont cultivés en riz.

METHODOLOGIE: HYDROPLUVIOMETRIE ET MESURES DES TRANSPORTS DE MATIERES EN SUSPENSION

Un suivi hydropluviométrique classique des trois bassins a permis d'obtenir pour 1994 et 1995 les chroniques des précipitations moyennes journalières (méthode des polygones de Thiessen) et des débits instantanés.

Les prélèvements manuels d'échantillons d'eau d'un litre (1 l) ont été effectués au niveau des stations hydrométriques, en un point de la section mouillée. Ils ont été faits 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 afin de calculer la concentration instantanée (C_i) pour chaque échantillon.

Les chroniques des C_i n'étant pas continues dans le temps, nous avons adopté pour le calcul des quantités de MES exportées la procédure suivante (méthode dite

des "bilans partiels"): l'hydrogramme annuel est découpé en périodes successives jugées homogènes sur le plan de la turbidité. Ces périodes sont de durée variable, de quelques heures à plusieurs jours suivant les variations des C_i mesurées. Pour chaque période, la charge de MES est calculée selon l'équation (1) (procédure (4) de Walling & Webb, 1981):

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

avec: $L_{\Delta j}$ quantité de MES exportée durant la période Δj ; $V_{e\Delta j}$ volume d'eau écoulé durant la période Δj ; C_i concentration instantanée en MES associée à chaque prélèvement; Q_i débit instantané associé à chaque prélèvement; n nombre de prélèvements effectués durant la période Δj .

Nous avons pu ainsi déterminer les masses de suspensions évacuées lors de chaque crue et pour l'ensemble des écoulements inter-crues. La charge totale annuelle est ensuite obtenue en cumulant les charges calculées pour chaque période.

RESULTATS

Transports annuels de matières en suspensions

Le Tableau 2 donne les principales caractéristiques des transports solides en suspension et des variables hydrologiques pour les deux années étudiées. Les plus fortes dégradations spécifiques sont mesurées en 1994 sur les bassins Belekoni ($45 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$) et Dounfing ($37 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$), dans un contexte hydropluviométrique très excédentaire: les pluviosités annuelles sont nettement supérieures à la moyenne et les coefficients d'écoulement (respectivement 18.5% et 17.6%) sont les plus élevés.

La plus faible dégradation, mesurée sur le Dounfing en 1995 ($4 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$), correspond à une pluviosité proche de la décennale sèche.

Les dégradations obtenues à Djitiko en 1994 et 1995 et à Belekoni en 1995 correspondent à des pluviométries moyennes et ne dépassent pas $18 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$.

Ces premières observations semblent montrer qu'au pas de temps annuel, les transports en suspensions sont conditionnés avant tout par l'importance de la pluviométrie et des écoulements, ce qui n'est guère surprenant. Dans l'ensemble, les

Tableau 2 Caractéristiques des transports solides et des paramètres hydrologiques.

	Dounfing		Djitiko		Belekoni	
P moyenne interannuelle (mm)	1050		1085		1220	
Année observée	1994	1995	1994	1995	1994	1995
Pluviométrie annuelle (mm)	1290	764	1086	1014	1318	1101
Lame d'eau écoulée annuelle (mm)	239	89	75	95	232	88
Coefficient d'écoulement annuel (%)	18.5	11.7	6.9	9.3	17.6	8.0
Période d'écoulement observée	06/06- 11/11	1/5- 30/11	06/06- 3/11	25/05- 30/11	7/06- 16/10	10/5- 30/11
Débit moyen spécifique ($l \text{ s}^{-1} \text{ km}^{-2}$)	18	5	6	6	21	5
Volume écoulé annuel (10^3 m^3)	4176	1563	7718.5	9766	27785	10630
Tonnage annuel de MES (t)	640	70	1472	1849	5454	2071
Dégradation spécifique ($\text{t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$)	37	4	14	18	45	17
Concentration moyenne (mg l^{-1})	153	45	191	189	196	195

dégradations sont faibles comparativement à celles mesurées par Mietton (1988) ou Olivry (1977) dans le même type de milieu.

D'autres précisions peuvent être apportées. En dépit de lames d'eau écoulées similaires en 1994 (232 et 239 mm), la dégradation est plus faible au Dounfing qu'à Belekoni. Ceci peut s'expliquer par une plus forte proportion de surfaces mises en culture, théoriquement plus vulnérables, à Belekoni. La différence d'érosion reste cependant modeste: il se peut que les fortes pentes et la petite taille du premier bassin, favorables à une augmentation de l'érosion spécifique, compensent l'aggravation de la dégradation provoquée par une forte mise en culture à Belekoni.

Les bassins de Djitiko et Belekoni sont eux en revanche comparables par leur taille et l'ordre de grandeur de leur pente moyenne, alors que la différence des proportions de surfaces cultivées est nettement marquée. Or, si en 1994, pour des pluviosités et des écoulements très différents, la dégradation spécifique est effectivement largement supérieure à Belekoni par rapport à Djitiko (45 contre $14 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$), en revanche, en 1995, pour des précipitations et des lames écoulées semblables, les dégradations spécifiques sont identiques. Ce dernier constat ne permet donc pas de conclure à une érosion plus importante sur le bassin le plus cultivé. Le fait que les turbidités moyennes soient très proches sur les deux bassins et pour les deux années (189 à 196 mg l^{-1}) va également dans le même sens.

Comparaison des transports solides de Djitiko et Belekoni à l'échelle de la crue, influence des surface cultivées

Ces résultats au pas de temps annuel ne peuvent évidemment rendre compte des variations importantes des flux de matières caractéristiques des cours d'eau

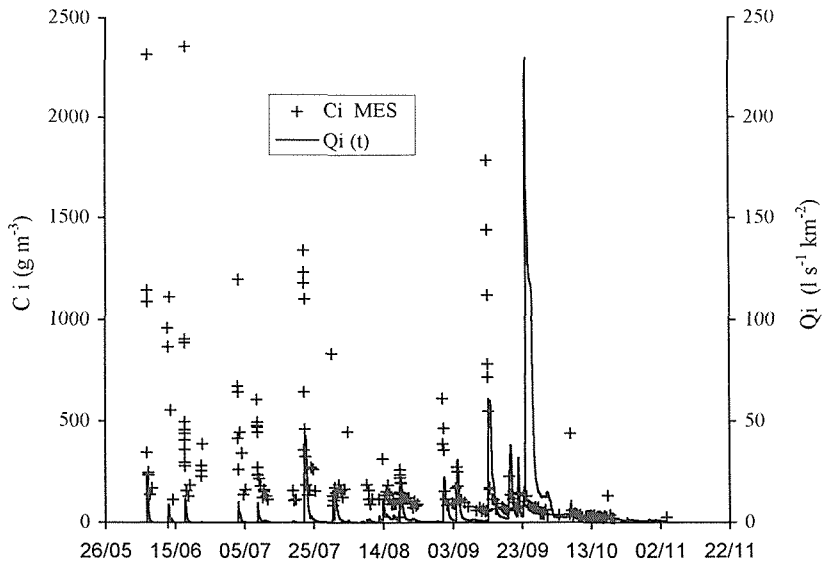


Fig. 1 Variations des débits instantanés (Q_i) et des concentrations de MES instantanées (C_i) mesurés sur le Djitiko au cours de l'année 1994.

présentant un régime aussi contrasté. A titre d'exemple, la Fig. 1 illustre pour Djitiko en 1994 l'évolution des débits et des concentrations en MES instantanés qui varient fortement, respectivement de 0.07 à 230 l s⁻¹ km⁻² et de 20 à 2350 mg l⁻¹. Les flux instantanés de MES les plus faibles sont mesurés lors de l'écoulement de base (écoulement faible et peu concentré), les plus forts lors des montées de crue (débits et concentrations élevés). Les variations de charge solide d'une crue à l'autre s'expliquent par les variations de caractéristiques des averses, du ruissellement et des crues qu'elles génèrent ainsi que de la sensibilité des sols à l'érosion. Ces mêmes variations s'observent aussi sur les deux autres bassins.

Pour chacun d'entre eux, quelques crues sont responsables de la plus grande part de l'exportation annuelle de matières solides: en 1994 par exemple, les deux crues les plus chargées ont exporté à elles seules le tiers du tonnage total annuel à Djitiko, les deux tiers à Belekoni et la moitié au Dounfing. C'est donc à l'échelle de la crue que les comparaisons doivent être menées, en particulier entre les deux bassins de Djitiko et Belekoni.

L'étude préalable du ruissellement sur ces bassins est nécessaire pour évaluer les différences de transports solides. Pour chaque crue le volume ruisselé et le débit maximum de ruissellement sont estimés selon la méthode préconisée par Dubreuil (1974) qui permet de séparer le ruissellement pur (assimilable au ruissellement de surface) de l'écoulement hypodermique et de l'écoulement de base.

La Fig. 2 présente les relations débit maximum ruisselé (Q_r max)/pluie (P) des crues observées sur les deux bassins. On voit, même si ce n'est pas systématique, que les débits maximums de ruissellement sont souvent plus élevés, à hauteurs de précipitations égales, sur le bassin le plus cultivé (Belekoni). D'autres facteurs tels que l'humidité préalable du sol, la date d'occurrence des crues, l'intensité des averses, n'ont pas permis de justifier à eux seuls ces différences d'un bassin à

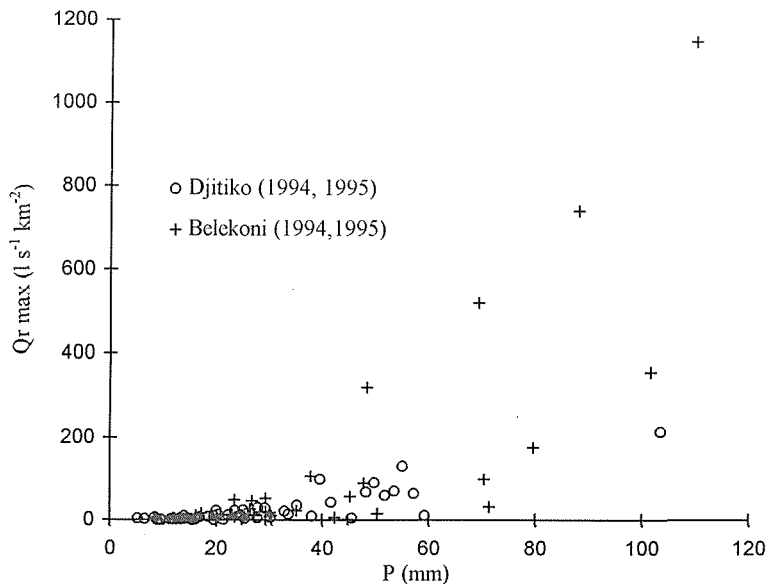


Fig. 2 Relation entre le débit maximum ruisselé (Q_r max) et la pluie (P) au cours des différentes crues observées à Djitiko et à Belekoni.

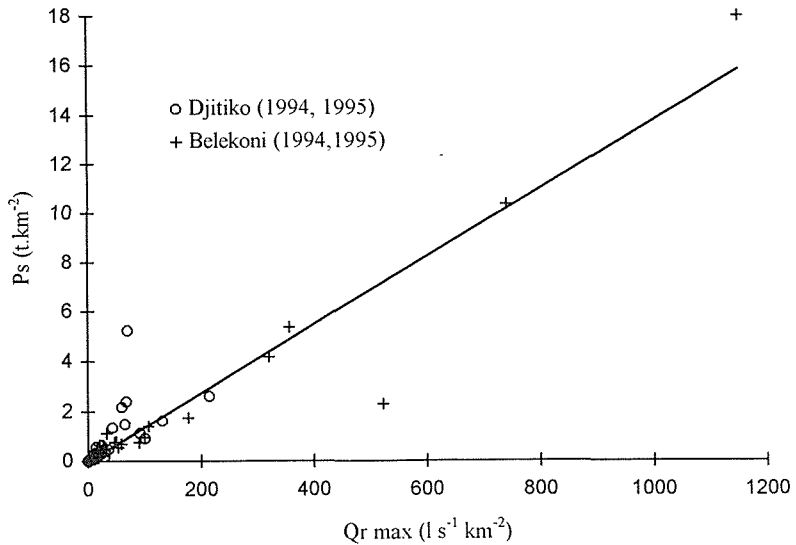


Fig. 3 Relation entre le poids de MES exporté (P_s) et le débit maximum ruisselé ($Q_r \max$) au cours des différentes crues observées à Djitiko et à Belekoni.

l'autre. Ceci nous autorise à penser que c'est bien la mise en culture qui favorise l'occurrence de *débits de pointe de ruissellement* plus importants à Belekoni.

Pour comparer maintenant l'exportation de matières en suspensions d'un bassin à l'autre, la Fig. 3 présente, pour chaque crue, les relations entre le débit maximum de ruissellement ($Q_r \max$) et la masse totale de MES exportée.

Pour Belekoni, la quantité de sédiments exportés croît linéairement avec le débit maximum de ruissellement. Ceci peut s'expliquer si l'on admet que c'est lors des pointes d'intensité du ruissellement que se produit l'essentiel de l'érosion mécanique. Une crue fait exception mais elle se produit à la fin de l'hivernage (15 septembre 1994), ce qui peut justifier la faiblesse relative du tonnage exporté (développement important de la couverture végétale).

Pour Djitiko, la dispersion des points est plus importante. Une crue s'écarte particulièrement du gros du nuage mais peut également s'expliquer par sa date d'occurrence, en tout début d'hivernage cette fois-ci.

Quoi qu'il en soit et contre toute attente, les dégradations spécifiques de Djitiko sont pour la plupart très proches de celles de Belekoni, voire supérieures, à débit maximum de ruissellement donné. L'influence des surfaces cultivées sur l'érosion n'est donc pas décelable si l'on ne considère que les relations établies ci-dessus. En revanche, comme nous l'avons vu plus haut, la forte mise en culture à Belekoni peut être à l'origine de débits de pointe de ruissellement nettement plus élevés (supérieurs à $300 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$) qu'à Djitiko, à précipitations équivalentes, entraînant une plus forte érosion mécanique (supérieure à 4 t km^{-2}). C'est en ce sens que l'exportation de MES est favorisée sur le bassin le plus cultivé.

Pour chaque crue, deux autres variables ont été retenues afin de comparer les exportations de MES d'un bassin à l'autre:

- Le débit moyen de ruissellement (Q_r), obtenu en faisant le rapport du volume ruisselé par le temps de base de la crue.

- Le débit moyen de matières solides (Q_s) obtenu en faisant le rapport de la masse totale de sédiments exportée lors de la crue par le temps de base de la crue.

Pour autoriser les comparaisons d'un bassin à l'autre, ces variables sont rapportées à l'unité de surface.

La Fig. 4 montre les nuages de points obtenus. Pour la majorité des événements, il n'y a pas de différences notables entre les deux bassins: l'ordre de grandeur du débit solide est similaire pour les deux bassins, à débit moyen de ruissellement donné. Cependant, les cinq crues présentant les plus forts débits solides font exceptions. Parmi celles-ci, quatre sont enregistrées à Belekoni et il s'avère que ce sont justement les quatre crues qui présentent des débits maximums de ruissellement très supérieurs à ceux des autres crues enregistrées sur les deux bassins. Ce constat corrobore les hypothèses avancées plus haut à propos de l'effet de la mise en culture sur l'exportation de MES à Belekoni.

CONCLUSIONS

Les transports de matières en suspensions annuels sont conditionnés avant tout par la pluviométrie et les écoulements annuels. Les dégradations spécifiques restent cependant faibles pour ce type de milieu, ne dépassant pas $45 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$.

Le rythme d'exportation des sédiments est soumis à de fortes variations au cours de la saison hydrologique, conditionné par l'occurrence d'averses et de crues importantes.

L'influence des surfaces cultivées sur une éventuelle augmentation des exportations de MES n'est pas aussi importante que ce que l'on pouvait attendre.

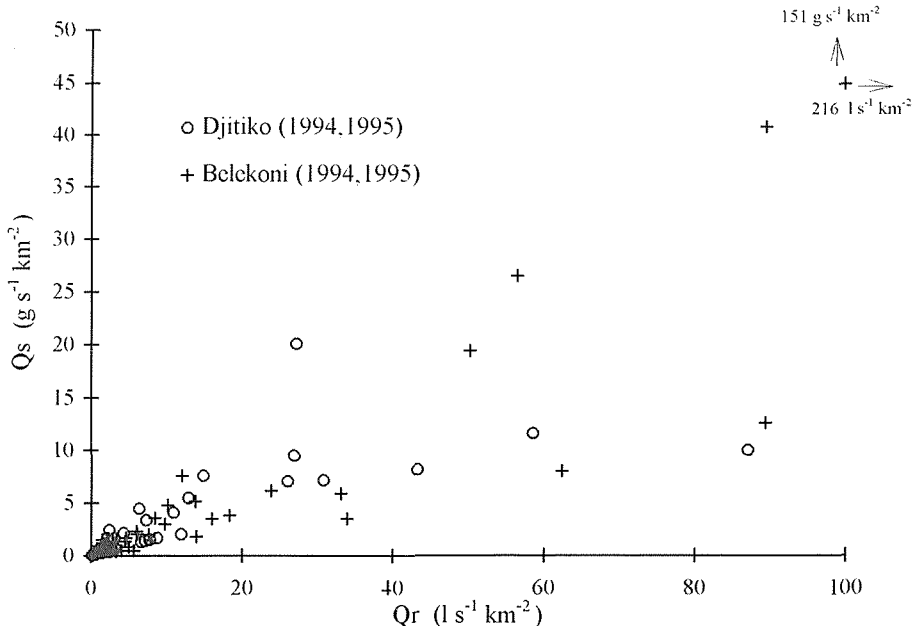


Fig. 4 Relation entre le débit solide moyen (Q_s) et le débit moyen de ruissellement (Q_r) au cours des différentes crues observées à Djitiko et à Belekoni.

Celle-ci se traduit essentiellement par l'occurrence, toutes choses égales par ailleurs, de débits maximums de ruissellement très élevés susceptibles d'engendrer de plus grandes exportations de sédiments que dans le cas du bassin le moins cultivé.

REFERENCES

- Boeglin, J. L. & Probst, J. L. (1996) Transports fluviaux de matières dissoutes et particulaires sur un bassin versant de région tropicale: le bassin amont du fleuve Niger au cours de la période 1990-1993. *Sci. Géol. Bull.* (sous presse).
- Dubreuil, P. (1974) *Initiation à l'Analyse Hydrologique*. Masson, ORSTOM, Paris, France.
- Mietton, M. (1988) *Dynamique de l'interface lithosphère-atmosphère au Burkina Faso. L'Erosion en Zone de Savane*. Thèse Doc. D'Etat, Univ. de Grenoble I. Editec, Caen, France.
- Olivry, J. C. (1977) Transports solides en suspension au Cameroun. In: *Erosion and Solid Matter Transport in Inland Waters* (Actes du colloque de Paris, juillet 1977), 134-141. IAHS Publ. no 122.
- Olivry, J. C., Gourcy L. & Toure, M. (1995) Premiers résultats sur la mesure des flux de matières dissoutes et particulaires dans les apports du Niger au Sahel. In: *Grands Bassins Fluviaux Périalantiques: Congo, Niger, Amazone* (ed. par J. C. Olivry & J. Boulègue), Collection Colloque et Séminaire, ORSTOM, Paris, France.
- Walling, D. E. & Webb, B. W. (1981) The reliability of suspended sediment load data. In: *Erosion and Sediment Transport Measurement* (Actes du colloque de Florence, juin 1981), 177-194. IAHS Publ. no 133.