



HAL
open science

Flux de matières solides en suspension en zone de climat sud-soudanien du nord du Togo et du Bénin : l'exemple des rivières Kara et Kéran

Laldja Kankpenandja, Badji Tchalare, Kossi Badameli

► To cite this version:

Laldja Kankpenandja, Badji Tchalare, Kossi Badameli. Flux de matières solides en suspension en zone de climat sud-soudanien du nord du Togo et du Bénin : l'exemple des rivières Kara et Kéran. Gwenaëlle FABRE, Anne FOURNIER, Lamine SANOGO. Regards scientifiques croisés sur le changement global et le développement - Langue, environnement, culture : Actes du Colloque international de Ouagadougou (8-10 mars 2012), Sciencesconf.org, pp.125-141, 2014. hal-00939894

HAL Id: hal-00939894

<https://hal.science/hal-00939894>

Submitted on 31 Jan 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Flux de matières solides en suspension dans des paysages dégradés sous climat sud-soudanien au nord du Togo et du Bénin : l'exemple des rivières Kara et Kéran

Laldja KANKPÉNANDJA, Badji TCHALARÉ et Kossi BADAMÉLI

Département de Géographie, Université de Kara, BP43 Kara, Togo
kankpenang1@yahoo.fr, tchalare59@yahoo.fr, badakossi@yahoo.fr

Résumé

Les eaux courantes dans les bassins versants de la Kara et de la Kéran situés dans des paysages dégradés sous climat sud-soudanien au nord du Togo et du Bénin, se caractérisent ces dernières décennies par une abondance des flux solides. Leur mesure revêt plusieurs intérêts car la connaissance des flux solides est en effet utile pour l'évaluation de la qualité des ressources en eau, du risque d'alluvionnement des cours d'eau et de colmatage des réservoirs d'eau, d'obstruction des canaux d'irrigation, du transfert des pollutions, des menaces sur les écosystèmes fluviaux, de l'état de dégradation des bassins versants pourvoyeurs de sédiment, etc. C'est au regard de ces enjeux que la présente étude a été initiée. L'objectif visé est l'évaluation et le suivi de l'évolution des concentrations à différents pas de temps : durée d'une crue, mois et année et la détermination des volumes de sédiments exportés par les organismes fluviaux. L'approche méthodologique a consisté à échantillonner régulièrement l'eau de ces rivières. Les résultats des mesures ont révélé que les concentrations sont très élevées (plus de 2g/dm^3), et les volumes de charges solides exportés considérables, bien que variables. Une telle situation impose la prise de mesures, afin de réduire le taux des flux solides à des seuils tolérables.

Mots clés

dégradation environnementale, politique des ressources en eau

Suspended solid flow in weathered landscapes of a south Sudanic climate in northern Togo and Benin: the case of the Kara and Keran rivers

Abstract

Waterflow in the weathered landscape of the Kara and Keran watersheds in the southern Sudanic climate of northern Togo and Benin Republic has shown an increase in suspended solid flow over the last ten to twenty years. Measurement of solid flow is interesting in several ways since such data are useful for evaluating the quality of water resources, the risk of alluvial deposits in waterways and the filling up of reservoirs, the blocking of irrigation canals, the spread of pollution, threats to fluvial ecosystems, the degradation of watersheds as sources of sediments, etc. The study described here was undertaken in the light of these issues. The objective was to measure and observe changes in concentrations over a number of time spans (during flooding, monthly, and yearly) and to determine the volume of sediments discharged by the river systems. The methodological approach called for regular sampling of water from these rivers. The results showed that concentrations are very high (over 2g/dm^3), and that sizable though varying amounts of solids are discharged. This situation calls for steps to be taken to bring the level of solids in suspension down to an acceptable level.

Keywords

environmental degradation, water resources policy

INTRODUCTION

La connaissance des transports solides dans les cours d'eau est utile en différentes circonstances, en particulier lorsqu'il s'agit d'évaluer les ressources en eau (aspects qualitatifs et quantitatifs), d'étudier la diffusion des polluants, de prévoir la vitesse de sédimentation et la durée de vie des retenues d'eau, des canaux d'irrigation, d'estimer l'érosion nette des bassins versants ou de suivre leur dégradation, etc. (Verstraeten et Poesen, 2001 ; Droux *et al.*, 2003). Mais l'évaluation de la charge totale des cours d'eau dont une partie est transportée en suspension et l'autre charriée au fond, est assez difficile. En effet, si la première, c'est-à-dire celle qui est transportée en suspension, est facile à déterminer, la mesure de la deuxième est plus délicate et demande de gros moyens, surtout lorsqu'il s'agit de grands cours d'eau (Tricart, 1965 et Coque, 1977). C'est ce qui explique que les mesures de cette dernière soient rares (Bravard et Petit, 2000). Comme il est important de connaître les transports solides par les cours d'eau, des mesures ont été effectuées sur plusieurs d'entre eux dans la sous-région ouest africaine. Il s'agit notamment du Niger (Gourcy, 1994 ; Olivry, 1995 et Droux, 1999), de nombreux cours d'eau au Cameroun (Nouvelot, 1972 ; Olivry, 1977), de la Kompienga au Burkina Faso (Mietton, 1988 et Dipama, 1996) etc. Malgré les enjeux liés à la connaissance des transports solides en suspension, leur évaluation est quasi inexistante au Togo. La présente étude a pour objectifs d'évaluer les flux de transports solides en suspension dans la zone de climat soudano-guinéen, notamment dans les rivières Kara et Kéran situées à cheval sur le nord du Togo et le nord-ouest du Bénin (fig. 1). Le choix de ces deux rivières, situées dans le même domaine climatique, s'inscrit dans un ambitieux programme de quantification des flux solides dans les différents domaines climatiques au Togo. L'approche a consisté à échantillonner régulièrement dans ces cours d'eau, pendant trois années, afin d'y évaluer l'évolution des flux solides. Cet article, qui présente les résultats des mesures effectuées, s'organise en trois parties, la première partie présente les approches méthodologiques, la deuxième les résultats et enfin vient une discussion.

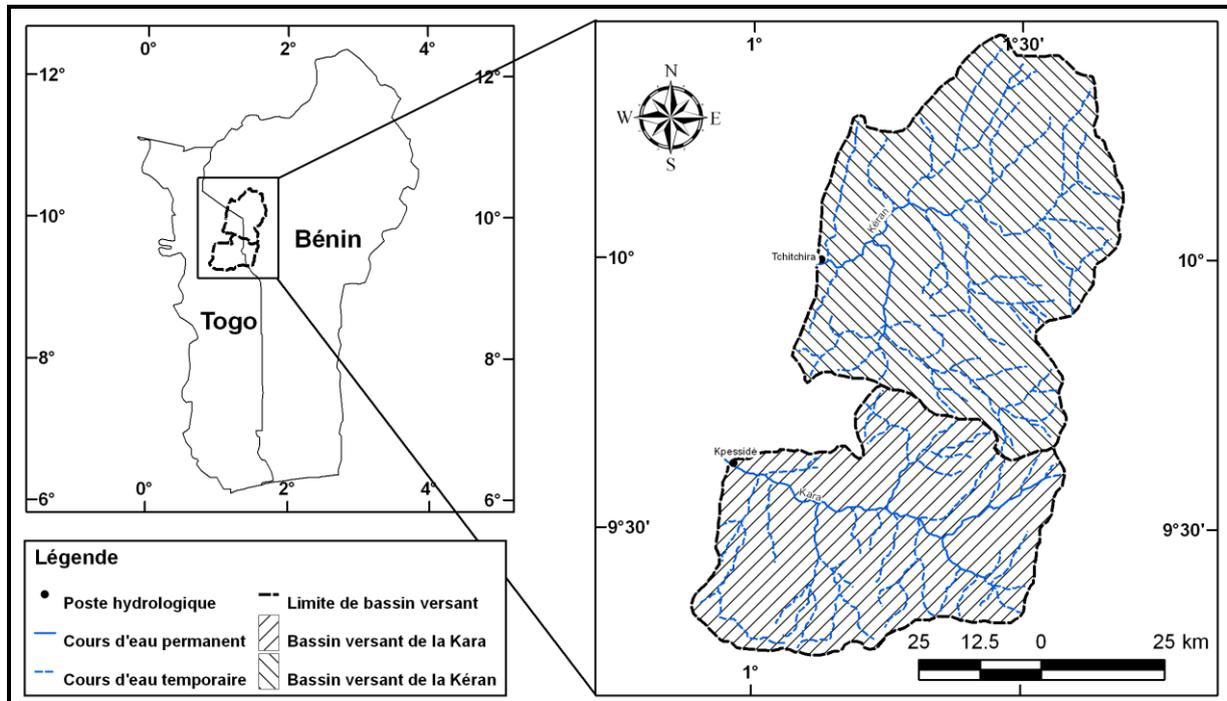


Figure 1 : Localisation des cours supérieurs de la Kara et de la Kéran

APPROCHES METHODOLOGIQUES

1. L'étude des flux solides en suspension

Le flux de matières solides en suspension en une section d'un cours d'eau se définit comme la quantité des matières solides en suspension transitant à travers cette section pendant une unité de temps (Vanoni, 1975 cité par Droux *et al.*, 2003). En fonction des objectifs visés, il peut être déterminé sur des périodes de durée variable, crue, jours, mois, année, etc., en procédant par intégration dans le temps de la chronique des débits instantanés, selon la formule suivante :

$$\int Q_{si}(t).dt = \int C_i(t).Q_i(t).dt$$

où

Q_{si} est le débit solide instantané,

C_i est la concentration en matières solides en suspension instantanée de l'écoulement,

Q_i représente le débit liquide instantané.

Pour mesurer les flux de matières solides en suspension dans les rivières Kara et Kéran, des campagnes d'échantillonnage d'eau ont été effectuées régulièrement dans ces cours d'eau, aux postes hydrologiques de Kpessidè et Tchitchira. Le prélèvement des échantillons a été effectué suivant des radiales dans ces rivières. Au cours de chaque mesure 12 litres, dont 6 dans l'axe du cours d'eau (3 en surface et 3 au fond) et 6 au niveau des berges (ici également 3 en surface et 3 en profondeur), ont été prélevés. L'échantillonnage a été effectué tous les 5 jours au cours des périodes de débits constants. Durant celles de débits fortement variés, le prélèvement a été fait pendant la montée, le pic et la descente des eaux. Un nombre total de 366 échantillons a ainsi été prélevé. Les échantillons ont été décantés par addition de sulfate d'alumine, ensuite l'eau claire a été éliminée très soigneusement. Le fond vaseux a été séché au soleil et pesé pour déterminer la concentration instantanée de matières solides en suspension (C_i) des différents échantillons.

Pour calculer les quantités de matières solides exportées en suspension, nous avons utilisé la méthode dite des "bilans partiels" de Probst (1990) fondée sur la moyenne dans le temps des concentrations. L'hydrogramme de l'année a été découpé en périodes successives de concentration à peu près constante. Ce découpage a été rendu possible par un suivi et un échantillonnage réguliers. La quantité de matières solides en suspension exportées ($L_{\Delta j}$) pour chaque période homogène, est calculée par la procédure "4" de Walling et Webb (1981), cités par Droux *et al.* (2003).

$$L_{\Delta j} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i Q_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} V_e \Delta j$$

où

$L_{\Delta j}$ est la quantité de matières solides en suspension exportées pendant la période Δj ,

$V_e \Delta j$ est le volume d'eau écoulée pendant la période Δj ,

C_i est la concentration instantanée des matières solides en suspension pour chaque prélèvement,

Q_i est le débit liquide instantané au cours de chaque prélèvement,

n est le nombre de prélèvements effectués pendant la période Δj .

Les mesures directes des flux solides ont été couplées à l'étude des caractéristiques des bassins versants.

2. L'étude des facteurs influençant l'évolution des flux solides

Différents éléments du milieu physique et humain ont été étudiés, afin de mieux expliquer la variabilité des flux de matières solides. Il s'agit de données géologiques, morphopédologiques et climato-hydrologiques, de l'occupation du sol et des activités agropastorales.

Les caractéristiques générales des données géologiques et morphopédologiques ont été déterminées à partir des travaux de d'Affaton (1975) et Affaton *et al.* (1980) sur la géologie du Nord-Togo et Nord-Bénin, et de ceux de Faure (1985) et de Panagos *et al.* (2011) sur les cartes pédologiques d'Afrique.

La pluviosité dans les bassins versants et le régime hydrologique à leurs exutoires ont été étudiés à partir des données des stations pluviométriques et hydrologiques situées à l'intérieur de ceux-ci et à leur voisinage immédiat. Ces données ont fait l'objet de différents traitements statistiques, afin de déterminer des paramètres de tendances centrales et de dispersion, notamment la moyenne et l'écart-type. Les traitements ont permis aussi de calculer des coefficients de corrélation et des indices d'influence de ces facteurs sur l'érosion et les flux solides.

L'occupation du sol a été étudiée à partir de l'imagerie Google Earth de 2010, d'observations de terrain, de cartes établies dans le programme BIOTA West Africa en 2003 et par Afidégnon *et al.* (2003). Les images Google ont été extraites et géoréférencées à l'aide du logiciel SIG ArcGIS. L'interprétation de l'occupation du sol faite à partir de ces images, a été ensuite complétée par des observations directes sur le terrain. Ensuite, les résultats d'interprétation ont été validés à l'aide des documents cartographiques disponibles, notamment les cartes réalisées dans le programme BIOTA West Africa en 2003 et par Afidégnon *et al.* (2003). L'ensemble de ces investigations a permis d'établir une carte d'occupation du sol des bassins versants pour les années 2010.

L'étude des pratiques agricoles a été faite suivant différentes approches, notamment des observations directes sur le terrain et une enquête par questionnaire. Les observations directes ont été effectuées le long d'itinéraires répartis sur toute l'étendue des bassins versants. Cette approche a été couplée à une enquête par questionnaire qui a été effectuée auprès des populations rurales. Un nombre total de 100 personnes a été interrogé. Les questions ont porté particulièrement sur les outils agricoles utilisés, les types de produits agricoles préférés, le mode de mise en valeur et de gestion des terres et le traitement du sol.

L'ensemble des données collectées a subi différents types de traitements statistiques et/ou cartographiques.

RESULTATS

1. Variabilité spatio-temporelle et caractéristiques sédimentologiques des flux solides en suspension

1.1. Une grande variabilité spatio-temporelle des flux solides en suspension

1.1.1. Les variations spatiales

Les mesures effectuées montrent que, dans l'ensemble, les quantités de matières exportées en suspension sont toujours énormes, mais assez variables d'un organisme fluvial à l'autre. En effet, avec des débits liquides identiques, les rivières Kara et Kéran évacuent annuellement des quantités de matières solides assez différentes. Les quantités de sédiments qui transitent par Tchitchira sur la Kéran (939354 t/an en moyenne selon le modèle de Leliasky) restent toujours supérieures à celles qui transitent au poste hydrologique de Kpessidè sur la Kara, (591416 t/an selon le même modèle). Les moyennes mensuelles évoluent dans les mêmes

proportions : celles de la Kéran sont toujours supérieures à celles de la Kara. Mises à part ces différences quantitatives, les résultats des mesures ont révélé que les flux de matières solides en suspension varient considérablement sur les deux rivières à différentes échelles de temps : durée d'une même crue, d'un mois et d'une année. Une analyse de la variation des concentrations des matières solides en suspension à ces différents pas de temps permet de mieux comprendre les différents facteurs qui influent sur cette évolution.

1.1.2. Les variations interannuelles et annuelles

Les matières solides en suspension ont été mesurées pendant trois ans. Les résultats obtenus sur les trois années de mesure indiquent une forte variabilité interannuelle. Les quantités annuelles des matières solides en suspensions ont varié dans un rapport du simple au quintuple. En effet, sur la Kéran la quantité totale des matières solides exportées en suspension par an a varié entre un minimum de 156 786 t en 2008 et un maximum de 838 930 t en 2009. Sur la Kara les variations ont été légèrement moins importantes, soit de 96 240 t en 2008 et 450 654 t en 2009. L'importance des variations interannuelles peut tenir fondamentalement aux fluctuations du cumul de précipitations et à la fréquence des grosses averses. En effet, l'année 2009 a reçu un cumul total de 1372,5 mm avec une fréquence de plus de 13 % des averses de plus de 30 mm contre un total pluviométrique de 1262,2 mm et une fréquence de 3 % des averses de plus 30 mm pour 2008. Elle dépend aussi de la distribution annuelle des précipitations, et elle est d'autant plus élevée que les pluies se concentrent sur une plus courte période de l'année. Hormis ces variations interannuelles, les flux solides varient également au cours d'une même année, du début à la fin de l'hivernage.

Les résultats des mesures, présentés sous formes de courbes, montrent que les flux de matières solides en suspension sont affectés d'importantes variations durant une même saison pluvieuse (fig. 2).

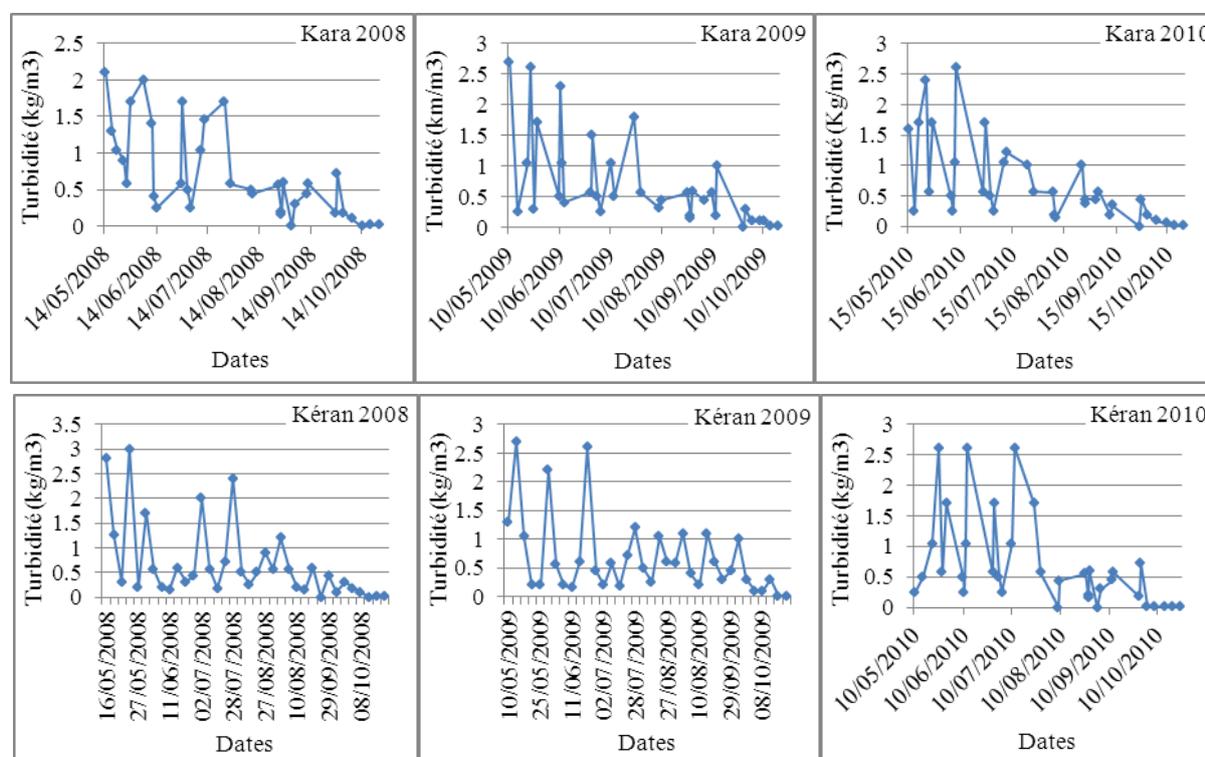


Figure 2 : Evolution des flux solides dans les rivières Kara et Kéran de 2008 à 2010. Sources : travaux de terrain

Sur la rivière Kara, les mesures ont donné une moyenne de $0,7 \text{ kg/m}^3$ avec un écart-type de $0,6 \text{ kg/m}^3$. La valeur très élevée de l'écart-type par rapport à la moyenne traduit une forte variation des concentrations instantanées par rapport à cette dernière. En effet, elles ont fluctué entre $0,01$ et $2,7 \text{ kg/m}^3$, soit une amplitude de $2,69$. Sur la rivière Kéran, la moyenne des concentrations instantanées, avec une valeur de $1,11 \text{ kg/m}^3$, est un peu plus élevée. L'écart-type est également élevé ($0,9 \text{ kg/m}^3$), traduisant comme dans le cas de la rivière Kara, de fortes fluctuations des concentrations instantanées par rapport à la moyenne. Les extremums sur la rivière Kéran sont de $0,02$ et $3,46 \text{ kg/m}^3$, ce qui correspond à une amplitude de $3,44 \text{ kg/m}^3$. Dans l'ensemble, les valeurs les plus élevées sont relevées au début de la saison des pluies et les valeurs les plus faibles vers la fin de celle-ci. Mais il faut noter que des fortes concentrations sont enregistrées aussi au milieu ou à la fin de l'hivernage, lors de fortes crues marquées par de très fortes turbulences de l'écoulement. Les mêmes observations ont été faites par Dipama (1996) sur la Kompienga au Burkina Faso et par Droux *et al.* (2003) sur le Dounfig et Djitiko au Mali.

1.1.3. Les variations au pas du temps d'une crue

L'observation des flux solides en suspension révèle que la concentration de ceux-ci varie au cours d'une même crue. Généralement, les taux montent rapidement avec le débit jusqu'à un certain seuil au-delà duquel l'augmentation du débit n'entraîne plus celui des flux solides. Ce seuil coïncide, le plus souvent, avec le débit de plein bord. Cette situation concorde avec les conclusions de Dégoutte (2007), qui qualifie ce débit de morphogène, c'est-à-dire qui explique la morphologie des lits. La baisse du débit se traduit par une diminution de la concentration des flux solides en suspension. Mais cette évolution n'est pas symétrique à celle de la montée des crues. En effet, à débit égal, la concentration des flux solides est plus élevée lors de la montée des crues qu'à leur chute (fig. 3).

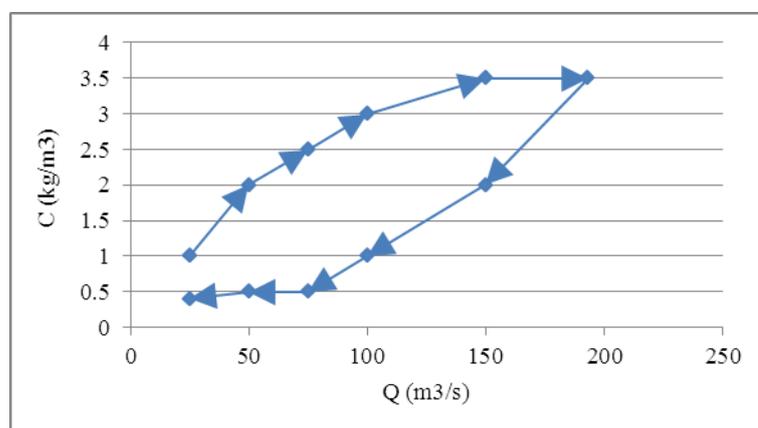


Figure 3 : Boucle hystérésis orthograde observée lors de la crue du 25/08/2009 à Kpessidè. C : concentration des flux en suspension et Q : débit instantané. Sources : travaux de terrain.

Ces hystérésis orthogrades de crues, c'est-à-dire les différences de concentration des flux solides, à débit égal, pendant la montée et la descente des eaux, ont été observées par de nombreux auteurs, notamment Meybeck (2001) et Droux *et al.* (2003). Elles s'expliquent par la remise en suspension, en début de crue, des sédiments accumulés lors des crues précédentes (Tricart, 1977 ; Droux *et al.*, 2003). L'apport des éléments solides en provenance de l'ensemble du bassin versant contribuerait aussi à l'augmentation rapide des flux solides au début des crues. En effet, cet apport est généralement plus important en début des pluies et diminue progressivement avec le stock des particules fines libérées par la battance. En hautes eaux où l'effet de remobilisation est peu significatif, la différence de concentration en flux

solide en suspension, à débit égal, entre la montée et la descente des crues, tiendrait particulièrement à une arrivée plus importante du bassin versant de particules solides en suspension lors de la première phase de ces crues.

1.2. La sédimentologie des matières solides en suspension

Les résultats d'analyse granulométrique révèlent que les suspensions solides sont constituées en grande partie d'argiles dont la proportion est toujours supérieure à 50 % (tab. 1). En effet, sur 75 échantillons analysés pour chaque rivière, la fraction des argiles a varié entre 53,4 et 78,45 % avec une moyenne de 66,8 % pour la Kara et 69,7 % pour la Kéran. L'écart-type, de l'ordre de 10 %, est relativement faible, indiquant de faibles variations de la teneur en argile. Par contre, la proportion des sables est très faible, soit en moyenne entre 6,1 % pour la Kara et 7,5 % pour la Kéran. L'écart-type, en moyenne de 3 %, pour les deux rivières, est assez élevé par rapport à la moyenne, indiquant que la fraction sableuse varie plus ou moins fortement. Le minimum relevé au cours de la période de mesure est de 2,9 % et le maximum de 10,6 %. Enfin, il faut signaler que les eaux de ces rivières transportent une quantité assez élevée de matières organiques. La proportion de ces constituants a varié entre 2,3 et 12,8 %, avec une moyenne de 6,8 % pour la Kara, tandis que sur la Kéran, elle a varié entre 1,9 et 8,9 %, donnant une moyenne de 4,1 %.

Rivières	Paramètres statistiques	M.O. (%)	Sables (%)	Limons (%)	Argiles (%)	d ₅₀
Kara (75 échantillons)	Minimum	2,3	2,9	13,05	57,5	0,5
	Maximum	12,8	8,1	35,3	78,45	3,1
	Moyenne	6,8	6,1	22,82	66,8	1,1
	Ecart-type	5,27	2,6	8,4	11,8	0,7
Kéran (75 échantillons)	Minimum	1,9	3,5	9,2	53,6	0,8
	Maximum	8,9	10,6	37	76,3	2,4
	Moyenne	4,1	7,5	22,7	69,7	1,8
	Ecart-type	3,0	3,5	4,4	10,4	0,9

Tableau 1 : Caractéristiques granulométriques des matières solides en suspension dans les rivières Kara et Kéran de 2008 à 2010. M.O. : matière organique ; d₅₀ : diamètre du grain moyen. Sources : travaux de terrain.

2. Les facteurs des variations spatio-temporelles des flux solides

2.1. Les facteurs géologiques et morphopédologiques

Les cours supérieurs de la Kara et de la Kéran sur lesquels porte la présente étude, se développent dans l'ensemble morphostructural de la chaîne des Dahoméyides comprenant une zone interne formant le socle granito-gneissique bénino-togolais ou bénino-nigérian, une zone intermédiaire, correspondant à la zone de suture et une zone externe formée par les unités structurales de Kara, de l'Atacora et du Buem (Affaton, 1975 et 1987 ; Affaton *et al.*, 1980 cités par Sabi, 2007). Les conditions lithologiques sont assez variées. Dans l'unité structurale du socle bénino-nigérian, la lithologie est constituée des gneiss à grains fins, des orthogneiss, des amphibolites et des quartzites. Dans la zone intermédiaire, on retrouve des roches basiques orthogneisso-amphibolitiques. Dans la zone des unités structurales externes, on rencontre essentiellement des micaschistes, des quartzites, des grès quartzites, des schistes, des japses et des shales. Les données géologiques agissent indirectement sur les flux de matières solides à travers la nature des formations superficielles, le relief et les conditions de drainage qu'elles influencent considérablement.

Du fait de la diversité lithologique et d'une évolution morphotectonique complexe, le relief des deux bassins versants est assez contrasté, variant dans l'ensemble entre 200 m dans la plaine bénino-togolaise et plus de 700 m, sur la chaîne de l'Atacora. L'indice global de pente

(I_g) est moyennement élevé pour les deux bassins versants, soit 4,27 dans celui de la Kara et 3,66 pour celui de la Kéran (tab. 2).

Bassins versants	Kara (Kpessidè)	Kéran (Tchitchira)
Superficie, S (km ²)	2790	3656
Altitude max. (m)	785	674
Altitude à l'exutoire (m)	180	200
Périmètre stylisé, P (km)	236,1	271
Longueur du bassin, L (km)	85,37	98,31
Largeur, l (km)	32,68	37,19
Coef. de Gravelius, K	1,25	1,26
Indice global de pente, I_g (m/km ⁻¹)	4,27	3,66

Tableau 2 : Les caractéristiques morphométriques des bassins versants de la Kara et de la Kéran. Sources : travaux de terrain.

La topographique est donc favorable à une accélération des écoulements, accroissant ainsi leur pouvoir d'ablation et de transport. La concentration des eaux est d'autant plus accélérée qu'en dépit des pentes assez élevées, les deux bassins versants ont une forme massive. En effet, ils ont des coefficients de Gravelius (K) quasiment identiques : 1,25 pour la Kara et 1,26 pour la Kéran. Ces valeurs très proches de l'unité indiquent le caractère subcirculaire ou massif des bassins versants.

Les écoulements de surface et l'érosion à l'origine des flux solides sont aussi plus ou moins favorisés par les formations superficielles, assez semblables dans les deux unités hydrologiques. On y rencontre des vertisols, des sols ferrugineux tropicaux lessivés concrétionnés, indurés et hydromorphes, et des sols ferrallitiques non indurés ou indurés (Faure, 1985 ; PNUE, 2003 ; Barry *et al.*, 2005). Dans l'ensemble, les sols sont assez fragiles en raison de leur pauvreté en matière organique. Mais c'est surtout la dénudation de ceux-ci qui accroît le risque d'érosion hydrique et de transports solides.

2.2. L'influence des facteurs climato-hydrologiques

2.2.1. L'influence des précipitations

Les bassins versants de la Kara et de la Kéran se situent dans la zone de climat sud-soudanien caractérisée par une pluviométrie variant entre 1100 et 1400 mm/an. Ils sont traversés par un domaine de climat de montagne où les précipitations sont supérieures à 1 400 mm/an. L'analyse de la répartition annuelle des pluies révèle que la saison pluvieuse y dure près de 7 mois. Mais on remarque une concentration de l'essentiel des pluies sur la période de juin à septembre qui reçoit plus de 75 % des précipitations. Il en résulte une forte agressivité du climat. Certes, l'agressivité des précipitations dépend surtout de leur intensité, malheureusement, les données correspondantes ne sont pas disponibles dans les stations pluviométriques de la zone d'étude. Aussi avons-nous évalué cette agressivité à travers la distribution annuelle des précipitations. Ainsi, en raison de la forte concentration des précipitations sur une courte période de l'année, l'agressivité climatique a été estimée assez élevée. En effet, l'indice d'agressivité moyen de Fournier est de 69,5 mm à Kara et 62,3 mm à Pagouda. L'érosivité des pluies selon le modèle de Wischmeier et Smith (1960) donne aussi des valeurs élevées, soit 640,8 à Kara et 615 à Pagouda.

La forte érosivité des pluies, dans un contexte caractérisé par la dégradation du couvert végétal, se traduit par une érosion pluviale très forte et une importante mise en route des flux solides alimentant les écoulements concentrés.

2.2.2. Les facteurs hydrologiques

Les rivières Kara et Kéran, dont les aires de drainage se situent dans le domaine climatique soudano-guinéen, ont un régime hydrologique très contrasté, commandé par le rythme saisonnier du climat. Pour bien caractériser les saisons hydrologiques de ces rivières, les coefficients de débits mensuels ont été calculés et représentés sur le même graphique que les débits mensuels (fig. 4). Ces graphiques montrent une longue période de 7 à 8 mois durant laquelle les coefficients sont inférieurs à la valeur seuil, c'est-à-dire l'unité. C'est la saison hydrologique sèche, caractérisée par des débits mensuels faibles. Elle commence vers fin novembre lorsque les coefficients passent en dessous de l'unité et diminuent progressivement, jusqu'en mars-avril, où les valeurs les plus faibles sont relevées, soit respectivement de 0,006 pour la Kara et 0,009 m³/s pour la Kéran. C'est la période d'étiage. Les valeurs du coefficient remontent ensuite sensiblement, pour atteindre l'unité en juin. Contrairement à la première partie au cours de laquelle les précipitations sont totalement absentes, la dernière enregistre les pluies de début de saison. C'est ce qui explique une remontée un peu plus rapide du coefficient (Klassou, 1996).

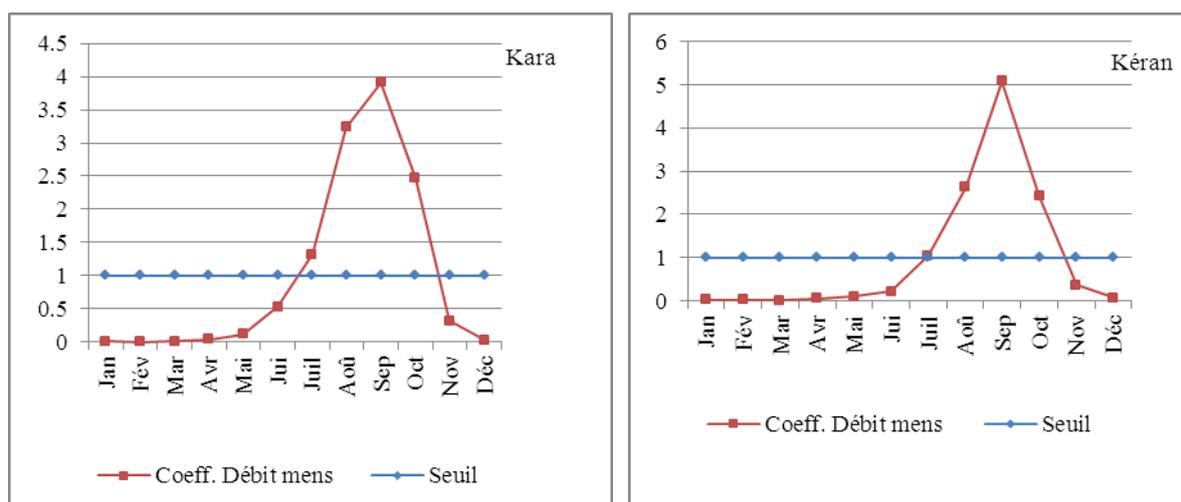


Figure 4 : Courbe des coefficients de débits mensuels de la Kara et la Kéran. Sources : Direction Nationale de l'Hydrologie.

A partir de mi-juin pour la Kara et de fin juin pour la Kéran, lorsque les coefficients passent au-dessus du seuil, commence alors la période des hautes eaux qui dure quatre ou cinq mois. La période de juin à novembre qui constitue la saison hydrologique humide des rivières Kara et Kéran est marquée par des crues violentes. Parmi ces crues, les plus violentes sont surtout enregistrées en septembre avec des débits exceptionnels de plus de 320 m³/s pour la Kara et de 350 m³/s pour la Kéran.

La couleur des eaux est assez différente pendant les hautes et basses eaux, révélant un rapport étroit entre le régime hydrologique des cours d'eau et la quantité de matières exportées en suspension.

Pour déterminer cette influence, une étude de corrélation a été faite entre les débits liquides des rivières et les flux de matières solides en suspension (fig. 5). Le coefficient de corrélation, avec des valeurs de même ordre pour les deux rivières, 80 % sur la Kara et 72 % sur la Kéran,

ce qui correspond à une moyenne de 77 %, indique que la concentration des flux solides en suspension est fortement corrélée aux débits liquides de ces cours d'eau. Le coefficient de détermination, qui vaut 60 % sur la Kara et 57 % sur la Kéran, soit en moyenne 59 % ($s \leq 0,01$), indique que les débits liquides expliquent 59 % de la turbidité de l'eau. Les 41 % restants sont liés à d'autres facteurs, notamment au taux d'occupation du sol, à la structure des formations superficielles et aux périodes de travail du sol.

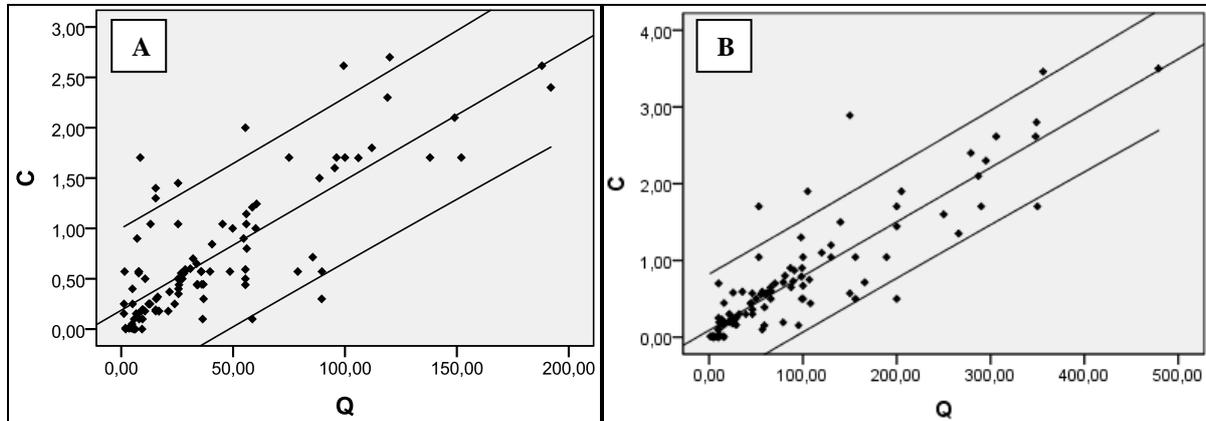


Figure 5 : Corrélation entre flux solide et débits liquides (A = Kara et B = Kéran). Sources : travaux de terrain.

2.3. L'influence des données socio-démographiques et de l'occupation du sol

2.3.1. Les données socio-démographiques

Foyers d'anciens peuplements, les bassins versants de la Kara et de la Kéran sont de nos jours des aires de fortes concentrations humaines. En effet, on y rencontre des peuples installés depuis des temps reculés et considérés de ce fait comme autochtones. C'est le cas des Kabiya qui, du fait d'une installation très ancienne, se proclament descendus du ciel ou poussés de la terre (Gayibor *et al.*, 1997). L'installation des autres peuples tels que les Somba ou Temberma, les Tem, les Nawda, les Solla et les Yom est également très ancienne. A ceux-ci s'ajoutent encore ceux qui sont venus plus récemment tels que les Peulhs et les Haoussa. Dans l'ensemble, les bassins versants de la Kara et la Kéran sont caractérisés par une diversité de peuples et donc de cultures. La plupart de ces peuples, notamment les Kabiya, les Lama, les Logba, les Temberma, les Anii et les Solla se répartissent de part et d'autre de la frontière Togo-Bénin (SIL International, 2012).

En raison de l'ancienneté du peuplement et de la forte croissance des populations, estimée à 2,04 %, les densités démographiques sont très élevées (Barry *et al.*, 2005, DGSCN-Togo, 2011). En effet, la carte des densités de populations établie à partir des données du recensement général de la population de 2010 au Togo et des travaux de Barry *et al.* (2005) dans le bassin de la Volta actualisés par des projections statistiques sur la base des taux d'accroissement des dernières décennies, révèle une forte extension des aires de densités supérieures à 100 hab./km² (fig. 6).

Les densités sont particulièrement élevées autour de la ville Kara, métropole du Nord-Togo, où elles varient entre 200 et 450 hab./km². Les secteurs de faibles densités se localisent au sud, dans la préfecture d'Assoli au Togo et son prolongement, à l'est dans le territoire béninois. Mais ces derniers étant peu étendus, la densité moyenne globale est de près de 130 hab./km².

La densité démographique élevée et les caractéristiques économiques de ces populations essentiellement rurales qui tirent leurs ressources de l'agriculture, de l'élevage et de

l'exploitation des ressources ligneuses, se traduisent par une forte occupation du sol entraînant une forte dégradation environnementale.

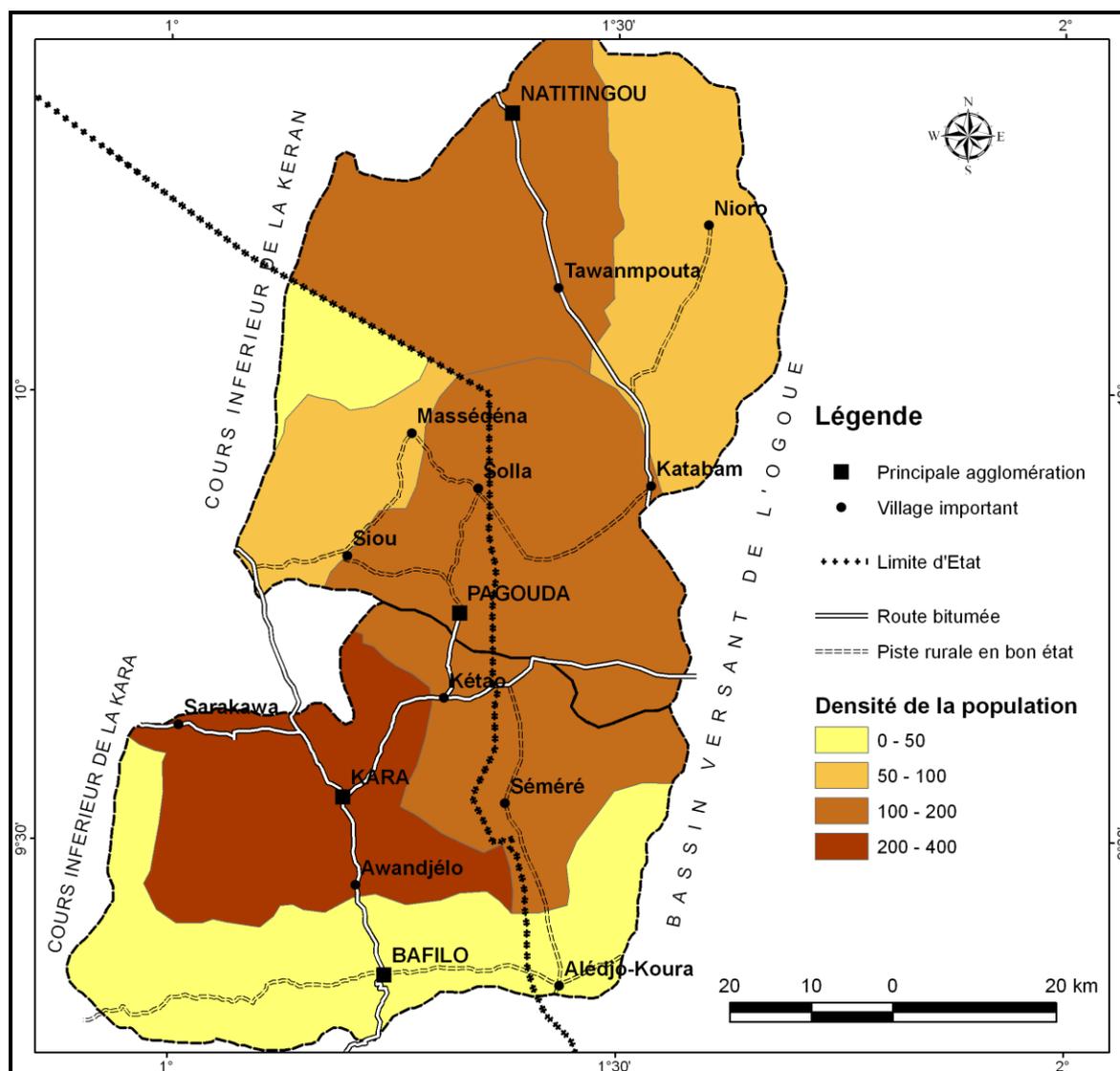


Figure 6 : Répartition des densités de populations dans les cours supérieurs de la Kara et de la Kéran. Sources : Direction Générale des Statistique et de la Comptabilité Nationale du Togo (2011) et Barry *et al.* (2005), actualisés.

2.3.2. L'influence de l'occupation du sol

L'occupation du sol des bassins versants est marquée par l'extension très forte des surfaces cultivées. Dans l'ensemble, l'occupation du sol par les activités socio-économiques y est supérieure à 85 % (fig. 7). Cependant, une analyse plus détaillée permet de relever une certaine inégalité dans cette occupation du sol.

Les zones les plus occupées par l'agriculture correspondent au centre et nord-est qui ne sont autres que les pays kabyè, temberma et yom. Plus de 96 % des terres y sont mises en valeur par l'agriculture. Les surfaces non cultivées dans ce secteur sont seulement les lithosols et les régosols, où le substrat rocheux est subaffleurant ainsi que quelques secteurs d'aires protégées où se développe une savane arbustive. Ces dernières couvrent moins de 4 % du paysage. Cette forte occupation du sol a entraîné une dégradation assez poussée du milieu physique. D'après Brabant (1996), la partie togolaise de ce secteur constitue avec le nord-

ouest de la région des Savanes et l'extrême sud-est de la région Maritime, les zones les plus dégradées du Togo. La partie béninoise est également très dégradée selon le rapport du PNUE (2003) sur les problèmes environnementaux du bassin de la Pendjari dans lequel se situent ceux de la Kara et de la Kéran.

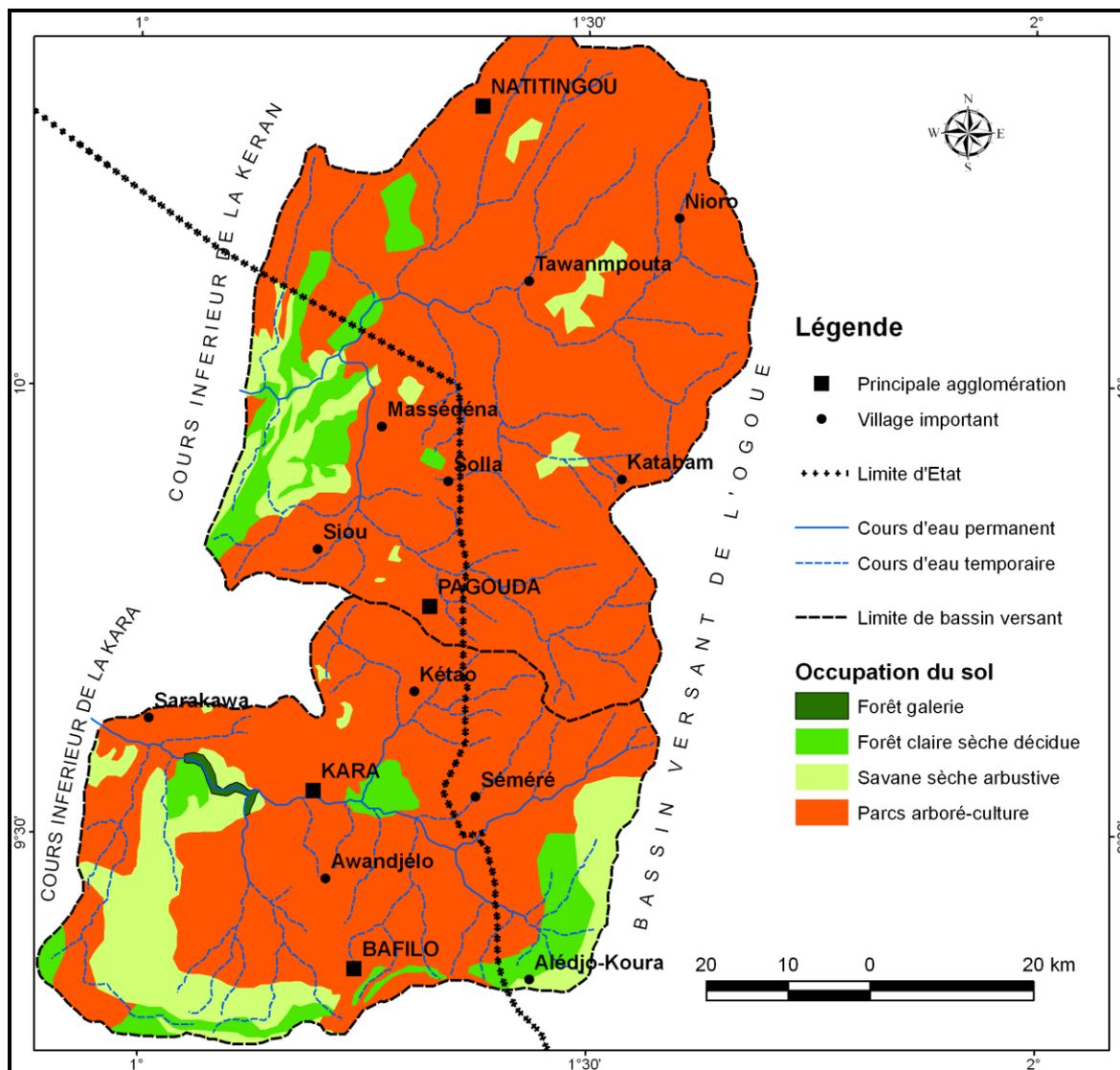


Figure 7 : L'état de l'occupation actuelle du sol dans les cours supérieurs de la Kara et de la Kéran. Sources : établi à partir des images Google Earth et des observations sur le terrain.

Les régions des plateaux de Défalé-Kanté-Natitingou au nord-ouest et celles d'Alédjo au sud ont, certes, une occupation du sol également élevée, mais légèrement plus faible que dans le centre et nord-est. En effet, dans ces secteurs, l'occupation du sol par les activités socio-économiques est de l'ordre 60 %.

Cette forte occupation du sol par les activités humaines, notamment agropastorales, et un prélèvement excessif des ressources végétales par la coupe du bois, entraînant la dénudation des surfaces, expliquent la dégradation des bassins versants (photo. 1 et 2) et l'accroissement des flux solides. En effet, la turbidité est d'autant plus élevée que le taux d'occupation du sol, par les activités socio-économiques est fort ; la dénudation des sols favorise la battance par les

précipitations et la mobilisation des particules par le ruissellement qui alimente l'écoulement fluvial. A ces facteurs s'ajoutent l'effet des pratiques culturelles locales.



Photos. 1 et 2 : Etat dégradé du couvert végétal par la mise en valeur agropastorale et la coupe du bois ; 1 : plateaux de Défalé-Kanté et 2 : paysage de buttes cuirassées à Pagouda. Sources : clichés Kankpénandja, avril 2010.

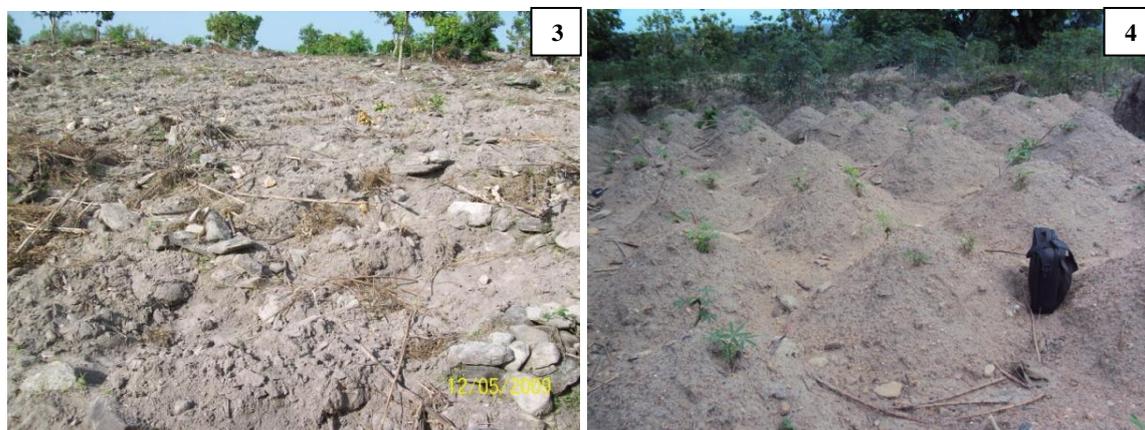
2.3.3. Les effets des pratiques culturelles

L'agriculture constitue la principale activité économique des bassins versants de la Kara et de la Kéran, tant par la proportion de la population qu'elle mobilise que par son apport dans l'économie régionale. En effet, en 2010, la proportion de la population rurale était estimée à 76 % de l'ensemble. La production agricole est essentiellement vivrière. Les principaux produits sont le maïs, le sorgho, l'igname, le manioc, le mil, l'arachide, le riz, le niébé et le fonio. La seule culture commerciale produite dans ces bassins versants est le coton.

En raison des fortes densités démographiques, les exploitations familiales sont de taille très réduite (1 ha en moyenne) et les terres sont mises en valeur de façon permanente. Selon 98 % des personnes enquêtées et nos propres observations, les principales techniques culturelles sont le billonnage, labour à plat et le buttage (photo. 3 et 4).

Ces techniques culturelles ameublissent le sol pour permettre l'infiltration de l'eau et l'enracinement des plantes. Elles réduisent temporairement le ruissellement mais accroissent l'érosion. Aussi remarque-t-on une montée brusque des flux solides aux périodes de labour et de buttage. Aux effets de ces techniques culturelles s'ajoutent ceux liés au faible taux de recouvrement de la plupart des cultures, celui-ci favorise l'impact direct des gouttes de pluie qui provoquent la battance des sols.

Au total, les techniques culturelles et les types de cultures favorisent l'érosion des sols et les transports solides dans les eaux courantes.



Photos 3 et 4 : Préparation d'un lithosol par billonnage pour la culture du maïs (3) et buttage pour la mise en terre des boutures d'igname et de manioc (4). Sources : clichés Kankpénandja, mai 2008 (3) et 2013 (4).

3. Vers une estimation de la dégradation spécifique des bassins versants

Les mesures des flux sédimentaires ont permis de faire une estimation de dégradation spécifique des bassins versants (tab. 3). Certes les mesures ont concerné seulement la fraction solide en suspension, la charge solide de fond étant plus difficile à évaluer. Mais des travaux antérieurs, notamment ceux de Leliasky aux Etats-Unis, qui attribue 53 % aux transports en suspension, et ceux de Claude *et al.* (1977) en Tunisie, qui estiment que la charge de fond représente 20 % du transport solide total, ont permis de faire une estimation globale de la charge totale des cours d'eau. Sur la rivière Kara, la charge solide en suspension est de $1,32 \text{ kg/m}^3$ en moyenne. Ce cours d'eau exporte ainsi annuellement entre 96 240 et 450 654 t de sédiments en suspension, soit une moyenne de 313 451 t/an. En utilisant le modèle de Leliasky (aux Etats-Unis), la quantité totale de sédiments exportés par la rivière peut être estimée en moyenne à 591 416 t/an. Par contre, si l'on utilise le modèle de Claude *et al.* (1977), l'exportation totale de sédiments pour cette même rivière est évaluée à 391 813 t/an. Cette perte en terre correspond à une dégradation spécifique moyenne de 211,98 t/km²/an selon le modèle de Leliasky et de 140,43 t/km²/an selon celui de Claude *et al.* (1977).

Rivières	Kara			Kéran		
	Min.	Max.	Moy.	Min.	Max.	Moy.
Transports en suspension (t)	96240	450654	313451	156786	838930	497858
Charge totale selon le modèle de Leliasky	181584.91	850290.57	591416.98	295822.64	1582886.8	939354
Charge totale selon le modèle de Claude	120300	563317.5	391813.75	195982.5	1048662.5	622322
Dégradation spécifique selon le modèle de Leliasky	65.08	304.76	211.98	80.9143	432.96	256.94
Dégradation spécifique selon le modèle de spécifique Claude	43.12	201.91	140.435	53.61	286.83	170.22

Tableau 3 : Flux solides dans les rivières et dégradation spécifique de leurs bassins versants. Min. : minimum ; Max. : maximum ; Moy. : Moyenne. Sources : travaux de terrain.

Sur la rivière Kéran, le transport en suspension a été plus important, variant entre 156 786 t et 838 654 t avec une moyenne de 453 720 t. La détermination de la charge totale à partir des deux modèles donne, en moyenne, respectivement 939 354 t pour le modèle de Leliasky et 622 322 t pour le modèle de Claude *et al.* (1977). La dégradation spécifique pour ce bassin versant, suivant ces deux approches donne respectivement 256,94 t/km²/an et 170,22 t/km²/an. Ces valeurs sont plus élevées que celles obtenues sur la Kara.

DISCUSSION

L'évaluation des flux solides en suspension dans les rivières Kara et Kéran a été faite à partir de méthodes simples. L'échantillonnage a pu se faire, suivant des radiales, à des sections choisies, à la fois en surface et en profondeur, permettant ainsi d'évaluer la turbidité moyenne des eaux de ces rivières. En revanche l'approche pour extraire les flux solides qui a consisté à ajouter du sulfate d'alumine, pour précipiter la décantation et éliminer l'eau claire, ne permet pas d'avoir des résultats très précis. En effet, non seulement une partie des flux solides peut être éliminée avec l'eau, mais de plus, on peut se retrouver avec une bonne quantité de sulfates d'alumine précipité dans le résidus solide lorsque le dosage est mal fait. Mais selon Tricart (1977), cette approche est aussi intéressante que l'utilisation de filtre, parce qu'elle permet d'opérer sur une grande quantité d'eau et qu'elle est à la portée de toutes les bourses ; elle a permis ici d'obtenir des résultats d'une précision suffisante. En effet, les

mesures effectuées donnent des concentrations en matières solides en suspension variant entre $0,01 \text{ kg/m}^3$ et $2,7 \text{ kg/m}^3$ avec une moyenne de $0,7 \text{ kg/m}^3$ sur la Kara et entre $0,02 \text{ kg/m}^3$ et $3,46 \text{ kg/m}^3$ avec une moyenne de $1,11 \text{ kg/m}^3$ sur la Kéran. Ces résultats peuvent être comparés à ceux de nombreuses études faites sur les flux solides dans les cours d'eau en général et dans ceux des régions tropicales en particulier. Ainsi, ces valeurs sont du même ordre de grandeur que celles de $0,95 \text{ kg/m}^3$ obtenues par HER (1981) sur la Kompinega au Burkina Faso, mais plus faibles que celles de $11,6 \text{ kg/m}^3$ obtenues par Dipama (1996) sur la même rivière. Par contre, elles sont nettement supérieures aux valeurs $0,03 \text{ kg/m}^3$ obtenues sur le Niger par Olivry (1995) ou à celles de $0,09 \text{ kg/m}^3$ sur le Dounfing et de $0,18 \text{ kg/m}^3$ sur le Belekoni par Droux *et al.* (2003).

Dans les tentatives d'expliquer l'origine des flux solides, l'influence des facteurs climato-hydrologiques a été bien quantifiée. Le rôle des facteurs morphopédologiques, de l'occupation du sol et de la dynamique des paysages a été également mis en évidence. Mais en l'absence de données très détaillées sur ces facteurs, la corrélation entre ces derniers et les flux solides n'a pu être déterminée comme pour les facteurs climato-hydrologiques. L'amélioration des connaissances dans ces domaines pourra permettre de mesurer leur influence de façon plus précise.

La détermination de la dégradation spécifique des bassins versants à partir de ces mesures donne des valeurs moyennes comprises entre $140,43 \text{ t/km}^2/\text{an}$ et $211,98 \text{ t/km}^2/\text{an}$ pour la Kara et $170,22 \text{ t/km}^2/\text{an}$ et $256,94 \text{ t/km}^2/\text{an}$ pour la Kéran. Ces valeurs sont nettement inférieures à celles de $1\,261 \text{ t/km}^2/\text{an}$ obtenues par Ayéva (1989) sur parcelles expérimentales dans le cours moyen de la Kara. Mais elles sont supérieures aux valeurs de $20,5$ ou de $25,9 \text{ t/km}^2/\text{an}$ sur petit et moyen bassins versants obtenues par Droux *et al.* (2003) au Mali.

Au total, ces résultats sont partiellement conformes aux conclusions de nombreux auteurs, notamment Vanoni (1975), Dendy et Bolton (1976), Wasson (1994), De Ploey *et al.* (1995), Parker et Osterkamp (1995), Verstraeten et Poesen (2001), d'après qui la dégradation spécifique diminue lorsque la superficie des bassins versants augmente.

CONCLUSION

Les rivières Kara et Kéran, avec un régime hydrologique caractérisé par une très longue saison hydrologique sèche (7 à 8 mois) et une courte saison humide (4 à 5 mois), drainent des espaces qui sont assez dégradés. Ces espaces qui se situent en zone de climat sud-soudanien, connaissent une très ancienne occupation humaine, avec de fortes densités de population, dépassant en maints secteurs 100 hab./km^2 . Il en résulte une forte occupation du sol par les activités agricoles dont les parcs arborés sont l'expression paysagère. Cette forte anthropisation, couplée aux conditions climatiques très agressives, expliquent la dégradation assez poussée des bassins versants. Cette dégradation des bassins versants en amont se traduit naturellement par une forte turbidité des eaux des rivières, comme l'on révélé les résultats.

Au regard des nombreux impacts de l'abondance des flux solides dans les eaux courantes, notamment la pollution de ces eaux, le colmatage des retenues et l'alluvionnement dans les vallées, ce phénomène devrait faire l'objet d'une grande attention et d'un suivi régulier, afin de rassembler des données très précises et pour pouvoir proposer des approches de solutions. Les méthodes utilisées au cours de la présente étude, sont certes, simples, mais elles nous ont permis de mettre en évidence la forte turbidité des eaux. Pour le suivi plus précis de ces flux solides, on pourra faire recours à des méthodes d'échantillonnage et d'extraction bien plus efficaces comme le Cône Berthois ou l'échantillonneur automatique. Ces approches et un échantillonnage en plusieurs sections le long des rivières pourront faire l'objet de futures investigations. En outre des études approfondies sur les différentes pratiques culturelles et les

modes de production pourront permettre de démêler le rôle de ceux-ci dans la dégradation des bassins versants et de faire des propositions de gestion intégrée de ceux-ci.

REFERENCES

- AFFATON P. (1975), *Etude géologique et structurale du Nord-Ouest, Dahomey, du Nord-Togo et du Sud-Est de la Haute Volta*, Thèse de 3^{ème} cycle, Géol, Aix-Marseille III.
- AFFATON P., SOUGY J., TROMPETTE R. (1980), The tectono-stratigraphic relationships between the upper Precambrian and Lower Paleozoic Volta Basin and the Pan-African Dahomeyide Orogénique Belt (West Africa). *Amer. J. Sci.*, Vol. 280, 224-248.
- AFFATON P. (1987), *Le bassin des Volta (Afrique de l'Ouest) : une marge passive d'âge protérozoïque supérieur, tectonisée au Panafricain (600 ± 50 Ma)*, Thèse de doctorat d'Etat, Fac. Sci. St Jérôme, Univ. Aix-Marseille III, France.
- AYEVA T. (1989), *Contribution à l'étude de l'érosion des terres agricoles: cas du Centre d'Application Agropastoral de Tchichao*, Mém. d'Ingé. Agro., ESA-UB.
- BARRY B., OBUOBIE E., ANDREINI M., ANDAH W. et PLUQUET M. (2005), *The Volta River Basin, Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture, Comparative study of river basin development and management*, International Water Management Institute (IWMI), Comprehensive Assessment of water management in agriculture, Accra, 198 p.
- BIOTA West Afrique (2003), Introduction, http://www.biota-africa.org/reg_west_obsmap_ba.php?karte_nr=3
- BRAVARD J. P., PETIT F. (2000), *Les cours d'eau, Dynamique du système fluvial*, Armand Collin, Paris.
- BRUNEL J. F. HIEKPO P., SCHOLZ H. (1984), *Flore analytique du Togo: Les phanérogames*, Eschborn, 1-19.
- COQUE R. (1977), *Géomorphologie dynamique*, Armand Colin, Paris.
- DEGOUTTE G. (2007), *La dynamique fluviale*, <http://www.agroparistech.fr/coursenligne/hydraulique/hydraulique.html>.
- DIPAMA J. M. (1996), *Les impacts du barrage hydro-electrique sur le bassin versant de la Kompienga (Burkina Faso)*, Thèse de doctorat, Géographie tropicale, Université de Bordeaux 3 Michel de Montaigne, Bordeaux.
- 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*, n°2, 99-110.
- DROUX J. P. (1999), *Hydrologie et flux de matières solides particulaires et dissoute sur petits bassins versants du bassin versant du fleuve Niger au Mali ; Bassins du Dounfig, du Djitiko et de Belekoni*, Thèse de l'Université de Louis Pasteur, Strasbourg I, Géographie, Hydrologie.
- FAURE P. (1985), *Les sols de la Kara, relations avec l'environnement*, ORSTOM, Travaux et Documents n°183, Paris.
- GAYIBOR N. L. (Ss. Dir.) (1997), *Histoire des Togolais des origines à 1884*, Volume I, Presse de l'Université du Bénin, Lomé.
- GOURCY L. (1994), *Fonctionnement hydrogéochimique de la cuvette lacustre du fleuve Niger (Mali) : bilans et suivi des flux hydriques, particulaires et dissouts et des flux de méthane*, Thèse de doctorat de l'Université de Paris XI Orsay.
- KLASSOU K. S. (1996), *Evolution climato-hydrologique récente et conséquences sur l'environnement : l'exemple du bassin versant du fleuve Mono (Togo-Bénin)*, Thèse de Doctorat, Bordeaux 3.
- MIETTON M. (1988), *Dynamique de l'interface Lithosphère-Atmosphère au Burkina Faso, l'érosion en zone de savane*, Thèse de doctorat d'Etat, Université de Grenoble.
- NOUVELOT J. F. (1972), *Le régime des transports solides en suspension dans divers cours d'eau du Cameroun de 1969 à 1971*, Cahier ORSTOM, Série Hydrologie, n°9, 47-74.

- OLIVRY J. C. (1977), *Transports solides en suspension au Cameroun*, In Erosion and Solid Matter Transport In Inland Water, actes du colloque de Paris, juillet 1977, International Association of Hydrological Science (IAHS) publication, n°22, 134-141
- OLIVRY J. C. (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, Actes du colloque PEGI, CNRS-INSU-ORSTOM, Paris, 281-292.
- Panagos P., Jones A., Bosco C., Senthil Kumar P.S. European digital archive on soil maps (EuDASM): Preserving important soil data for public free access (2011) International Journal of Digital Earth, 4 (5), pp. 434-443.
- PNUE (2003) : *Rapport national sur les problèmes environnementaux liés au bassin de la Pendjari au Bénin*, Accra, 40 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 Science (Géologie) de l'Université de Strasbourg.
- SABI B. E. (2007), *Etude pétrologique et structurale du Massif Kabyè, Nord-Togo*, Thèse de doctorat nouveau régime, Science de la Terre, Pétrologie, Université de Lomé, Lomé.
- SIL INTERNATIONAL (2012), *Ethnologue languages of the World, Maps, Benin*, <http://www.ethnologue.com/map/BJ>.
- TRICART J. (1965), *Principe et Méthodes de la Géomorphologie*, Masson et Cie, Paris.
- TRICART J. (1977), *Précis de Géomorphologie, Tome II, géomorphologie dynamique générale*, C. D.U. et S.E.D.E.S., Paris.
- VANONI V. A. (1975), *Sedimentation Engineering*, American Society of Civil Engineers, Manuel and Rapports on Engineering Practices, 54, New York.
- VERSTRAETEN G., POESEN J. (2001), *Factors controlling sediment yield from small intensively cultivated catchments in temperate humid climate*, Géomorphology, n°40, 123-144.
- WALLING D. E., WEBB B. W. (1981), *The reliability of suspended sediment load data*, In "Erosion and sediment transport measurement", Proceedings of Florence symposium, IAHS Publication, 133, 177-194.

