

# Extraction de sables et tendance à l'incision du Niger supérieur (Mali)

## *Sand extraction and trend of channel incision in the Upper Niger River (Mali)*

Luc Ferry\*, Michel Mietton\*\*, Nadine Muther\*, Didier Martin\*, N'Tjie Coulibaly\*\*\*,  
Myriam Laval\*\*, François-Xavier Basselot\*\*, Youma Cissé Coulibaly\*\*\*, Mathilde Collier\*\*\*\*,  
Kevin de la Croix\*\*\*\*\*, Jean-Claude Olivry\*\*\*\*\*

### Résumé

La problématique de recherche est fondée sur la mise en lumière d'une incision récente du fleuve Niger dans sa partie supérieure (en amont de Ségou), contrairement à l'opinion généralement exprimée, y compris par les services techniques concernés par la gestion du bassin, d'un ensablement effectif. L'hypothèse est étayée par les résultats de mesures topométriques diachroniques (levés de profils transversaux du lit mineur, cartes bathymétriques du réservoir de barrage de Sélingué) et par l'examen de l'évolution de la courbe de tarage de la station hydrométrique de Koulikoro, l'une des plus anciennes d'Afrique de l'Ouest. Une tendance à l'incision est manifeste depuis le début des années 1980, dont la raison est essentiellement anthropique, liée à l'extraction de matériaux pour l'industrie du bâtiment à Bamako. À ces prélèvements se conjugue la faiblesse des apports longitudinaux. Le déséquilibre sédimentaire a des conséquences socio-économiques immédiates.

**Mots clés :** extraction de matériaux, incision, ensablement, profils topométriques transversaux, courbe de tarage, réservoir de barrage, pêche.

### Abstract

*The research question is based on demonstration of the existence of a recent channel incision by the Niger River in the upper part of its course (upstream of Segou, Mali). This runs contrary to the opinion that silting is in progress, the latter view being shared by the technical agencies involved in the management of the basin. The hypothesis is supported by diachronic topometric observations: surveys of cross sections of the low-flow channel, depth mapping of the Sélingué dam reservoir and also by examination of the evolution of the rating curve at Koulikoro gauging station, one of the oldest in West Africa. An incision tendency has clearly existed since the early 1980s. The main reason is human and related to the extraction of building materials for Bamako. This extraction is combined with slight longitudinal drift. The sedimentary imbalance has immediate socioeconomic consequences.*

**Key words:** extraction of building materials, channel incision, silting, surveys of cross sections, rating curve, dam reservoir, fishing.

### Abridged English version

*Both the Malian media and the technical agencies involved in management of the basin (Niger Basin Authority for example) consider that the upper course of the Niger upstream of the delta is subject to silting. At Segou, the Upper Niger basin has an area of 130762 km<sup>2</sup>, nearly 75% of which is in Guinea at the south-sudanese latitudes. These environments must be described accurately insofar as regards the physiographic and human context, flow patterns and sediment loads. The*

*area seems to be penestable as it is very sparsely populated (average population density: 15 inhabitants/km<sup>2</sup>); more of 70% is covered by dense dry forest and tree savannah. The soils are also very homogeneous, consisting mainly of tropical ferrisols on crystalline bedrock, except in the Malian downstream part where Precambrian sandstone appears. The tropical climate with two contrasted seasons governs the flow regime of the river. Average interannual flows have decreased by a third during the dry period (1970-1990), making the sandbanks of the low-flow channel more visible. In spite of the recovery observed*

\* IRD Bamako – UMR G-Eau – 361, rue Jean-François Breton – 34196 Montpellier Cedex 05 – France (luc.ferry@ird.fr).

\*\* Université Jean-Moulin (Lyon 3) – CRGA, UMR 5600 – 18, rue Chevreul – 69362 Lyon Cedex 07 – France (mmietton@yahoo.fr).

\*\*\* Direction Nationale de l'Hydraulique – Square Patrice Lumumba – BP 66 – Bamako – République du Mali (c.youma@yahoo.fr).

\*\*\*\* IMACOF – Université François Rabelais – Parc de Grandmont – 37200 Tours – France (tilda\_royanvoile@yahoo.fr).

\*\*\*\*\* Université Paris-Nanterre-La Défense (Paris 10) – 200, avenue de la République – 92001 Nanterre Cedex – France (kevindlc@hotmail.fr).

\*\*\*\*\* IRD – 135, avenue du Coteau Fleuri – 83320 Carqueiranne – France (jean-claude.olivry@wanadoo.fr).

since the mid-1990s, the present discharges are still 20% smaller than they were before 1971.

*Diachronic analysis of cross sections of the low-flow channel of the river and, more revealing, careful observation of the rating curves at Koulikoro gauging station show a tendency upstream of Segou for an incision and undermining of the banks since the early 1980s, with lateral undermining confirmed by various reliable reports. The change in the profile is related to the extraction of building materials (coarse sand and gravel); this has been intensified by the urban growth of Bamako which also started at the beginning of the 1980s. The scale of the quantities extracted was estimated by questioning the SYNTRUI (Syndicat des transports urbains et interurbains du Mali) and cross-referencing with our own information consisting of counts of lorryloads of sand and also figures for Malian cement imports.*

*Annual ablation of the riverbed is probably several centimetres, on the same scale as that observed in places in the cross sections (several tens of centimetres in nearly 30 years). The incision trend is amplified by small longitudinal deposits. The deficit is illustrated on a large scale in the Sankarani basin (32.135 km<sup>2</sup>), where accurate depth measurements (427 ADCP profiles, 732 km of surveys, several hundred individual observations (manual soundings, points of the bank)) were performed in 2008 at the Selingue dam reservoir. This examination shows that there has been no significant silting since the dam was closed 26 years ago (1982). Wind-blown particle dynamics caused at most the shifting of sand already in place during the major drought in the 1970s and 1980s in the downstream part close to Segou. The stock of sand being extracted seems limited and probably dates back to dry quaternary periods. The small solid transport is also related to previous observations of discontinuities in load transports in space and time in south-Sudanese environments. This applies particularly to this basin in Upper-Guinea. The tendency for incision to occur is still little perceptible as it is recent and affects a strong substratum consisting mainly of sandstone, with granite and quartzite upstream. Even if this incision were to remain limited, it could still have hydraulic and hydrological consequences and has already affected the biotope and hence fishery resources.*

## Introduction

L'incision des cours d'eau a donné lieu à une abondante littérature relative aux multiples causes de ce phénomène et aux processus hydrodynamiques qui lui sont liés, à ses conséquences, notamment écologiques, et aux modalités de restauration des lits fluviaux (Galay, 1983 ; Schumm *et al.*, 1984 ; *Revue de Géographie de Lyon*, 1994 ; Brookes et Shields, 1996 ; Bravard *et al.*, 1997 ; Wang *et al.*, 1997 ; Darby et Simon, 1999 ; Bravard *et al.*, 1999 a et b ; Arnaud-Fassetta, 2003 ; Steiger *et al.*, 2005, Piégay *et al.*, 2008). L'approche est ici différente : l'incision du Niger supérieur guinéen et malien (en amont de Ségou), limitée du fait de son caractère récent et de conditions lithologiques défavorables, est peu perceptible. Elle s'inscrit en outre dans un contexte d'évolution

climatique, marquée principalement durant deux décennies (années 1970 et 1980) par une grande sécheresse au Sahel (Lebel et Ali, 2009 ; Mahé et Paturel, 2009) et plus généralement en Afrique de l'Ouest (Mahé *et al.*, 2005 ; Descroix *et al.*, 2009 ; Dezetter *et al.*, 2010).

La dégradation du milieu a marqué les esprits et conduit encore à des amalgames, non seulement dans les médias mais aussi dans les services techniques concernés, pour lesquels le lit mineur du Niger serait tout au contraire affecté par un ensablement. Ce danger est en effet régulièrement dénoncé. En 2003, « *les responsables de la mairie de Bamako insistent sur la lutte contre l'ensablement* » (France Soir, 16 juillet). En 2006, le Forum de Ségou en appelle à une prise de conscience : « *il est important d'avoir à l'esprit que l'ensablement progresse vers le Sud* » (2 février) ! Des difficultés de navigation existent incontestablement et, pour les journalistes, elles suffisent à prouver un ensablement (Afribone, 13 janvier 2009), en dehors de toute autre considération quant à l'évolution des débits liquides. L'ensablement vu par les médias étant une vérité acquise, un vaste programme de curage du lit du fleuve est dès lors envisagé... Les services techniques concernés ne sont pas en reste. Les études commanditées par l'Autorité du Bassin du Niger, à l'échelle des pays concernés (ABN, DNH Guinée, 2004) comme dans la synthèse régionale (Toure et Abdou, 2005), soulignent elles-mêmes la nécessité de « *dégager le surplus de sable* », de « *draguer les matériaux sableux pour limiter l'ensablement* », « *l'accélération de l'ensablement dans le Niger supérieur* ». En outre, on relève des contradictions : l'érosion des berges étant soulignée en même temps que l'ensablement, l'importance du stockage des sédiments dans les réservoirs (ABN, BRLI, 2007) en même temps que dans les lits en aval. L'expertise collégiale « *Avenir du fleuve Niger* », réalisée en 2007, est de ce point de vue plus satisfaisante, davantage fondée dans ses appréciations du transport solide par le fleuve, du moins des transports en suspension (Marie *et al.*, 2007), le transport de fond étant très mal connu (Simons *et al.*, 1984).

Le problème est que l'ensablement est intimement lié à l'importance du charriage, que les mesures de charge en suspension ne traduisent pas rigoureusement. Il y a donc, du point de vue méthodologique, nécessité d'une ou d'autres approches pour apprécier la réalité ou non du phénomène d'ensablement. Du moins l'expertise précitée insiste-t-elle avec juste raison sur la nécessité de distinguer totalement ce qui se passe dans le delta central et sur le Niger amont. J.-C. Olivry (2002) est le premier à avoir critiqué cette méprise. Pour lui, « *il est assez subjectif de penser qu'il y a plus de sables transportés par le fleuve aujourd'hui parce que l'on voit dans son lit un paysage de bancs de sables pendant six mois au lieu de trois, ou que les bancs de sables ont engraisé parce que la navigation n'est plus possible que quatre mois au lieu de six* ». Le discours alarmiste relatif à l'ensablement semble relever le plus souvent de l'idée reçue. Ce parti pris ne fait évidemment pas office de preuve et il est nécessaire d'aborder cette question sur la base des seules méthodes et observations scientifiques.

L'article se propose d'apprécier la réalité de l'ensablement du lit du fleuve Niger sur son cours supérieur, en amont du delta intérieur. La problématique est en effet fondamentalement différente sur le cours moyen, exclu de notre étude, où le fleuve est soumis effectivement à un ensablement lié à la concomitance d'une double dynamique, éolienne en particulier dans la boucle du Niger entre Koryoumé et Gao (Mainguet et Dumay, 2011), et de ruissellement. Dans un premier temps, le contexte du bassin du Niger supérieur est examiné à travers différents facteurs physiques et humains qui conditionnent les écoulements et les transferts de charges solides. L'approche est conduite de manière différenciée dans l'espace et dans le temps, soulignant les gradients et les évolutions hydroclimatiques et d'occupation du sol. Différents indicateurs, directs et indirects, témoignant d'une faiblesse des apports de matériaux au fleuve et d'une tendance à l'incision verticale et latérale du lit mineur du fleuve sont présentés. Cette évolution est ensuite expliquée en soulignant notamment l'originalité hydrodynamique d'un bassin versant qui s'inscrit aux trois quarts dans les domaines soudano-guinéen et sud-soudanien peu densément peuplés et morphologiquement pénestables, sauf à proximité de Bamako où les prélèvements de matériaux dans le fleuve pour les besoins de la construction induisent un déséquilibre du lit fluvial amorcé il y a une trentaine d'années. Certaines conséquences immédiates ainsi que des perspectives, hydrauliques, socio-économiques et écologiques sont discutées.

ville de Ségou, notamment pour des raisons hydrologiques ; il existe en effet, à l'aval de Ségou, de nombreuses diffusions naturelles, dont certaines aménagées (prise d'eau du barrage de Markala), et il est impossible dans ce contexte de tracer une véritable limite de bassin versant. Au sein de ce bassin versant du Niger supérieur de 130 762 km<sup>2</sup> (73 % de ce territoire en Guinée, 24 % au Mali et 3 % en Côte d'Ivoire) peuvent être caractérisés différents sous-bassins (fig. 1), parmi lesquels celui du Sankarani, contrôlé par le barrage de Sélingué, représente à lui seul le quart (25,6 %) de la superficie totale. Parmi toutes les caractéristiques morphométriques des bassins versants, on retiendra que la pente longitudinale moyenne d'ensemble (0,68 m/km) apparaît faible dans ce contexte de bassin amont.

Entre Kangaba et Koulikoro, soit 166 km de bief, le Niger présente deux zones de rapides majeurs : ceux de Sotuba sur 14 km, immédiatement à l'aval de Bamako, et ceux de Kénié sur 18 km. Sur ces deux zones, séparées par un court palier et créant un dénivelé d'environ 25 m entre Bamako et Koulikoro, le fleuve Niger coule sur des formations gréseuses et dans un dédale de chenaux à forte pente pouvant présenter des chutes en basses eaux. La pente moyenne du fleuve est de 0,10 m/km en amont de Bamako (observation 2010) et de 0,07 m/km en aval de Kénié et de Koulikoro (Brunet Moret *et al.*, 1986 a et b). Hors les rapides de Sotuba et Kénié, le lit mineur du Niger a une largeur moyenne de 930 m et comporte de très nombreuses îles végétalisées dont 8 de plus de 100 ha et 3 de plus de 400 ha.

## Contexte

Le contexte est celui du bassin versant du Niger supérieur (hors bassin versant du Bani), en amont du delta intérieur, dont le point d'entrée est généralement situé à Ké Macina (Brunet-Moret *et al.*, 1986 a et b). En fait, il paraît plus justifié de le placer à hauteur de la

Fig. 1 – Le bassin versant du Niger supérieur en amont de Ségou : les principaux sous-bassins et les stations hydrométriques du Niger supérieur guinéen et malien. 1 : limite du bassin versant du Niger ; 2 : petits bassins versants juxtaposés ; 3 : réseau hydrographique ; 4 : station hydrométrique ; 5 : barrage ; 6 : barrage en projet ; 7 : ville.

Fig. 1 – The basin of the Upper Niger upstream to Segou: main sub-catchments and hydrometric stations of the Upper Niger River (Guinea and Mali). 1: boundaries of the Upper Niger catchment; 2: small juxtaposed drainage basins; 3: drainage pattern; 4: hydrometric station; 5: dam; 6: projected dam; 7: town.

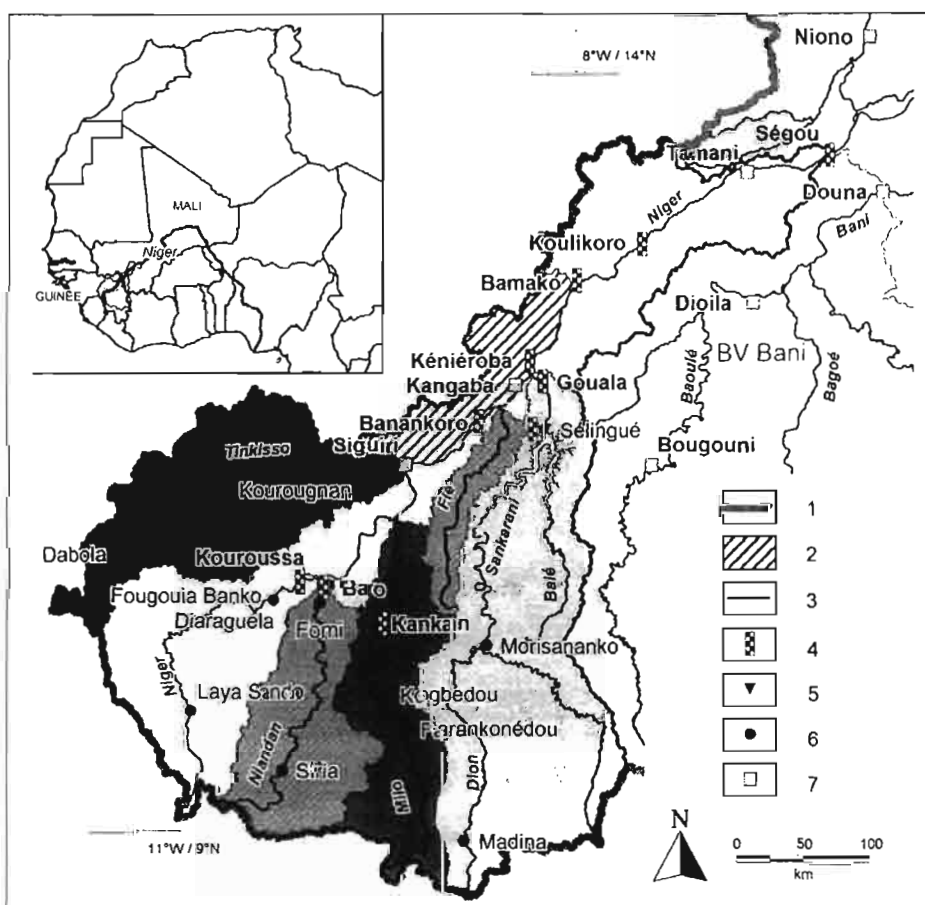
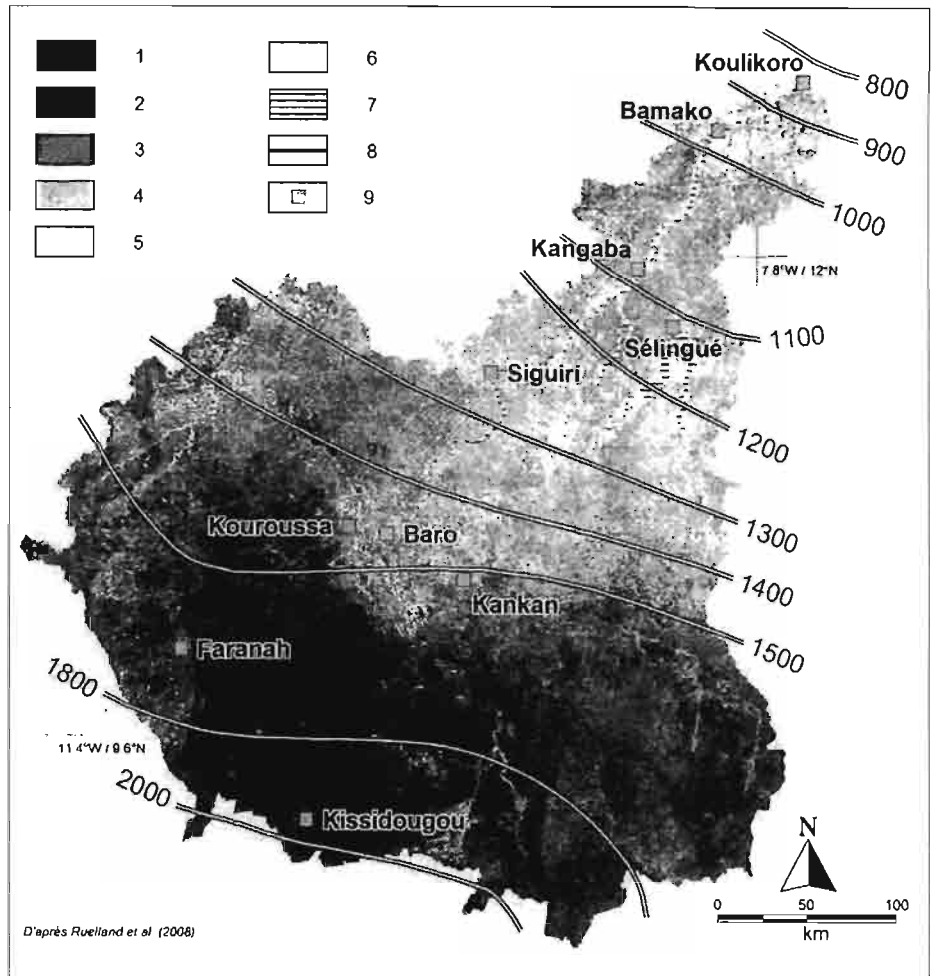


Fig. 2 – Les précipitations moyennes interannuelles (d'après L'Hôte et Mahé, 1996) et la couverture végétale sur le bassin versant du Niger supérieur (d'après le données de D. Ruelland et al., 2008, en amont de Koulikoro). 1 : forêt semi-humide ; 2 : forêt dense sèche ; 3 : savane arborée ; 4 : savane arbustive ; 5 : sol peu végétalisé dont cultures ; 6 : sol nu ; 7 : eau ; 8 : isohyète moyenne annuelle ; 9 : ville.

Fig. 2 – Interannual average precipitations (according to L'Hôte and Mahé, 1996) and the land cover on the catchment area of the Upper Niger at Koulikoro (according to data of D. Ruelland et al., 2008, upstream to Koulikoro). 1: semi-humid forest; 2: dry forest; 3: tree savannah; 4: shrub savannah; 5: land with little revegetation, including crops; 6: bare soil; 7: water; 8: average annual isohyets; 9: town.



## Précipitations et débits liquides

### Précipitations

Ainsi que le montre la fig. 2, le bassin versant s'inscrit sur un grand axe d'environ 700 km de longueur, entre les isohyètes 2 000 mm au sud et 800 mm à Koulikoro, 600 mm plus au nord à l'exutoire à Ségou (gradient de l'ordre de 200 mm pour 100 km). La zonation climatique, *grosso modo* latitudinale (WNW-ESE), est nette depuis les confins méridionaux pré-forestiers jusqu'au Sahel à l'exutoire. L'essentiel du bassin est représenté par les domaines soudano-guinéen et sud-soudanien, dont la limite avec le domaine nord-sou-

danien peut être fixée à l'isohyète 1 000 mm. La station pluviométrique de Kankara (fig. 3), au cœur de la partie guinéenne du bassin versant, affiche sur une période de référence longue (1922-2006) et quasi complète (3 années manquantes) une moyenne de 1 542 mm. L'indice de variation est proche de 2 entre un maximum de 2 046 mm (1957) et un minimum de

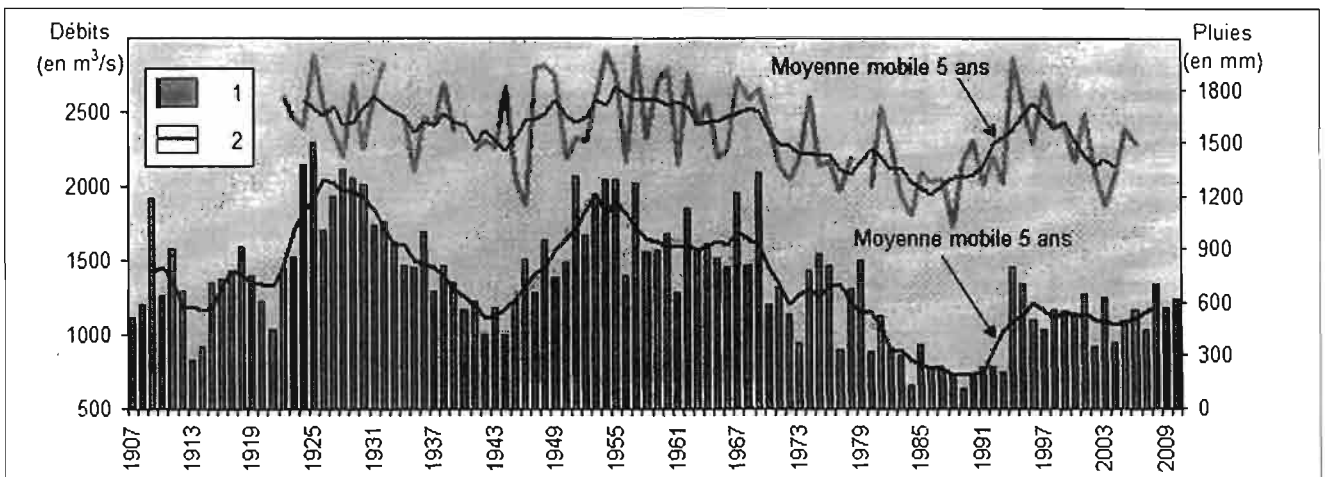


Fig. 3 – Les débits annuels à Koulikoro (période de référence 1907-2010) et les précipitations annuelles à Kankara (1922-2006). 1 : débits (en m<sup>3</sup>/s) ; 2 : pluies annuelles (en mm).

Fig. 3 – Annual discharge at Koulikoro gauging station (1907-2010) and annual rainfall at Kankara (1922-2006). 1: discharge (in m<sup>3</sup>/s); 2: annual rainfall (in mm).

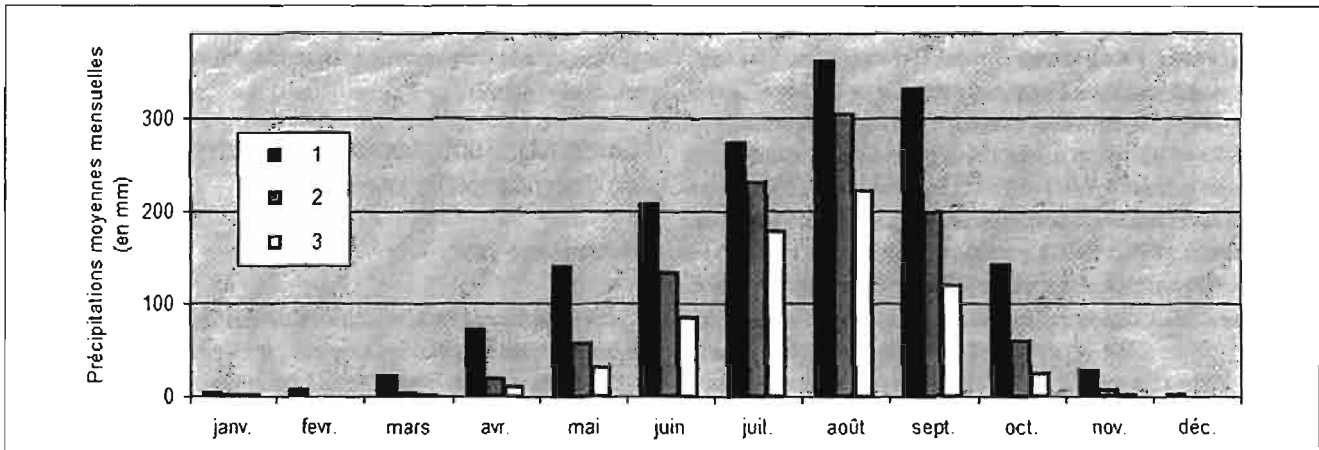


Fig. 4 – Les précipitations moyennes mensuelles à Kankan, Bamako et Ségou. 1 : Kankan ; 2 : Bamako ; 3 : Ségou.

Fig. 4 – Monthly average precipitations at Kankan, Bamako and Ségou. 1: Kankan; 2: Bamako; 3: Segou.

1 030 mm (1988). La station de Bamako enregistre une moyenne de 1 010 mm sur une période quasi identique (1926-2006) ; l'indice de variation est de 2,2 (maximum : 1 499 mm en 1967 ; minimum : 677 mm en 1983). La moyenne inter-annuelle est de 664 mm à Ségou (indice : 2,5), qui marque l'entrée dans le domaine sahélien. Les courbes des moyennes mobiles illustrent le fléchissement bien connu en Afrique de l'Ouest, brutal et marqué, de ces précipitations annuelles durant deux décennies, entre la deuxième moitié des années 1960 et la fin des années 1980, puis le retour à une situation globalement plus favorable, sans atteindre toutefois les moyennes antérieures à la sécheresse et laissant place ponctuellement à des années nettement déficitaires (1 149 mm en 2003 à Kankan, 750 mm en 2002 à Bamako). Le régime des pluies est partout celui d'un climat tropical à deux saisons contrastées avec un nombre de mois pluvieux (au seuil de 100 mm) de 6 à Kankan, de 4 à Bamako, et de 3 à Ségou ; le mois d'août étant partout le plus arrosé (respectivement 359,5 mm, 302,5 mm et 220,7 mm ; fig. 4).

### Les débits liquides

La caractérisation des écoulements du Niger est faite à hauteur de la station de Koulikoro, station parmi les plus remarquables d'Afrique de l'Ouest du fait de sa longue période de référence (1907-2010) et de ses étalonnages corrects (192 jaugeages), et non pas à celle de Ségou, où l'on ne dispose que des enregistrements de hauteurs d'eau et dont l'étalonnage est impossible du fait de l'existence du barrage de Markala en aval. Mais les apports au Niger entre Koulikoro et Ségou sont très faibles (fig. 1). Le régime du fleuve Niger est un régime pluvial unimodal avec à Koulikoro un maximum moyen en septembre (4 681 m<sup>3</sup>/s), décalé d'un mois par rapport au maximum des pluies. Le minimum se situe en avril (87 m<sup>3</sup>/s), à la fin de la saison sèche. L'histogramme des débits moyens annuels et la courbe des moyennes mobiles (5 points) à Koulikoro (fig. 3) montrent une grande variation interannuelle des écoulements entre un maximum de 2 279 m<sup>3</sup>/s en 1925 et un minimum de 633 m<sup>3</sup>/s en 1989 et une succession de sept (7)

	Année	Débits annuels		Moyenne des extrêmes annuels	
		Moyenne (en m <sup>3</sup> /s)	Coefficient de variation (CV)	Minima (en m <sup>3</sup> /s)	Maxima (en m <sup>3</sup> /s)
Période de référence	1907-2010	1 358	0,28	58	5 569
Période à faible hydraulicité	1982-1993	776	0,11	84	3 335
Périodes intermédiaires	1907-1921	1 301	0,21	36	5 313
	1937-1947	1 245	0,12	33	5 333
	1970-1981	1 228	0,18	23	5 200
	1994-2010	1 164	0,12	96	5 008
Périodes à forte hydraulicité	4 périodes	1 231	0,17		
	1922-1936	1 794	0,15	53	7 088
	1948-1969	1 694	0,15	66	6 679
	2 périodes	1 734	0,15		

Tab. 1 – Quelques débits caractéristiques du Niger à Koulikoro pour différentes périodes de référence.

Tab. 1 – Characteristic discharges at Koulikoro gauging station for various base periods.

phases au long de ce siècle d'enregistrements distribuées entre trois types de situation : 1) des périodes à forte hydraulicité de 1922 à 1936 et de 1948 à 1969 ; 2) une période aux écoulements particulièrement faibles entre 1982 et 1993 ; 3) des périodes « intermédiaires » (un total de 54 années) de 1907 à 1921, de 1937 à 1947, de 1970 à 1981 et celle observée depuis 1994. La même évolution est enregistrée plus en amont sur le Niger (Kouroussa, Siguiri) et sur ses affluents (Milo à Kankan, Niandan à Baro ; Descroix *et al.*, 2009). Avec un coefficient de variation (CV) de 0,28 (tab. 1), les volumes écoulés annuellement à Koulikoro présentent une forte variabilité interannuelle. Sur le Niger

supérieur guinéen et malien, la moyenne des débits annuels observés à Koulikoro depuis 1994 est de 1 164 m<sup>3</sup>/s, soit -14 % par rapport à l'ensemble de la série observée, -31 % par rapport à la dernière période à forte hydraulicité de 1948-1969 et +50 % par rapport à la période d'extrême sécheresse des années 1982 à 1993. La période de 1982 à nos jours qui nous intéresse particulièrement comprend la période la plus sèche (1982-1993) à faible variabilité (CV = 0,11) et depuis 1994 une période intermédiaire du point de vue de l'hydraulicité. Cette dernière phase, également à faible variabilité (CV = 0,12), ne comporte que quelques « accidents », telle la crue de 2001 (6 778 m<sup>3</sup>/s) qui ne se situe qu'au 21<sup>e</sup> rang des plus fortes crues depuis 1907. L'évolution *a priori* paradoxale des débits moyens minimums inter-annuels s'explique en fait par les lâchures en saison sèche du barrage de Sélingué, fonctionnel depuis 1982. La moyenne des débits minimums annuels observés de 1982 à 2010 est de 96 m<sup>3</sup>/s, soit plus de deux fois supérieure à celle de la période 1907-1981 (42 m<sup>3</sup>/s). Cette augmentation importante des débits d'étiage, due au fonctionnement de l'usine hydro-

électrique de Sélingué, a très certainement facilité la navigation et par conséquent le transport fluvial des matériaux extraits du fleuve.

### Substrats, sols, couverture végétale et occupation humaine

#### Substrats et sols

L'ensemble des roches acides cristallines et cristallophylloïennes constitué par les granites, les quartzites, les migmatites et les schistes représentent, quel que soit le bassin versant, entre 80 % et 100 % de la superficie (fig. 5). Les sols correspondants sont le plus souvent des sols ferrugineux tropicaux à cuirasse affleurante ou carapace à faible profondeur, reposant sur des altérites sablo-argileuses. Le démantèlement de ces sols fournit un matériel gravillonnaire abondant (Kowal et Kassam, 1978). Par ailleurs, les grès, potentiels fournisseurs de sables par désagrégation mécanique, ne sont présents que dans la partie aval, étroite, du bassin versant.

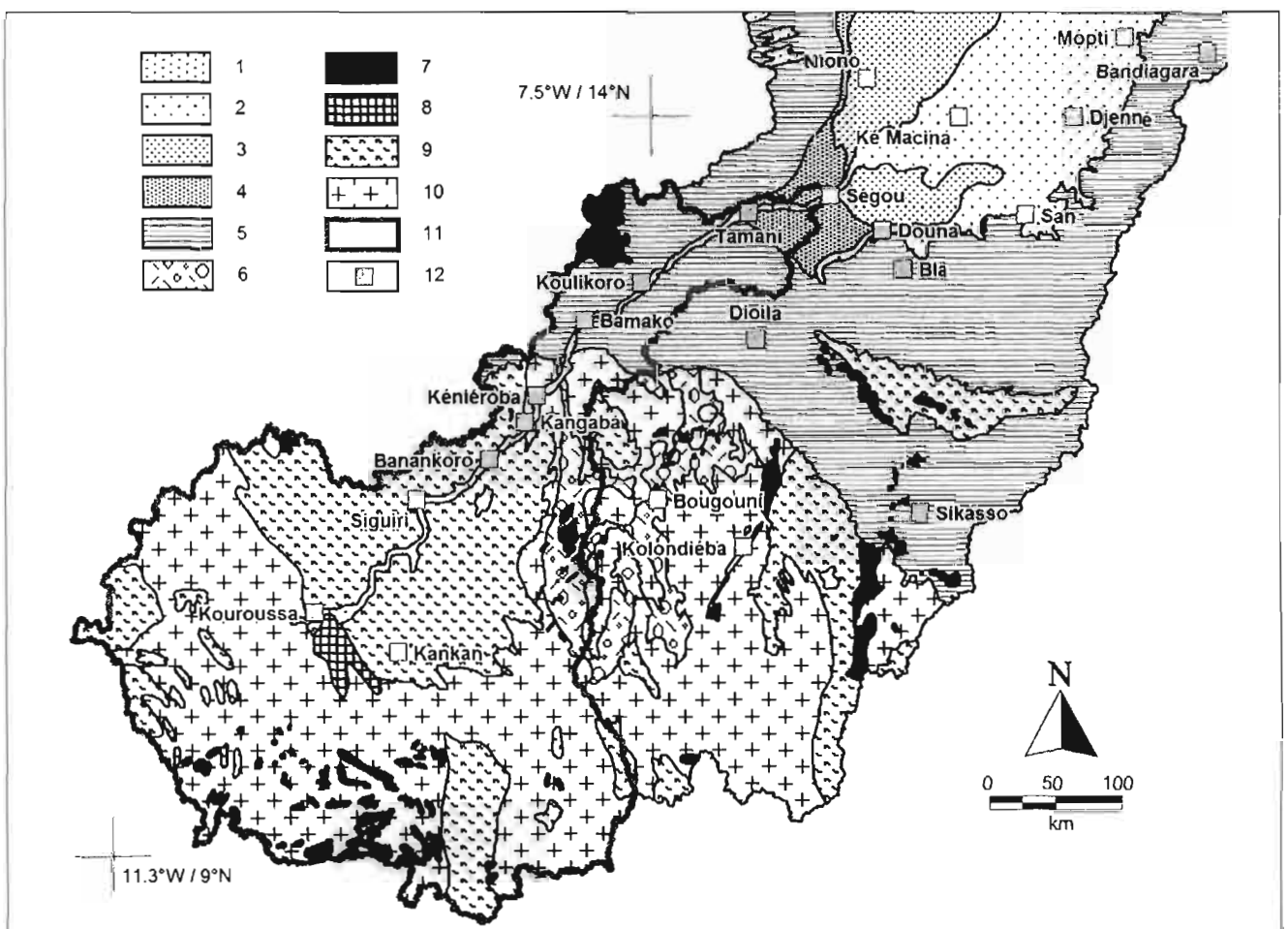


Fig. 5 – La géologie du bassin versant du Niger supérieur. 1 : dunes et zones ensablées ; 2 : alluvions récentes ; 3 : alluvions anciennes ; 4 : continental terminal ; 5 : grès ; 6 : grauwackes et conglomérats ; 7 : roches volcaniques et dolérites ; 8 : roches vertes ; 9 : schistes, mica-schistes, quartzites ; 10 : granites ; 11 : limite du bassin versant ; 12 : ville.

Fig. 5 – The geology of the Upper Niger catchment. 1: dunes and silted up areas; 2: recent alluvial deposits; 3: old alluvial deposits; 4: continental terminal; 5: sandstone; 6: grauwacke and conglomerate; 7: volcanic rocks and dolerite; 8: green rocks; 9: schist, mica-schist and quartzite; 10: granite; 11: boundaries of the catchment; 12: town.

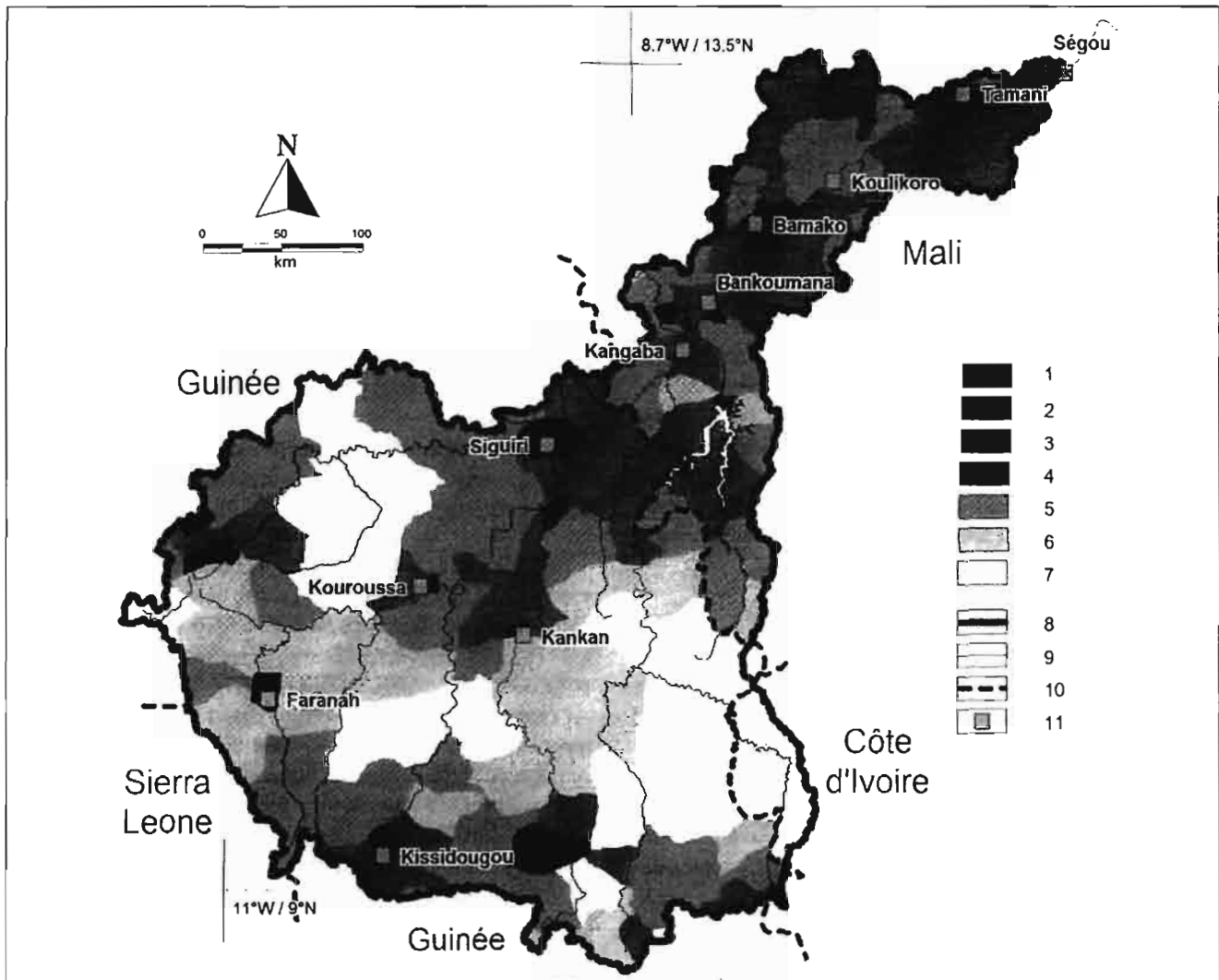


Fig. 6 – Les densités de population (en hab./km<sup>2</sup>) dans le bassin versant du Niger supérieur. 1 : densité (d) > 200 ; 2 : 100 < d < 200 ; 3 : 50 < d < 100 ; 4 : 20 < d < 50 ; 5 : 10 < d < 20 ; 6 : 5 < d < 10 ; 7 : d < 5 ; 8 : limite de bassin versant ; 9 : réseau hydrographique ; 10 : frontière ; 11 : ville.

Fig. 6 – Population densities (in inhabitants/km<sup>2</sup>) in the Upper Niger catchment. 1: density (d) > 200; 2: 100 < d < 200; 3: 50 < d < 100; 4: 20 < d < 50; 5: 10 < d < 20; 6: 5 < d < 10; 7: d < 5.

### Couverture végétale et occupation humaine

La distribution de la végétation dans le bassin dépendant en grande partie de la répartition des précipitations annuelles, de leur moyenne interannuelle et de la durée de la saison des pluies, les domaines phytogéographiques s'organisent suivant le même principe de zonation latitudinale que les isohyètes (fig. 2). Cette identité est d'autant plus effective que les perturbations anthropiques (défrichement, mise en culture, urbanisation) sont peu marquées. Les densités de population, établies sur la base des recensements de 1996 en Guinée (Keita, 2000) et de 1998 au Mali sont en effet faibles à très faibles, particulièrement en Guinée avec 15 hab./km<sup>2</sup> contre 63 hab./km<sup>2</sup> pour la partie malienne (densité moyenne pour l'ensemble du bassin : 26 hab./km<sup>2</sup>). Seules les circonscriptions urbaines de superficie limitée ont des densités de population supérieures à 100 hab./km<sup>2</sup> ou 200 hab./km<sup>2</sup> (Kissidougou, Kankan, Bamako ; fig. 6). Dans la partie mé-

ridionale sud-soudanienne du bassin versant, les forêts denses sèches et les savanes arborées sont quasi ubiquistes ou, du moins, représentent plus de 70 % du territoire (90 % sur le bassin du Niger à la confluence du Niandan). Quelques îlots de forêts semi-humides sont reconnaissables à l'extrême-sud. Au nord d'une ligne passant par Kankan et Kouroussa, la couverture végétale s'éclaircit, notamment le long des principaux couloirs alluviaux (Niger, Fié, Sankarani), et dans les bassins tel celui de Siguiri. Mais à l'ouest de Siguiri ou même plus au nord, les savanes arborées sont encore largement présentes. Les faciès nord-soudaniens sont évidemment d'autant moins représentés que la figure correspond au bassin versant à l'exutoire de Koulikoro et non pas de Ségou mais la portion de territoire aval, comprise entre ces deux localités, est restreinte. À l'échelle de l'ensemble du bassin versant, forêts denses sèches et savanes arborées représentent encore plus de 60 % du territoire, les sols nus ou cultivés un peu plus de 10 % seulement (tab. 2). D'après

	Eau	Sols nus	Sols peu végétalisés dont cultures	Savanes arbustives	Savanes arborées	Forêts denses sèches	Forêts semi- humides
Sankarani (confluence Niger)	1,18	2,62	7,30	31,76	23,31	33,55	0,28
bassin versant Niger (Koulikoro)	0,72	4,21	8,20	25,26	23,76	37,34	0,52

Tab. 2 – Les états de surface dans le bassin du Niger supérieur à l'amont de Koulikoro et sur le sous-bassin du Sankarani.

Tab. 2 – Land cover on the Upper Niger catchment up to Koulikoro and on the Sankarani under catchment.

l'analyse des images satellitales de 1975, 1985 et 2000 (Rueland *et al.*, 2008), la tendance au déboisement est modérée. La proportion des savanes boisées demeure même stable. L'augmentation de la place des sols nus et des zones de cultures est principalement centrée sur la partie nord-soudanienne, témoignant de la place de l'agriculture et de l'élevage. Dans ce contexte, l'apport en matériaux sableux paraît relativement limité.

## Méthodes et résultats

Différentes méthodes ont été appliquées afin de rechercher des indicateurs permettant de conforter les hypothèses de faiblesse des apports longitudinaux et du non-ensablement du Niger supérieur sur 150 km environ, depuis sa confluence avec le Sankarani jusqu'à Koulikoro. Certaines de ces méthodes telles que la quantification des prélèvements sont appliquées à l'ensemble de ce linéaire tandis que d'autres méthodes diachroniques ne peuvent être appliquées que sur les sites où l'on dispose d'une information antérieure. Sans être originale, l'observation directe de l'évolution des profils du lit mineur n'en est pas moins pertinente, à condition que cet examen soit conduit avec beaucoup de rigueur.

## L'évolution des profils en travers du lit mineur : une tendance à l'incision

Une perception directe : les levés diachroniques des profils en travers du fleuve Niger

Deux séries de profils en travers, réalisés à 28 ans d'intervalle (1982, 2009-2010), ont pu être établies sur trois sites : Kéniéroba et Samaya en amont de Bamako, Koulikoro en aval (fig. 7). Dans les trois cas, le profil ancien a été réalisé par l'IGN (IGN, ABN, SOGREAH, 1982 a à c ; IGN, 1988) – la méthode n'étant pas décrite dans les archives –, le plus récent par nos soins (IRD-Bamako) au moyen d'un courantomètre ADCP de type Rio Grande 1200 pour les parties en eau et d'un DGPS Leica 500 pour les berges, les îles et les plaines alluviales. Sur chaque site, les deux profils sont calés dans le même système altimétrique. Les difficultés ont été de trois ordres : une recherche laborieuse d'archives qui n'ont été finalement retrouvées qu'à l'IGN-France à Saint-Mandé, le petit nombre de profils levés par l'IGN, des profils exploitables en plus petit nombre encore puisque cela suppose de retrouver des bornes de nivellement mises en place de

Niger à Kéniéroba									
	A-B			C-D			Section complète (AB+BC+CD+DE)		
	1982	2010	Ecart	1982	2010	Ecart	1982	2010	Ecart
Altitude minimum	324,19	323,37	-0,82	323,38	323,16	-0,22	323,38	323,16	-0,22
Altitude moyenne	324,88	324,88	0,00	324,28	323,61	-0,67	325,29	324,73	-0,56
Niger à Samaya									
	A-B			C-D			Section complète (AB+BC+CD)		
	1982	2010	Ecart	1982	2010	Ecart	1982	2010	Ecart
Altitude minimum	316,53	315,58	-0,95	316,00	315,26	-0,74	316,00	315,26	-0,74
Altitude moyenne	317,59	316,79	-0,79	317,05	316,16	-0,89	318,37	317,55	-0,82
Niger à Koulikoro									
	A-B			C-D			Section complète (AB+BC+CD)		
	1982	2010	Ecart	1982	2010	Ecart	1982	2010	Ecart
Altitude minimum	289,08	288,17	-0,91	289,57	289,34	-0,23	289,08	288,17	-0,91
Altitude moyenne	290,78	290,27	-0,51	291,36	291,12	-0,24	291,20	291,02	-0,18

Tab. 3 – Evolution entre 1982 et 2010 des altitudes (en m) minimales et moyennes sur les profils en travers du lit mineur du Niger à Kéniéroba, Samaya et Koulikoro.

Tab. 3 – Diachronic surveys between 1982 and 2009-2010 of minimum and average altitude (in m) in cross sections of the low-flow channel at Kenieroba, Samaya and Koulikoro.



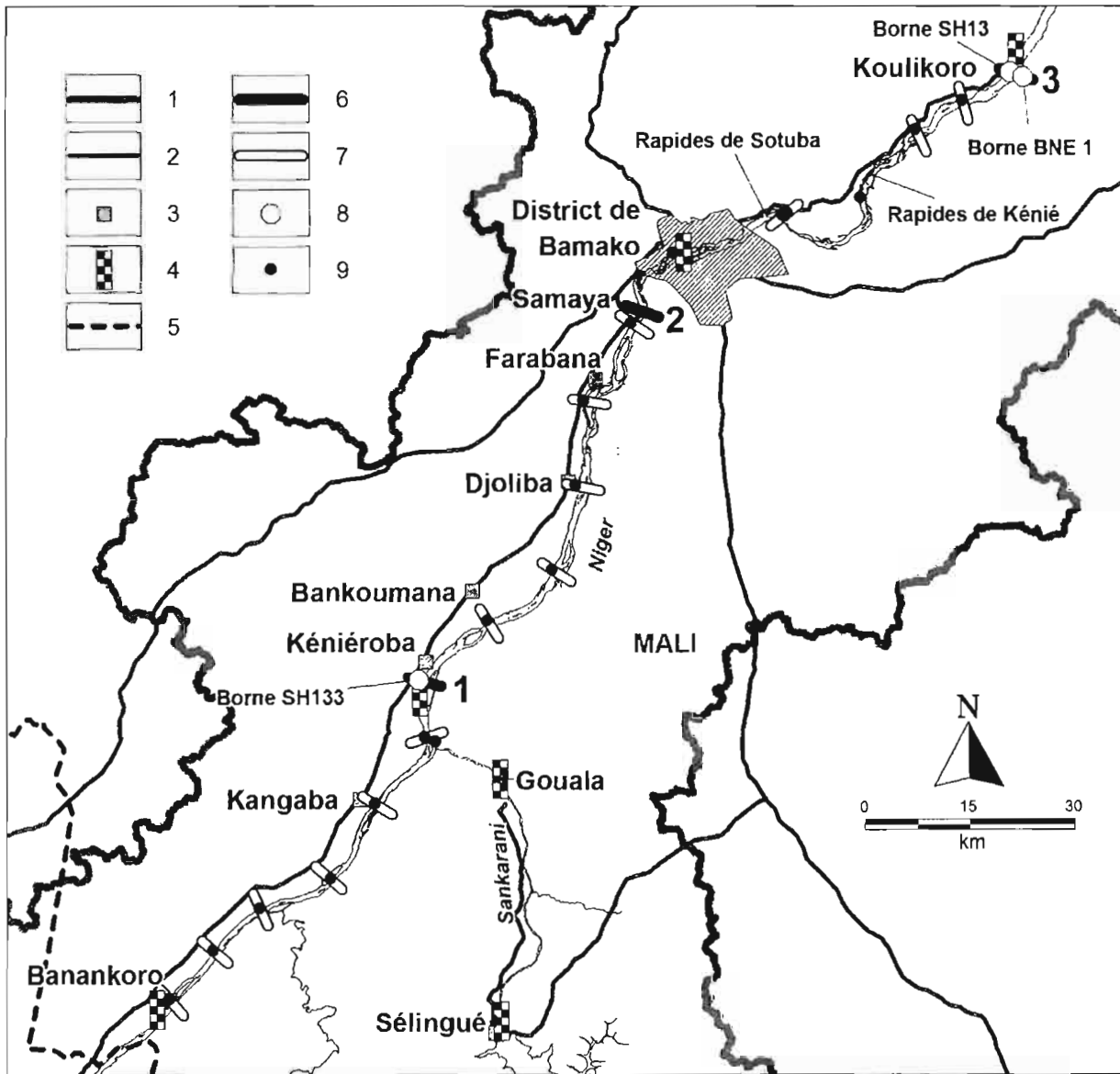


Fig. 7 – Situation des profils transversaux. 1 : limite de bassin versant du Niger ; 2 : route ; 3 : ville ; 4 : station hydrométrique ; 5 : frontière ; 6 : profils topométriques 1982 et 2009-2010 ; 7 : profil 2010 ; 8 : borne IGN (1982) ; 9 : borne IRD/DNH (2009-2010).

Fig. 7 – Situation of transverse profiles. 1: boundaries of the catchment; 2: road; 3: town; 4: hydrometric station; 5: frontier; 6: topometric transverse profiles 1982 and 2009-2010; 7: profile 2010; 8: IGN bench-mark (1982); 9: IRD-DNH bench mark (2009-2010).

puis près de 30 ans et de s'assurer de leur stabilité (exemple : bornes notées « SH133 » située au niveau de la station limnimétrique de Kéniéroba, « SH13 » et « BNE1 » à Koulikoro). Dans le cas contraire, un nivellement sur une grande distance a dû être effectué à Samaya. Même s'il ne s'agit là que d'une vision diachronique, ponctuelle dans le temps et ne nous informant pas sur l'évolution du profil durant tout l'intervalle de temps, ces levés comparés traduisent tous une même tendance d'évolution du bief par sapement des berges et surcreusement du ou des bras du lit mineur. Le sapement latéral est particulièrement marqué à Kéniéroba, en rive droite, où le recul est de l'ordre de 150 m, soit plus de 5 m/a en moyenne (fig. 8). Quoique moins net, il apparaît aussi sur le même site en rive gauche, ainsi qu'à Koulikoro. À Samaya, le recul est marqué sur les deux berges d'un îlot central. Le caractère indéniable de l'encaissement est bien mis en lumière

par le tab. 3. L'évolution des altitudes moyennes et minimales à 28 ans d'intervalle se traduit sur chacun des trois profils et l'ensemble des sections considérées par un abaissement (un seul cas de stabilité d'altitude moyenne, sur la section AB à Kéniéroba). Sur l'ensemble de la section, l'abaissement de l'altitude minimum est compris entre -0,22 m et -0,91 m, celui de l'altitude moyenne entre -0,18 m et -0,82 m. Cet abaissement est évidemment inégal : le plus faible à Koulikoro où le lit mineur est le plus large ; le plus remarquable en amplitude (-0,95 m sur la section AB), et en continuité (-0,82 m pour l'altitude minimum sur la section complète) à Samaya. Cet approfondissement n'exclut pas des engraisements ponctuels sur des îlots sableux (tronçon BC à Kéniéroba). L'encaissement du lit ne correspond pas forcément à une incision du lit rocheux (tronçon CD à Kéniéroba), peut-être plus ancienne, mais en tout cas à un enlèvement des sables, au demeurant de

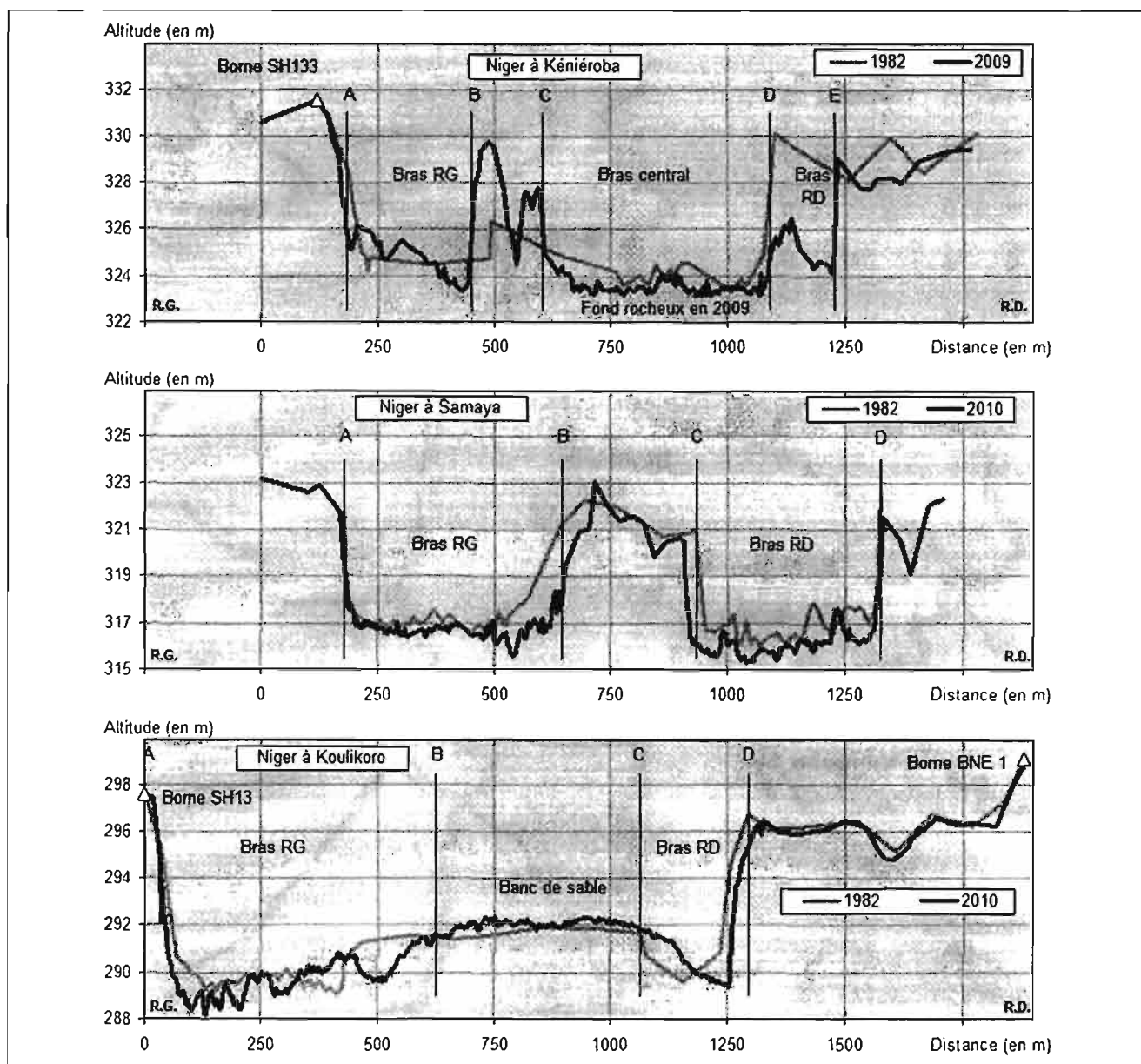


Fig. 8 – Profils en travers du Niger à Kénieroba, Samaya et Koulikoro en 1982 et 2009-2010.

Fig. 8 – Cross sections of the Niger River at Kenieroba, Samaya and Koulikoro in 1982 and 2009-2010.

faible épaisseur (décimétrique à métrique), qui recouvrait ou recouvre encore le substratum gréseux. En outre, des témoignages ont été recueillis auprès de personnes ayant une relation de proximité durable avec le fleuve. La tendance au désensablement est difficile à percevoir mais pour d'anciens membres du club nautique de Bamako, comme pour les hydrologues maliens de la Direction Nationale de l'Hydraulique, des bancs de sable, non visibles aujourd'hui, étaient encore présents dans les années 1980, immédiatement en amont de Bamako. Le sapement de berges est plus facilement confirmé. Des témoignages précis, tel que celui de Mme T. Touré, responsable de la mise en place des périmètres irrigués de Koursalé (Action villageoise d'auto-développement puis ONG Fondem), à 50 km en amont de Bamako, font état à partir du milieu des années 1980 d'un recul de la berge de rive gauche, sur une profondeur plurimétrique et une longueur kilométrique. Ce té-

moignage n'est pas contestable, le recul se manifestant par la nécessité de replier chaque année les motopompes. De la même façon, le sapement provoque un déchaussement des socles de fixation des échelles limnimétriques et leur basculement à Gouala, en aval du Sankarani.

#### Une perception indirecte : l'évolution des courbes de tarage d'une station hydrométrique

Notre station hydrométrique de référence est celle de Koulikoro, sur le fleuve Niger, à une cinquantaine de kilomètres en aval de Bamako. Cette station du réseau malien d'observations hydrométriques de la Direction Nationale de l'Hydraulique est en effet suivie depuis 1907. Elle a fait l'objet de 192 jaugeages dont plusieurs correspondent ou sont proches des débits maximums enregistrés (tab. 1 et fig. 9), ce qui confè-

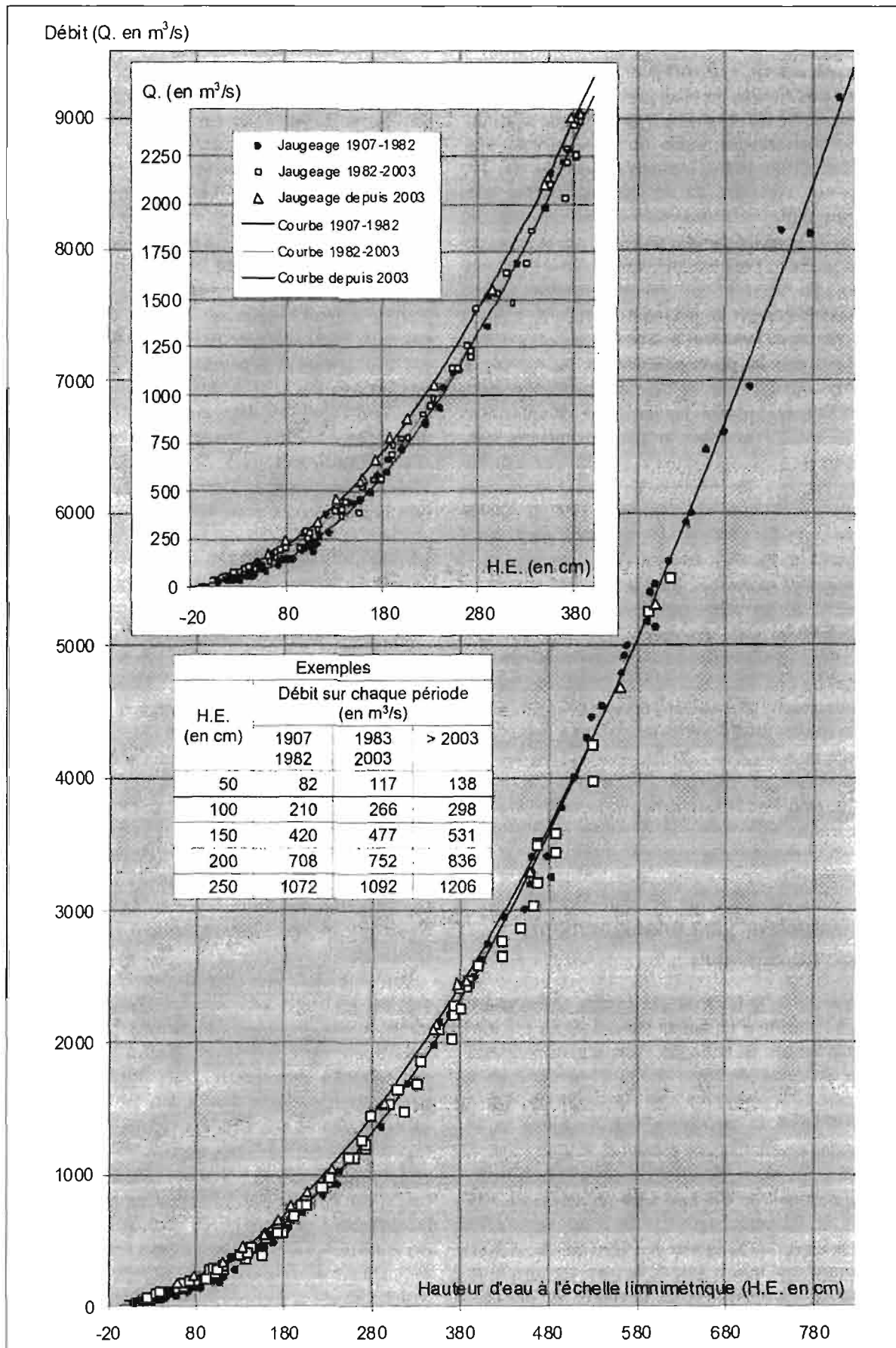


Fig. 9 – Courbes de tarage à la station de Koulikoro (1907-2010).

Fig. 9 – Rating curves of Koulikoro gauging station (1907-2010).

re une bonne validité aux courbes d'étalonnage. Aucun aménagement important n'a été réalisé à proximité de la station de Koulikoro et, par ailleurs, le dossier de suivi de la station n'indique aucune modification du calage altimétrique de l'échelle limnimétrique. De fait, la station hydrométrique de Koulikoro a été remarquablement stable, au moins pendant trois quarts de siècle (1907-1982). L'examen minutieux des 192 jaugeages permet cependant de proposer aujourd'hui trois courbes de tarage (fig. 9). L'utilisation de modes opératoires différents lors de la réalisation des jaugeages sur les trois périodes aurait pu être à l'origine d'un artefact dans l'interprétation des données. Mais les deux premières courbes de tarage ont été tracées à partir de jaugeages réalisés de manière identique au moyen de moulinets hydrométriques et de cercles hydrographiques pour les positionnements sur les sections de mesure. La troisième courbe de tarage s'appuie principalement sur des jaugeages réalisés au moyen de courantomètres à effet doppler (ADCP) ainsi que sur plusieurs mesures réalisées de manière identique aux périodes précédentes et traduisant le même détarage. En l'absence de jaugeage entre mars 1979 et octobre 1982 ainsi qu'entre mars 1997 et octobre 2003, les années 1982 et 2003 ne correspondent pas à un repère strict dans le temps mais le « glissement » continu de la courbe de tarage est indéniable. En d'autres termes, pour un même niveau d'eau, les débits sont maintenant plus importants que par le passé. Cela témoigne d'un changement progressif des conditions d'écoulement dû à une modification de la morphologie du bief. Les trois courbes de tarage identifiées (courbe initiale, courbe intermédiaire et courbe actuelle) montrent en outre que les modifications sont les plus importantes dans la période récente (2003 à 2010), pourtant trois fois plus courte que la période précédente de 1982 à 2003. On assisterait donc à une modification plus rapide de la morphologie du lit du Niger à Koulikoro durant les dernières années, autrement dit à une accélération du processus d'incision.

### La faiblesse des apports sédimentaires au Niger supérieur : les enseignements du barrage de Sélingué

Cette hypothèse de la faiblesse des apports sédimentaires est vérifiée à l'échelle d'un bassin versant de 32 135 km<sup>2</sup>, contrôlé par le barrage de Sélingué, l'aménagement hydraulique le plus important du Niger supérieur, construit sur le Sankarani entre 1977 et 1981 et dont la mise en eau date de 1982. L'appréciation du remblaiement sédimentaire du réservoir constitue en effet un bon témoin de la dynamique de transport sur les versants. Pour cela, une campagne bathymétrique du réservoir de 430 km<sup>2</sup> a été entreprise en 2008 par l'Institut de Recherches pour le Développement (IRD Bamako) et la Direction Nationale de l'Hydraulique (DNH), devant permettre une mise à jour de la carte topographique de la retenue et l'actualisation de la courbe de cubature. 427 profils ADCP, 732 km de levés, plusieurs centaines d'observations ponctuelles (sonde à main, points de berge) ont été réalisés. Une forte similitude apparaît entre les profils tracés à partir de la carte Italconsult dressée en 1964 et ceux de l'étude IRD-DNH-Université Lyon 3 de 2008 (Ital-

consult, 1964 ; Laval, 2008 ; Ferry et al., 2008). Les formes d'origine (lit mineur, bras latéraux, bourrelets de berge) sont parfaitement conservées. Compte tenu de l'imprécision de la courbe de capacité dressée par Italconsult en 1964, il est difficile de la mettre en comparaison avec celle de 2008. Tout du moins peut-on conclure qu'il n'y pas de remblaiement significatif de la retenue en 44 ans. Outre le fait que l'opérateur Electricité Du Mali (EDM) peut se réjouir de ce que la capacité de stockage du barrage n'évolue pas négativement, ce résultat est d'une extrême importance car il montre que la dynamique érosive n'est pas telle qu'elle puisse fournir des apports sableux ou d'une autre nature à l'aval d'un grand bassin versant, tout à fait représentatif du bassin du Niger supérieur par sa géologie et ses sols, sa densité d'occupation et sa couverture végétale (tab. 2). Le barrage n'est donc pas la cause de l'incision en aval, même s'il y a une concordance des dates entre sa mise en eau et les dates des jaugeages permettant de percevoir un détarage de la station de Koulikoro. Comme on va le voir, le début des années 1980 marque surtout le démarrage des prélèvements sableux dans la partie amont du lit du Niger.

### Les prélèvements de sables dans le Niger supérieur malien

La problématique de prélèvement des matériaux (sables et graviers) dans le lit du fleuve Niger a été abordée récemment (Basselot, 2007 ; Collierie, 2008 ; Collierie et N'Diaye, 2008 ; Collierie, 2010). Les sites d'extraction et de stockage entre la frontière guinéenne et Mopti sont désormais identifiés. Cette localisation est liée à la proximité des villes et des grands aménagements routiers et hydrauliques ainsi qu'à la possibilité d'exporter les matériaux prélevés au niveau des routes, des pistes et des biefs navigables. C'est entre Kangaba et Koulikoro que l'exploitation revêt la plus grande ampleur et le caractère le plus organisé (fig. 10). L'exploitation est plus diffuse dans les régions administratives de Ségou et Mopti, où la demande est moins forte qu'à proximité de Bamako. Elle est très réduite en Guinée.

Deux modes de prélèvements peuvent être distingués : les uns, sur les berges sableuses, par chargement direct de camions-bennes, les autres dans le fond du lit mineur avec extraction manuelle, souvent en apnée à des profondeurs pouvant atteindre trois mètres – une drague fonctionne également depuis quelques années aux environs de Djoliba –, transport fluvial des matériaux dans des pinasses ou pirogues (capacité : 2-3 m<sup>3</sup>, traction humaine ou à moteur), parfois agglutinées en « grappes » de 10 à 15 pirogues, autour d'une embarcation équipée d'un moteur (fig. 11), débarquement dans des ports de stockage (fig. 10) et tamisage des matériaux. Les sables eux-mêmes sont naturellement bien triés. Quatre échantillons prélevés entre Djoliba et Koulikoro donnent une proportion de sables grossiers comprise entre 94,9 % et 99,7 %, dont 23,6 % à 41,3 % entre 1 et 2 mm.

Selon le Syndicat National des Transporteurs Routiers Urbains et Interurbains du Mali (Syntrui-Mali), sur le tronçon entre Kangaba et Koulikoro, la filière d'exploitation et de transport de sables et de gravillons aurait fait intervenir entre

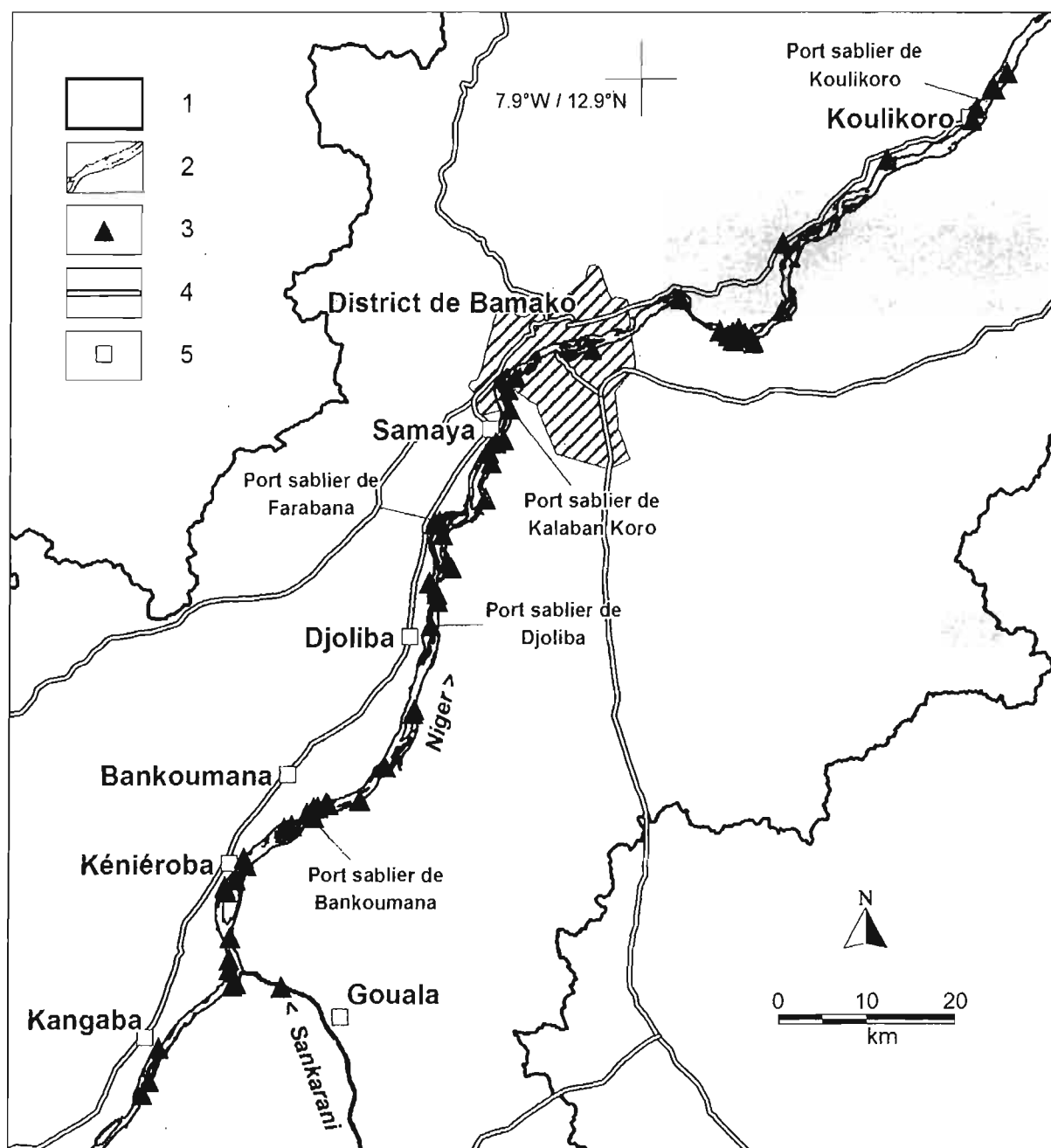


Fig. 10 – Les sites d'extraction et les ports sabliers entre Kangaba et Koulikoro. 1 : limite du bassin versant du Niger à Ségou ; 2 : limite du lit mineur du Niger et du Sankarani ; 3 : site d'extraction ou de stockage de sable et de gravier ; 4 : route principale ; 5 : ville.

Fig. 10 – Sites of extraction and storage of sand in harbours between Kangaba and Koulikoro. 1: boundaries of the Upper Niger catchment up to Segou; 2: boundaries of the Niger and Sankarani low-flow channels; 3: sites of extraction and storage of sand and fine gravel; 4: main road; 5: town.

15 000 et 17 000 personnes et plus de 3 000 pinasses en 2007. D'après les estimations faites à partir de nos enquêtes (Basselot, 2007), entre 15 Mm<sup>3</sup> et 20 Mm<sup>3</sup> de sables et de graviers auraient été extraits du fleuve sur ce même tronçon entre 2000 et 2006 et transportés par pinasse vers les principaux ports de débarquement (Djoliba, Kalaban Koro, Koulikoro... ; fig. 12). En ramenant ces chiffres à la superficie approximative du lit du fleuve entre Kangaba et Koulikoro (152 km<sup>2</sup>), cela équivaut à un prélèvement de l'ordre de 1,5 cm/a ! Si l'on retient en outre les chiffres de transport par camion, dont l'ordre de

grandeur a été établi par des comptages aux entrées de la ville et vérifié par une mise en rapport avec les chiffres d'importation annuelle de ciment, l'ablation annuelle est d'ordre pluricentimétrique !

Cette demande en sables et graviers est évidemment à mettre en rapport avec l'extraordinaire croissance démographique et spatiale de Bamako (Diarra *et al.*, 2003). La population de la capitale malienne est passée en effet de 130 000 habitants en 1960 à un peu plus d'1 million en 1998, puis 1 809 100 habitants en 2009 (4<sup>e</sup> Recensement gé-

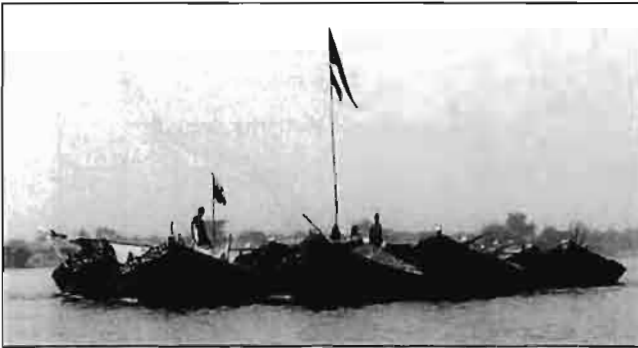


Fig. 11 – Transport de sables en groupe de pinasses assemblées autour d'une embarcation motorisée.

Fig. 11 – Transport of sand by a cluster of pirogues rafted together around a motor vessel.



Fig. 12 – Le port sablier de Kalaban Koro en amont de Bamako (rive droite du Niger).

Fig. 12 – The Kalaban Koro sand port upstream of Bamako (right bank of the Niger, Mali).

néral), avec des taux de croissance de l'ordre de 4 à 5 % par an, pouvant atteindre 12 % entre 1968 et 1976. La croissance des surfaces réellement bâties entre 1986 et 1996 est de plus de 3 700 ha. L'extension de la ville, estimée à 11 700 ha en 1996, est toujours très rapide et cette superficie est largement dépassée aujourd'hui, avec une croissance du bâti notamment en rive droite, en direction de l'aéroport, et le long du fleuve, particulièrement en amont (quartier de Kalaban Koro par exemple). Aucun autre gîte d'extraction n'étant repérable en dehors du couloir alluvial, il est bien clair que c'est l'extraction des sables et des graviers du fleuve qui a permis une construction urbaine aussi soutenue.

## Discussion et perspectives

### L'origine des sables

L'apport hydro-sédimentaire dans le réseau hydrologique majeur est le produit de plusieurs facteurs agissant en interrelation sur les versants élémentaires : l'agressivité climatique et le ruissellement, la nature des sols, la couverture végétale et l'occupation de l'espace, ce dernier paramètre étant essentiel dans la mesure où il conditionne, directement ou non, les autres facteurs de l'érosion.

Aux latitudes sud-soudaniennes et soudano-guinéennes, l'agressivité des pluies est forte ; pourtant, le milieu naturel

est pénestable (Roose, 1980) ; les forêts denses sèches, les savanes arborées associent des houppiers plus ou moins contigus et des tapis d'herbacées, annuelles et pérennes, étagés, paralysant efficacement le ruissellement et plus encore jouant un rôle de peigne vis-à-vis des particules. Dans le même ordre d'idées, les états de surface, d'origine mécanique et/ou biologique (pellicules algaires), peuvent certes renforcer les coefficients de ruissellement mais limitent les apports solides du fait de leur cohésion (Mietton, 1988). S. Cherel-Geffard et J.-C. Olivry (1996) ont eux aussi mis en doute une évolution des états de surface des sols du bassin telle qu'elle puisse expliquer une augmentation de la masse de sables disponible.

En l'absence de terrasses anciennes riches en matériau grossier, les seules unités susceptibles de fournir au Niger les sables moyens et grossiers et les gravillons charriés au fond sont les surfaces à sol nu et les cuirasses ou carapaces ferrugineuses plus ou moins démantelées. Le transfert de charge entre ces unités morphopédologiques et le réseau principal dépend toutefois de leur situation géographique. Il n'est réel que lorsque les plaques de sol nu sont situées à proximité immédiate des vallées ou lorsque les forêts galeries des bas-fonds, nouvellement défrichées, sont soumises à des ravinelements (Puech *et al.*, 2000). L'analyse par télédétection confirme l'impression donnée par les reconnaissances de terrain, celle d'une tendance modérée au déboisement. Quant aux sols nus, ils sont relativement peu fréquents, hormis dans les grands couloirs alluviaux du Niger et ses principaux affluents (Fié par exemple), où le défrichement partiel des galeries n'est pas un facteur récent. Cet état de stabilité morphologique est d'abord conditionné par la faiblesse du peuplement du bassin guinéen – plus du quart (26,2 %) compte moins de 5 hab./km<sup>2</sup> –, elle-même liée à des causes premières d'ordre historique (sociétés à pouvoir moins centralisé qu'en domaine soudano-sahélien) et sanitaire (endémies plus nombreuses : onchocercose, maladie du sommeil). Même en période de péjoration climatique, comme celle des années 1970 et 1980, la vulnérabilité de ces territoires sud-soudaniens ne doit pas être globalement assimilée à celle des confins soudano-sahéliens, où l'on a une « surcharge » en hommes et en bétail. Ce constat n'est pas contradictoire avec le fait que certaines régions sud-soudaniennes, hors du bassin du Niger, comme le cercle de Sikasso (Traore, 1978 ; Tappan et Mc Gahuey, 2007), représentent des secteurs où l'occupation de l'espace est beaucoup plus marquée.

Les estimations de flux annuels de matières en suspension sur cette partie guinéenne du bassin du Niger confortent l'hypothèse de transferts limités : à Banankoro, les tonnages sont compris entre 4,8 t.km<sup>-2</sup>.a<sup>-1</sup> et 12,1 t.km<sup>-2</sup>.a<sup>-1</sup> (moyenne interannuelle : 8 t.km<sup>-2</sup>.a<sup>-1</sup> ; Olivry, 2002 ; Droux *et al.*, 2003). Ces taux de dégradation spécifique vont en augmentant modérément dans la partie nord-soudanienne du bassin (9,9 t.km<sup>-2</sup>.a<sup>-1</sup> à Koulikoro, 12,2 t.km<sup>-2</sup>.a<sup>-1</sup> à Ké Macina ; Picouet, 1999 ; Picouet *et al.*, 2000). Quelle que soit la proportion du charriage par rapport au transport en suspension, généralement comprise sur les grands fleuves entre 5 % et 25 % (Leliavsky, 1961), le transport de fond est donc très probablement limité. Le cas de la retenue du barrage de Sélingué est exemplaire de la grande stabilité du milieu sud-soudanien. Il est vrai que les transferts ont pu être limités en

amont de la retenue par une végétation aquatique (*bourgou*) abondante mais, inversement, le remblaiement sédimentaire aurait pu être favorisé par une pression anthropique bien visible sur les versants proches du réservoir et pourtant tel n'est pas le cas. D'autres aménagements hydrauliques de taille plus modeste existent sur le bassin versant : barrage de Dabola sur le Tinkisso en Guinée, petits barrages et aménagements hydrauliques (digues de ceinture coupant la circulation de l'eau des périmètres rizicoles vers le fleuve) sur une zone de plus de 5 000 km<sup>2</sup> de la rive gauche du Niger, entre Siguiri et Bankoumana. Ces aménagements ont un impact sur le régime hydrologique et par conséquent sur les flux de matière solide des affluents du fleuve. À ces aménagements hydrauliques, il faut également ajouter tout autre aménagement susceptible d'entraver le cheminement de l'eau, en particulier les deux routes de rive gauche conduisant en Guinée depuis Bamako. Tous ces aménagements font obstacle, ralentissent les écoulements et favorisent la sédimentation. Ils participent et participeront plus encore dans un proche avenir du principe de discontinuité des transferts dans l'espace. Si l'on ajoute en effet aux barrages existants ceux qui sont en projet à court ou plus long terme (Coyne et Bellier, Sir A. Gibb & Partners, 1983 ; TECSULT, 1998 ; ABN, BRLI, 2007), ce sont 51,2 % du bassin du Niger (à l'exutoire de Ségou) qui ne pourront pas constituer, quoi qu'il en soit de l'évolution de l'occupation des sols et de la dégradation des milieux, des amonts fournisseurs (tab. 4).

La question des apports éoliens récents peut être théoriquement posée. En effet, ces apports sont effectifs dans le cours moyen du Niger, en particulier dans la « boucle » entre Koryoumé et Gao, où le fleuve s'écoule entre de puissants cordons dunaires. La dynamique de mobilisation des sables par le vent est potentiellement active jusqu'à la limite sud du domaine sahélien, fixée à l'isohyète 600 mm, à la latitude de Ségou (13°27'N). Cette limite s'est déplacée d'un degré environ vers le sud au moment de la sécheresse des années 1970-1980, ainsi qu'on l'avait constaté alors au Burkina Faso (Mietton, 1988). En 1983, année du total pluviométrique le plus faible, Bamako a enregistré 677 mm, Ségou 391 mm en 1982 et à 11 reprises moins de 600 mm durant les deux décennies précitées. La partie extrême aval de notre domaine d'étude, entre Bamako et Ségou, a pu, de façon marginale, être l'objet de remanie-

ments par le vent de sables grossiers déjà en place, y compris dans le lit mineur en basses eaux, ce qui a pu contribuer aussi à faire imaginer une dynamique d'ensablement du fleuve. Dès lors, on peut s'interroger quant à l'origine des sables visibles actuellement dans le lit du Niger.

Un stock hérité de périodes sèches quaternaires, durant lesquelles les couvertures végétales ont été réduites, y compris aux latitudes sud-soudaniennes, laissant place à des processus de désagrégation mécanique sur les socles rocheux, notamment gréseux, proches de la vallée du Niger, et à un ruissellement occasionnellement actif, est hautement probable. L'importance de ce stock est difficile à apprécier. Si l'on s'en tient à la seule épaisseur de sables estimée ponctuellement en 1982, il apparaît assez faible. Par ailleurs, les extractions nécessitent apparemment des déplacements de pirogues de plus en plus lointains pour répondre à la demande.

En résumé, le bilan sédimentaire a toutes les raisons d'être déficitaire entre une extraction soutenue, des apports longitudinaux très limités et un stock initial apparemment peu fourni. L'évolution de la morphodynamique du lit mineur du Niger supérieur n'est donc pas un constat anodin. Les conséquences en sont multiples.

### Les conséquences de l'incision et les perspectives

La ressource en sables, d'exploitation économiquement aisée, n'est pas inépuisable. L'industrie du bâtiment devra tôt ou tard prendre en compte cette donnée. La production de granulats à partir des roches compactes, en place, doit être envisagée. On ne peut que recommander d'identifier rapidement des gîtes fournisseurs de sables et de graviers, sauf à puiser davantage dans les plaines de débordement mais il y a là un coût écologique ou agricole. Les prélèvements dans la pseudo-falaise gréseuse proche des principaux sites de consommation, celui de Bamako en particulier, constituent une solution certes financièrement plus coûteuse mais humainement plus acceptable que les prélèvements par plongée dans le fleuve... L'utilisation préférentielle des dolérites intrusives au sein du grès a d'ailleurs commencé de façon timide.

D'un point de vue hydraulique, les conséquences de la faiblesse des débits solides peuvent être appréciées de manière

Bassins versants en amont des barrages en Guinée (G) et au Mali (M)	Superficie contrôlée (en km <sup>2</sup> )	Pourcentage par rapport au bassin du Niger à Ségou (en %)
<i>Barrages existants</i> Sankarani au barrage de Sélingué (M)	32 135	24,6
<i>Barrages en projet à moyen et long termes</i> Niandan au site de Fomi (G) Milo au site de Farankonedou (G) Niger au site de Diaraguella (G)	12 630 5 580 16 500	9,7 4,3 12,6

Tab. 4 – Le contrôle des transports solides par les barrages actuels ou projetés dans le bassin versant du Niger supérieur.

Tab. 4 – *The bedload transport control by dams in use or projected.*

ambivalente : positive pour ce qui est du non-remblaiement des réservoirs de barrage, négative pour ce qui est de l'incision. Dès lors que la charge solide transportée par le Niger diminue, la puissance nette du fleuve est rendue disponible pour l'incision du lit et le sapement des berges. Le sapement, qui fait perdre de bonnes terres agricoles, peut aussi mettre en péril des ouvrages d'art (piles des ponts, murs et « quais »).

D'un point de vue hydrologique, le creusement du lit mineur entraîne, à débit égal, des conséquences négatives du fait d'un moindre accès à l'eau de pompage lors des étiages (augmentation de la distance et/ou de la dénivelée entraînant un surcoût), voire à l'eau gravitaire avec des prises de canaux en situation perchée, du fait aussi à terme d'une moindre fréquence des débordements dans les plaines alluviales et d'une recharge phréatique probablement limitée d'autant. Mais l'irrégularité des précipitations et des débits, le caractère récent de ces évolutions et le manque de données, en particulier sur les eaux souterraines, interdisent pour l'heure de conforter ces hypothèses.

D'un point de vue morphologique, cet abaissement du profil, une fois les bancs sableux enlevés, sera toutefois probablement limité par le caractère résistant du substrat gréseux. Les points « durs » sont d'ailleurs très nombreux (une quarantaine sur les 370 km entre la frontière guinéenne et Ségou) et fragmentent le profil en long, notamment les rapides de Sotuba et de Kénéié.

D'un point de vue écologique, les impacts des pratiques de collectes de sable et de gravier ont probablement de fortes répercussions sur l'ichtyofaune et par là-même sur la productivité de la pêche. De nombreux entretiens semi-directifs ou en conversation libre avec les pêcheurs mettent en lumière diverses répercussions immédiates sur la ressource piscicole. La multiplication des trous dans le lit entraînerait une modification des lieux de repos pour les poissons, une dégradation des zones de frayères et une diminution des éléments nutritifs. De manière plus hypothétique, le bruit des moteurs des pinasses générerait les concentrations de poissons. Les techniques de pêche elles-mêmes sont perturbées. La multiplication des trous faits par les sabliers est considérée comme l'une des contraintes majeures. En effet, les filets traversants n'épousant pas la forme de ces différents creusements, ces derniers font office de trappes de sortie par lesquelles les poissons peuvent s'échapper. Les déplacements incessants des convois de pinasses interdisent la pose de filets dormants dans le chenal de navigation. De plus, les pêches nocturnes sont devenues très risquées pour les pêcheurs eux-mêmes. De ce fait, ils délaissent le lit mineur pour pêcher dans des bras (*falla*) annexes. Enfin, les zones mises en défend, délimitées par décision des conseils de pêche, en vue de pêches collectives temporaires, ne sont pas toujours respectées par les sabliers alors qu'aucune activité n'est sensée traditionnellement être pratiquée dans le fleuve. Pour autant, il est très difficile de mettre en relation cette évolution du biotope avec celle des quantités prélevées. Les rapports des différents services de pêche ne donnent que des informations ponctuelles sur les quantités et les espèces prélevées. Plus encore, cette question ne peut être vue uniquement au travers de l'impact de la collecte des alluvions sur

le fleuve et son environnement. Les pratiques de pêche doivent être aussi prises en compte tout comme l'évolution de la démographie et de la pression de pêche.

## Conclusions

L'exemple d'incision du Niger supérieur est original non pas tant par le fait que le facteur déclenchant du phénomène en est d'origine anthropique – ce qui est très commun – mais 1) par la hiérarchisation qui peut être faite entre les prélèvements essentiels de matériaux au fond du lit et la construction d'un barrage sur l'affluent principal du Niger qu'est le Sankarani, dont le bassin versant produit très peu de charge solide, et 2) par le fait que l'abaissement du profil, encore peu perceptible, est cependant révélé alors même qu'il est acquis pour bon nombre d'acteurs qu'il y a ensablement. Cela permet d'alerter les pouvoirs publics de façon relativement précoce et de réorienter au mieux les demandes de financement. Cette problématique devrait de manière idéale être intégrée dans des préoccupations d'aménagement du territoire, en tirant parti de ce que l'on connaît dans nos pays développés mais en ayant présent à l'esprit que nos solutions ont un coût très éloigné des possibilités de ces pays. Quoi qu'il en soit, le sable n'est pas une ressource inépuisable et les besoins en matériaux de construction sont énormes dans ce pays d'Afrique Noire où la croissance démographique est accélérée. Des gîtes nouveaux devraient être identifiés, notamment dans la pseudo-falaise gréseuse, profitant de la proximité de la capitale et aussi de la facilité de taille de la roche dans l'escarpement. L'évolution révélée de la morphodynamique du lit mineur du Niger supérieur dans le sens d'un abaissement de la ligne d'eau n'est pas un constat anodin. Dans un pays comme le Mali dont les ressources économiques sont faibles, ses conséquences dans les domaines de la pêche et de l'agriculture retiennent prioritairement l'attention. Mais les perturbations écologiques sur les espèces végétales et animales, non seulement dans le lit mineur mais aussi dans la plaine d'inondation, mériteraient d'être rapidement l'objet de préoccupations scientifiques.

## Remerciements

*Les travaux présentés ont été réalisés dans le cadre du projet « Niger-Loire : gouvernance et culture » ; projet piloté par l'UNESCO et bénéficiant du soutien de la Commission Européenne, que les auteurs tiennent à remercier, de même que les trois relecteurs anonymes.*

## Références

- ABN, DNH Guinée (2004) – *Etude multisectorielle nationale (Guinée) : évaluation des opportunités et contraintes au développement dans la portion nationale du bassin du Niger*. Rapport final, 232 p.
- ABN, BRLI (2007) – *Elaboration du plan d'action de développement durable du bassin du Niger. Phase 1 : bilan-diagnostic*. Rapport provisoire, 312 p.
- Arnaud-Fassetta G. (2003) – *River channel changes in the Rhone Delta (France) since the end of little Ice Age: geomorphological*



- adjustment to hydroclimatic change and natural resource management. *Catena* 51, 141-172.
- Basselot F.-X. (2007)** – *L'économie fluviale du Niger de la frontière guinéenne à Ségou. Pêche, transport et extraction de matériaux*. Mémoire du master 1 Recherche Interface Nature-Sociétés, Université Jean-Moulin (Lyon 3), IRD Bamako, 84 p.
- Bravard J.-P., Amoros C., Pautou G., Bornette G., Bournaud M., Creuzé des Chatelliers X., Gibert J., Peiry J.-L., Perrin J.-F., Tachet H. (1997)** – River incision in South-East France : morphological phenomena and ecological effects. *Regulated Rivers: Research & Management*, 13, 75-90.
- Bravard J.-P., Kondolf G.M., Piegay H. (1999a)** – Environmental and societal effects of channel incision, and remedial strategies. In Darby S.E., Simon A. (Eds.) *Incised River Channels*. Wiley, Chichester, 304-341.
- Bravard J.-P., Landon N., Peiry J.-L., Piegay H. (1999b)** – Principles of engineering geomorphology for managing channel erosion and bedload transport, examples from French rivers. *Geomorphology* 31, 291-311.
- Brookes A., Shields F.D. (Eds.) (1996)** – *River channel restoration: guiding principles for sustainable projects*. Wiley, Chichester, 433 p.
- Brunet-Moret Y., Chaperon P., Lamagat J.-P., Molinier M. (1986a)** – *Monographie hydrologique du fleuve Niger. Tome 1 : Niger supérieur*. Editions de l'ORSTOM, Collection Monographies hydrologiques, 8, 396 p.
- Brunet-Moret Y., Chaperon P., Lamagat J.-P., Molinier M. (1986b)** – *Monographie hydrologique du fleuve Niger. Tome 2 : Cuvette lacustre et Niger moyen*. Editions de l'ORSTOM, Collection Monographies hydrologiques, 8, 505 p.
- Cherel-Geffard S., Olivry J.-C. (1996)** – Le bassin versant du Niger - In *Water Resource Management and Desertification: Processes and Challenges*. WMO, Geneva, 109-126.
- Collerie M. (2008)** – *Etude et cartographie des sites d'extraction et de dépôt de sable et graviers sur le Niger entre Ségou et Kona et sur le Bani entre Douna et Mopti*. UNESCO, CE, IRD, UMR G-EAU, université François Rabelais (Tours), IMACOF, Tours, 38 p.
- Collerie M. (2010)** – *Approche préliminaire de la dynamique sédimentaire du fleuve Niger, de Banankoro à Markala au Mali*. IRD, UMR G-EAU, université François Rabelais (Tours), UNESCO, CE, Région Centre (France), MAE (France), Mission Val de Loire, Montpellier, 88 p.
- Collerie M., N'Diaye N. (2008)** – *L'extraction de sable et de gravier sur le Niger entre Ségou et Kona et sur le Bani entre Douna et Mopti – Rapport d'enquête*. UNESCO, CE, IRD, UMR G-EAU, université François Rabelais (Tours), IMACOF, Bamako, 78 p.
- Coyne et Bellier, Sir A. Gibb & Partners (1983)** – *Plan général d'aménagement hydraulique de la Haute Guinée. Dossier final. Volume 1. Rapport général*. Ministère de l'Energie et de l'Environnement, Conakry, 199 p.
- Darby S.E., Simon A. (1999)** – *Incised river channels. Processes, forms, engineering and management*. Wiley, Chichester, 442 p.
- Descroix L., Mahé G., Lebel T., Favreau G., Galle S., Gautier E., Olivry J.C., Albergel J., Amogu O., Cappelaere B., Dessouassi R., Diedhou A., Le Breton E., Mamadou I., Sighomnou D. (2009)** – Spatio-temporal variability of hydrological regimes around the boundaries between Sahelian and Sudanian areas of West Africa: A synthesis. *Journal of Hydrology* 375, 90-102.
- Dezetter A., Paturol J.-E., Ruelland D., Ardoin-Bardin S., Ferry L., Mahé G., Dieulin C., Servat E. (2010)** – Prise en compte des variabilités spatio-temporelles de la pluie et de l'occupation du sol dans la modélisation semi-spatialisée des ressources en eau du haut fleuve Niger. In *Global Change: Facing Risk and Threats to Water Resources*. Proceedings of the Sixth World FRIEND Conference, Fez, Morocco, October 2010. AISH Publications 340, 544-552.
- Diarra B., Ballo M., Champaud J. (2003)** – *Structure urbaine et dynamique spatiale à Bamako (Mali)*. Editions Donniya, Bamako, 164 p.
- Droux J.-P., Mietton M., Olivry J.-C. (2003)** – Flux de matières particulaires en suspension en zone de savane soudanienne : l'exemple de trois bassins versants maliens représentatifs. *Géomorphologie : relief, processus, environnement* 2, 99-110.
- Ferry L., Muther N., Martin D. (2008)** – *Caractérisation des usages de l'eau et disponibilité des ressources en eau de surface dans le bassin supérieur et le delta intérieur du Niger - Travaux réalisés par l'IRD pendant l'année 1 du programme Niger-Loire (nov. 2007 à nov. 2008)*. IRD, UMR G-EAU, CE, UNESCO, Bamako, 37 p.
- Galay V.J. (1983)** – Causes of river bed degradation. *Water Resources Research* 19, 1057-1090.
- IGN (1988)** – Répertoire des altitudes d'échelles de crues implantées dans la vallée du fleuve Niger en République du Mali. IGN Paris, 188 p.
- IGN, ABN, SOGREAH (1982a)** – *Modèle mathématique du fleuve Niger. Vol. 1 : Rapport de synthèse de l'état et de l'utilisation du modèle à fin 1982*. SOGREAH, Grenoble, 56 p.
- IGN, ABN, SOGREAH (1982b)** – *Modèle mathématique du fleuve Niger. Vol. 2 : Cartographie*. SOGREAH, Grenoble, 17 p.
- IGN, ABN, SOGREAH (1982c)** – *Modèle mathématique du fleuve Niger. Vol. 3 : Travaux topographiques et cartographiques (Carte au 1/50000. Planches 160 à 168)*. SOGREAH, Grenoble, 63 p.
- Italconsult (1964)** – *Etude préliminaire du barrage-réservoir de Sélingué. 6 volumes*. Italconsult Rome, 184 p.
- Keita M.-L. (2000)** – *Recensement général de la population et de l'habitation de 1996. Perspectives démographiques de la Guinée*. Ministère du Plan, Direction des Statistiques, Conakry, 95 p.
- Kowal J.M., Kassam A.H. (1978)** – *Agricultural ecology of savanna: a study of West Africa*. Clarendon Press, Oxford, 403 p.
- Laval M. (2008)** – *Etude bathymétrique de la dynamique sédimentaire dans le barrage-réservoir de Sélingué sur le Sankarani(Mali)*. Mémoire de master 2 Recherche Interface Nature-Sociétés, université Lyon 3-IRD Bamako, 97 p.
- Lebel T., Ali A. (2009)** – Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990-2007). *Journal of Hydrology* 375, 52-64.
- Leliavsky S. (1961)** – *Précis d'hydraulique fluviale*. Dunod, Paris, 356 p.
- L'hôte Y., Mahé G. (1996)** – *Carte des précipitations moyennes annuelles (période 1951-1989) de l'Afrique de l'ouest et centrale au 1/6 000 000*. ORSTOM Editions, Paris.
- Mahé G., Paturol J.E. (2009)** – 1896-2006 Sahelian rainfall variability and runoff increase of Sahelian rivers. *C.R. Géoscience* 341, 538-546.

- Mahé G., Olivry J.-C., Servat E. (2005)** – Sensibilité des cours d'eau ouest-africains aux changements climatiques et environnementaux : extrêmes et paradoxes. *AISH Publications* 296, 169-177.
- Mainguet M., Dumay F. (2011)** – Fighting wind erosion. One aspect of the combat against desertification. *Les dossiers thématiques du CSFD 3*, CSFD/Agropolis International, Montpellier, 44 p.
- Marie J., Morand P., N'Djim H. (2007)** – *Avenir du fleuve Niger. The Niger River's future*. Collection Expertise collégiale, IRD Editions, Paris, 281 p.
- Mietton M. (1988)** – *Dynamique de l'interface lithosphère-atmosphère au Burkina Faso. L'érosion en zone de savane*. Thèse de doctorat d'Etat, université Grenoble 1, Editec, Caen, 511 p.
- Olivry J.-C. (2002)** – *Synthèse des connaissances hydrologiques et potentiel en ressources en eau du fleuve Niger*. World Bank, Niger Basin Authority, provisional report, Niamey, 166 p.
- Picouet C. (1999)** – *Géodynamique d'un hydrosystème tropical peu anthropisé : le bassin supérieur du Niger et son delta intérieur*. Thèse de doctorat, université Montpellier 2, 450 p.
- Picouet C., Hingray B., Olivry J.-C. (2000)** – Modélisation conceptuelle globale du régime du transport particulaire sur les fleuves tropicaux d'Afrique : application aux bassins du Niger supérieur et du Bani (Mali). *Revue des Sciences de l'Eau*, 13, 463-481.
- Piégay H., Hupp C.R., Citerrio A., Dufour S., Moulin B., Walling D.E. (2008)** – Spatial and temporal variability in sedimentation rates associated with cut-off channel infill deposits ; Ain River, France. *Water Resources Research* 44, 1-18.
- Puech C., Bechler N., Mietton M. (2000)** – Apport de la télédétection à l'étude des plaques de sols nus en zone soudanienne (Burkina Faso). *International Journal of Remote Sensing* 21, 121-135.
- Revue de Géographie de Lyon (1994)** – *Enfoncement des lits fluviaux : processus naturels et impacts des activités humaines*. *Revue de Géographie de Lyon*, Numéro spécial, 69, 87 p.
- Roose E.J. (1980)** – *Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique Occidentale. Etude expérimentale des transferts hydrologiques et biologiques de matières sous végétations naturelles ou cultivées*. Thèse, université d'Orléans, ORSTOM Paris, Travaux et Documents, 130, 587 p.
- Ruelland D., Dezetter A., Puech C., Ardoin-Bardin S. (2008)** – Long-term monitoring of land cover changes based on Landsat imagery to improve hydrological modelling in West Africa. *International Journal of Remote Sensing* 29, 3533-3551.
- Schumm S.A., Harvey M.D., Watson C.C. (1984)** – *Incised channels. Morphology, dynamics and control*. Water Resources Publications, Littleton, Colorado, USA, 200 p.
- Simons Li & Associates Inc., Louis Berger International, Inc. (1984)** – *Analyse géomorphologique du bassin du fleuve Niger*. Autorité du Bassin du fleuve Niger, Vicksburg, USA, 388 p.
- Steiger J., Tabacchi E., Dufour S., Corenblit D., Peiry J.-L. (2005)** – Hydrogeomorphic processes affecting riparian habitat within alluvial channel-floodplain river systems : a review for the temperate zone. *River Research and Applications* 21, 719-737.
- Tappan G., Mc Gabuey M. (2007)** – Tracking environmental dynamics and agricultural intensification in southern Mali. *Agricultural Systems* 94, 38-51.
- TECSULT (1998)** – *Etude de petits barrages dans la région de Kangaba (Mali). Rapport intermédiaire. Vol. 1*. Ministère des Mines, de l'Energie et de l'Hydraulique, BID, Montréal, 232 p.
- Traore M. (1978)** – L'accumulation démographique et l'intensification de l'occupation de l'espace dans le Mali méridional. In *Maîtrise de l'espace agraire et développement en Afrique tropicale. Logique paysanne et rationalité technique*. Actes du colloque de Ouagadougou (4-8 décembre 1978), CNRST-ORSTOM, Paris, 119-123.
- Traore M.T., Abdou H. (2005)** – Rapport de synthèse régionale des études multisectorielles nationales (rapport définitif). *Processus de vision partagée pour l'élaboration du plan d'action pour le développement durable (PADD) dans le bassin du Niger*. Autorité du Bassin du Niger, Niamey, 141 p.
- Wang S.S.Y., Langendoen E.J., Shields F.D. Jr. (Eds.) (1997)** – Management of landscapes disturbed by channel incision. In *Proceedings of the Conference on Management of Landscapes Disturbed by Channel Incision*. University of Mississippi, Center for Computational Hydroscience and Engineering, Oxford, USA, 1134 p.

Article soumis le 24 mars 2011, accepté le 5 octobre 2011.