



HAL
open science

Teneur en matières en suspension des lacs sahéliens en liaison avec les variations piézométrique et pluviométrique : cas des lacs Bangou Kirey et Bangou Bi, Sud-Ouest Niger

Amadou Abdourhamane Touré, Adamou Tidjani, Rodrigue Guillon, Jean Louis Rajot, Christophe Petit, Zibo Garba, David Sebag

► To cite this version:

Amadou Abdourhamane Touré, Adamou Tidjani, Rodrigue Guillon, Jean Louis Rajot, Christophe Petit, et al.. Teneur en matières en suspension des lacs sahéliens en liaison avec les variations piézométrique et pluviométrique : cas des lacs Bangou Kirey et Bangou Bi, Sud-Ouest Niger. *Afrique Science : revue internationale des sciences et technologies*, 2016, 12 (2), pp.384 - 392. hal-02555703

HAL Id: hal-02555703

<https://hal.science/hal-02555703>

Submitted on 27 Apr 2020

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.

Teneur en matières en suspension des lacs sahéliens en liaison avec les variations piézométrique et pluviométrique : cas des lacs Bangou Kirey et Bangou Bi, Sud-Ouest Niger

Amadou ABDOURHAMANE TOURE^{1*}, Adamou Didier TIDJANI², Rodrigue GUILLON³, Jean Louis RAJOT^{4,5}, Christophe PETIT³, Zibo GARBA¹ et David SEBAG^{6,7}

¹ *Université Abdou Moumouni de Niamey, Faculté de Sciences et Techniques, Département de Géologie, BP 10662, Niger*

² *Université Abdou Moumouni de Niamey, Faculté d'Agronomie, BP 10960, Niger*

³ *UMR 7041 ARSCAN, Paris 1, France*

⁴ *IEES-Paris UMR IRD 242 - CNRS, UPMC, UPEC, INRA, France*

⁵ *LISA, UMR CNRS 7583, UPEC, UPD, IPSL, Créteil, France*

⁶ *HSM UMR CNRS/IRD 5569, Montpellier, France*

⁷ *M2C UMR 6143 CNRS, Rouen, France*

* Correspondance, courriel : doudu2000@yahoo.fr

Résumé

L'envasement des cours d'eau est une des graves conséquences des changements climatiques et des fortes pressions anthropiques au Sahel. Des taux de comblement de l'ordre de 2 à 3 cm/an ont été mis en évidence dans ceux de la région de Niamey (Sud-Ouest Niger). Dans ce contexte, ce travail est fait pour déterminer les impacts des variations piézométrique et pluviométrique sur la dynamique des matières en suspension (MES) participant au comblement des lacs (Bangou Kirey et Bangou Bi). Les résultats obtenus montrent que Bangou Kirey, alimenté par des koris drainant un plus vaste bassin versant, contient au moins 30 fois plus de MES que Bangou Bi. La concentration en MES dans Bangou Kirey a, cependant, été impactée par l'effet de la remontée de la nappe phréatique et les apports en sédiments fins apportés par les eaux de ruissellement. Elle a, en effet, été diluée par la remontée en surface de ladite nappe. Par ailleurs, si l'influence des pluies, plus importantes et plus fréquentes, de la deuxième partie de la saison des pluies (après mi-juillet) est moins marquée, les premières pluies ont été celles qui ont causé plus d'érosion ayant abouti à un accroissement continu de la concentration en MES.

Mots-clés : *Sahel, envasement, nappe phréatique, pluie, Bangou Kirey, Bangou Bi, Niger.*

Abstract

Sahelian lakes particles matter suspended contents in relation with water table and rainfall ambivalence : case of Bangou Kirey and Bangou Bi (SW Niger)

River and lake silting is the most dramatically consequences of climate changes and human pressure in the Sahel. Silting rate like 2 to 3 cm/year has been fund in some lakes or rivers near of Niamey (SW Niger).

This work aimed to determine the impacts of water table and rainfall variabilities on the amount of particles matter suspended (MES) which participate to the silting of Lake Bangou Kirey and Bangou Bi. Thus, it appeared that Bangou Kirey watershed is wider and it is maintained by enormous kori so it contained at least more than 30 times MES concentration than Bangou Bi. Nevertheless, Bangou Kirey MES concentration has been inversely impacted by water table and rainfall. This concentration has been diluted by the water table rising. In another way, the important and frequent rainfalls of the second part of the rainy season (after mi-July) marked less the MES concentration. But the first rainfalls caused important erosion thus they leded a continue increasing of the MES concentration in Bangou Kirey.

Keywords : *Sahel, silting, water table, rainfall, Bangou Kirey, Bangou Bi, Niger.*

1. Introduction

Le Sahel est une zone géographique en équilibre écologique précaire, sensible aux changements environnementaux et aux variations climatiques. Il a connu au cours des quatre dernières décennies des déficits pluviométriques de l'ordre de 25-40 % comparativement à la période 1930-1960 [1 - 3]. Ces déficits ont causé d'importantes dégradations environnementales ainsi que la mort de plusieurs millions d'arbres et arbustes [4]. Cependant, les sècheresses et leurs corollaires n'expliquent pas, à eux seuls, la dégradation du milieu. En effet, le Sahel est une région à forte croissance démographique. Cette dernière, particulièrement importante après 1950, est devenue un facteur majeur du changement des rapports entre l'Homme et son environnement dans l'espace sahélien où la population a plus que triplé entre 1950 et 2000 [5]. L'augmentation de la population s'est accompagnée d'une pression accrue sur les ressources naturelles avec une forte demande en énergie et en nourriture, ce qui a conduit à un déboisement intensif et à l'expansion des terres cultivées [6 - 10]. La conversion des savanes en terres agricoles a favorisé ainsi l'impact des érosions hydrique et éolienne [9 - 13]. Cette dégradation environnementale a aussi entraîné des perturbations importantes dans les flux hydrologiques [14 - 16]. Dans la région de Niamey, par exemple, on note une remontée de la nappe phréatique depuis les années 1960, phénomène a priori contradictoire avec la baisse de la pluviométrie, mais qui est dû à l'augmentation du ruissellement dans un contexte endoréique [9, 17]. Ainsi, suite à la remontée de la nappe phréatique, sont apparus des lacs pérennes qui constituent des pièges à sédiments. Les sédiments carottés sous les lames d'eau de ces lacs ont montré un taux de comblement de 2 à 3 cm par an [18, 19]. C'est pour mieux comprendre ce processus de comblement que cette étude a été réalisée en vue de quantifier et caractériser la dynamique des particules en suspension (MES) participant au comblement de ces lacs. Il s'agit en particulier de déterminer les impacts des variations piézométrique et pluviométrique sur cette dynamique.

2. Matériel et méthodes

2-1. Sites

Le site de Saga Gorou (13,51°N – 2,21°E) est situé à 10 km à l'Est de Niamey (*Figure 1*). Le climat de type sahélien est caractérisé par une longue saison sèche (octobre-mai) et une courte saison des pluies (juin-septembre). Les lacs étudiés sont Bangou Bi et Bangou Kirey distants de près de 1 km. Ces lacs sont apparus au milieu des années 1960 suite à l'augmentation du ruissellement et la remontée de la nappe [9, 17]. Bangou Bi est l'affleurement de la nappe dans un petit bassin versant presque confiné et qui reçoit moins d'eau par ruissellement que Bangou Kirey.

Il résulte alors des eaux claires dans Bangou Bi et troubles dans Bangou Kirey (*Photo 1*). Les eaux de Bangou Kirey sont acides (pH variant entre 5 et 7), très faiblement minéralisées (conductivité $30 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) et de faciès chloruré sodique tandis que pour les eaux de Bangou Bi, le pH varie entre 6,5 et 8. Les bassins versants sont dominés par des plateaux (altitude moyenne 220 m) aux sommets encroûtés, et par des versants sableux de pente variant entre 1 à 2 % supportant les cultures pluviales de mil. A proximité de ces plateaux, les versants sont aussi encroûtés [10].

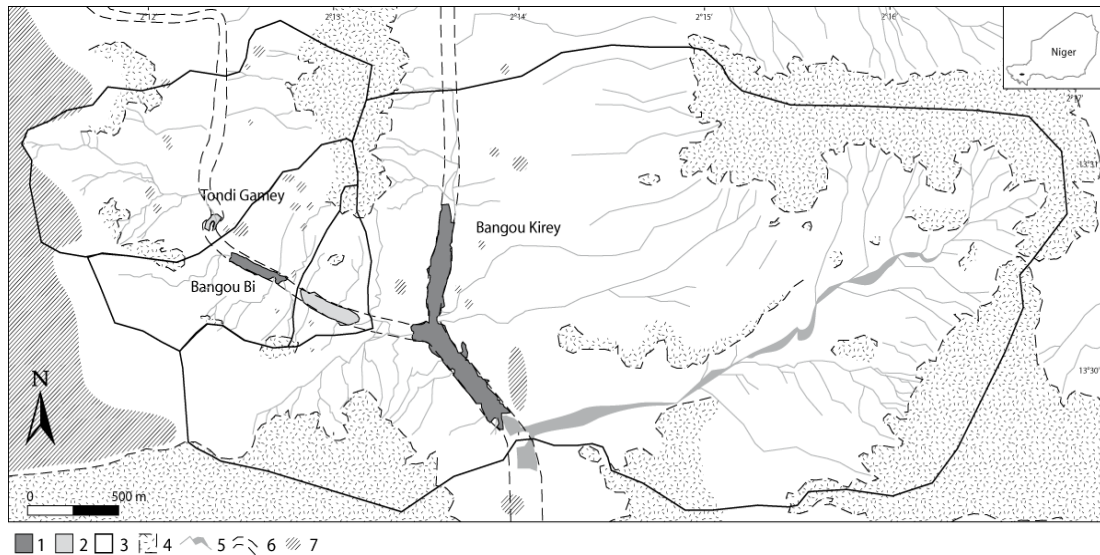


Figure 1 : Carte hydrologique du site. 1 lac permanent ; 2 lac temporaire; 3 limites de bassin versant ; 4 plateaux, haut et moyen glacis; 5 ravines (kori); 6 ancienne rivière, affluent du Niger; 7 habitations



Photo 1 : Echantillons d'eau de Bangou Bi (à gauche) et Bangou Kirey (à droite) (Photo : Rajot, 2008)

2-2. Mesures limnimétrique et pluviométrique

La cote des eaux de Bangou Bi a été mesurée entre mai 2008 et mars 2009 à l'aide de deux échelles complémentaires distantes de 20 m. Les échelles longues de 1 m chacune sont graduées au pas centimétrique. Une lecture de la hauteur des eaux est réalisée chaque matin à 6 heures. Ces lectures indiquent l'évolution de la hauteur du lac mais aussi celle du niveau piézométrique du fait qu'à Bangou Bi, c'est essentiellement la nappe phréatique qui affleure sous forme de lac [19]. Parallèlement à cette mesure, les hauteurs de pluie, en 2008 et 2009, ont été déterminées après chaque événement pluvieux au moyen d'un pluviomètre totalisateur installé à 70 m de Bangou Bi.

2-3. Détermination de la concentration en matières en suspension (MES)

Les concentrations en matières en suspension dans les deux lacs ont été mesurées entre avril 2008 et mars 2010. Des échantillonnages, en surface, à l'aide de bidons de 1,5 L d'eau ont été effectués chaque semaine. Après homogénéisation, un volume d'eau compris entre 200 et 380 mL est prélevé puis filtré sur des filtres en nitrate de cellulose de type Whatman filter (diamètre des pores égale 0,45 μm) préalablement taré. Le filtre et les sédiments filtrés sont, ensuite, séchés à l'étuve, à 50°C, pendant 2 jours. La masse des particules en suspension, obtenue en retranchant la tare du filtre de la masse filtre+sédiment séché à l'étuve, a été divisée par le volume d'eau microfiltré pour déterminer la concentration des eaux en matières en suspension (MES).

3. Résultats et discussion

3-1. La pluie

La pluie a connu une variabilité temporelle (*Figure 2*). Juillet et Août, les mois les plus arrosés, ont cumulé 64 % et 71 % des cumuls de pluies enregistrées en 2008 et 2009 respectivement. Le cumul de pluies a atteint 490 en 2009 contre 423 en 2008. Ceux-ci sont en deçà de la moyenne annuelle de pluie de la période 1950-2008 qui a été de 540 mm. Dans la région de Niamey, un épisode pluvieux suffisamment important pour provoquer un ruissellement efficace est de l'ordre de 20 mm [20]. Ainsi, c'est un total de 8 pluies efficaces qui ont été dénombrées en 2009 contre 7 en 2008 sur 36 et 45 événements pluvieux respectivement, soit 1 événement sur 6,4 en 2008 et 1 événement sur 4,5 en 2009.

3-2. Dynamique du niveau piézométrique

Les mesures limnimétriques, effectuées sur près de 18 mois, ont montré que le niveau piézométrique à Bangou Bi connaît une phase de montée des eaux, de juin-juillet à septembre, et une phase de baisse des eaux durant le reste de l'année. La montée des eaux marque un retard par rapport aux débuts des pluies (*Figure 2*). Ce retard qui a été de l'ordre de 2 mois est similaire à celui observé pour la réponse de la nappe phréatique à l'Est de la zone d'étude où elle n'affleure pas [21]. Le temps de réponse de la nappe par rapport au début de la saison des pluies, calculé sur 10 ans dans le piézomètre le plus proche de la mare de Banizombou (13,53°N ; 2,67°E) qui a varié entre 2 à 4 mois [22] confirme cette tendance. Ainsi, le lac Bangou Bi apparaît comme essentiellement alimenté par la nappe phréatique, surtout que son bassin versant est restreint par rapport à celui de Bangou Kirey (*Figure 1*). Le fait que le bassin versant de Bangou Bi ne présente pas de ravine majeure drainant des flux hydriques et sédimentaires depuis les plateaux appuie cette hypothèse. Comme pour la nappe phréatique, les premières pluies de la saison (mai à mi-juillet) ont peu d'influence directe sur la hauteur de l'eau de Bangou Bi, mais ont alimenté sans doute par ruissellement des points clefs de la recharge de la nappe situés à proximité de Bangou Bi selon le processus décrit par [21, 23, 24].

L'analyse de la dynamique globale de la cote de ce lac montre que la montée des eaux a été plus importante en 2009 où elle a atteint 176 cm, qu'en 2008 où elle était de 154 cm. Cette tendance s'expliquerait par le cumul de pluie qui a été légèrement plus important en 2009 (490 mm) qu'en 2008 (423 mm). Cependant, les travaux de [23] ont montré que la montée annuelle de la nappe n'est pas directement corrélée à la pluie. Toutefois, la durée relativement courte de notre série temporelle ne permet pas de contredire ce résultat. Il faut noter que les variations saisonnières de la piézométrie à Bangou Bi sont comparables à celles du niveau de la nappe phréatique mesurées à différents endroits de la région de Niamey : à Banizoumbou, de 1995 à 2000, le niveau de la nappe a augmenté de 0,5 à 2 m au cours des saisons des pluies [22], tandis qu'à Ko Gorou (13,54°N ; 2,25°E), la variation saisonnière du niveau de la nappe phréatique a été de 1 à 3 m de 1992 à 2000 [17]. A la différence de Bangou Bi, le lac Bangou Kirey est souvent alimenté par des écoulements venant de l'amont de l'ancienne rivière (*Figure 1*) et il présente un exutoire au sud où les écoulements sont très fréquents au cours de la saison des pluies. De plus, son bassin versant est totalement différent de celui de Bangou Bi car alimenté par de très grands koris drainant un bassin versant de près 60 km² (contre 5 km² pour Bangou Bi) (*Figure 1*). On peut donc s'attendre à ce que le fonctionnement de ce lac diffère sensiblement de celui de Bangou Bi puisqu'il reçoit des écoulements de surface conséquents en particulier, en début de saison des pluies. En effet, durant cette période, Bangou Kirey doit se comporter comme un lac temporaire de la région dont le niveau d'eau augmente dès les premières pluies ruisselantes [23].

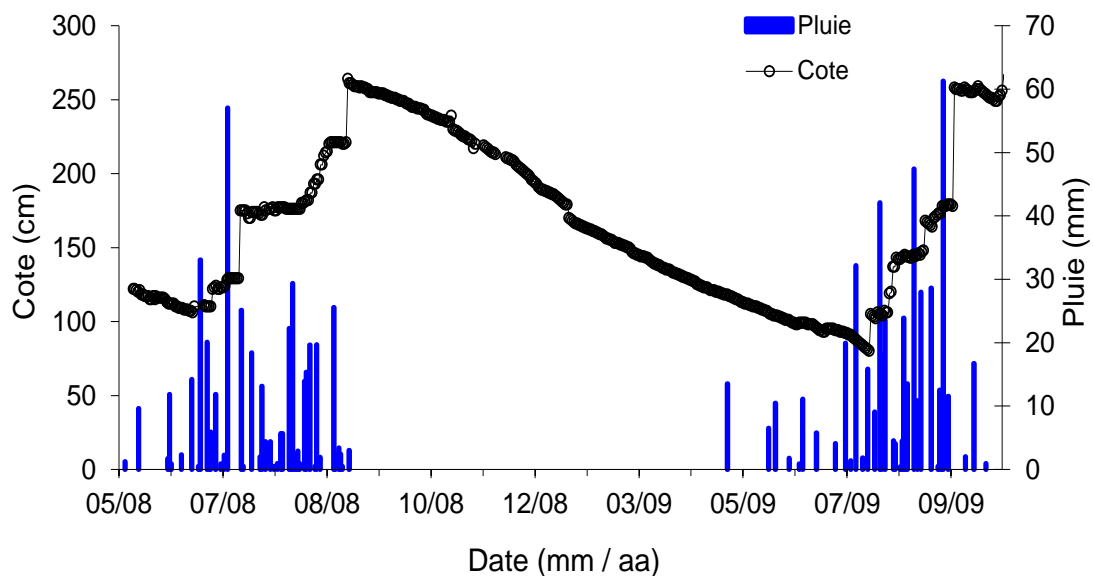


Figure 2 : Evolution de la cote des eaux de Bangou Bi et de la pluviométrie (mm = mois ; aa = année)

3-3. Evolution de la concentration en MES des eaux des lacs

La concentration en MES des eaux de Bangou Kirey augmente assez régulièrement en début de saison des pluies de mai à mi-juillet où elle atteint sa valeur maximale (*Figure 3*). L'augmentation régulière de la teneur en MES durant cette période s'explique assurément par les apports de sédiments dus à l'érosion hydrique liée aux premières pluies de la saison (*Figure 3*). Les apports en eau et en sédiments beaucoup plus importants à Bangou Kirey se produisent, ainsi, dès les premières pluies ruisselantes. Cependant, la décroissance de la concentration en MES à partir de mi-juillet intervient à un moment où les quantités de pluies par événement sont plus élevées et où les fréquences d'événement sont plus fortes, ce qui semble contradictoire.

En fait, il apparaît que cette décroissance des concentrations correspond au moment où commence la crue de la nappe phréatique comme il a été montré à travers le suivi de la cote des eaux de Bangou Bi, qui est très proche de Bangou Kirey (**Figure 1**). Cette diminution de la concentration en MES peut donc s'expliquer par un phénomène de dilution des eaux de Bangou Kirey due aux apports en eau non chargée en MES de la nappe phréatique (**Figure 4**). Il est d'ailleurs remarquable que la baisse de la concentration se fasse par changements assez brusques qui correspondent sensiblement au pallier de remontée de ladite nappe phréatique (**Figure 4**). Une éventuelle érodibilité plus faible des sols du bassin versant en deuxième partie de saison des pluies due au développement de la végétation ne paraît donc pas être une explication majeure pour justifier la baisse de la concentration en MES. Durant la saison sèche on observe une très lente diminution de la concentration en particules qui passe légèrement en dessous d'une concentration de 1 g/L. Cette diminution de la concentration pourrait s'expliquer par une décantation très lente des particules fines dans une situation où les apports en eau non chargée par la nappe diminuent. La comparaison des concentrations en MES montre que Bangou Kirey est plus chargée en sédiments que Bangou Bi où les concentrations ont, le plus souvent, avoisinées 80 mg/L (saison des pluies) et 1 mg/L (saison sèche) (**Figure 4**). Cette différence de concentration est relativement plus importante en saison sèche où Bangou Kirey contient au moins cent fois plus de MES que Bangou Bi. Cette différence est moins importante en saison des pluies où le facteur n'est plus que de l'ordre de 25. La forte concentration en MES des eaux de Bangou Kirey est due au fait qu'il reçoit beaucoup plus d'apports par ruissellement. En effet, Bangou Kirey a un bassin versant plus étendue que Bangou Bi et compte plus de grands koris déversant les particules érodées plus en amont (**Figure 1**). Ces différences de concentration en MES entre ces deux lacs expliqueraient les différences dans leurs propriétés chimiques particulièrement dans leurs pH et leur couleurs découlant des caractéristiques des sédiments charriés. Les pH des eaux des 2 lacs ont en effet des valeurs très différentes. Au cours d'une année, le pH de Bangou Bi a oscillé entre 6,5 et 8, mais est resté généralement au-dessus de 7. La moyenne annuelle est de $7,41 \pm 0,35$, soit une ambiance basique. Quant aux eaux de Bangou Kirey, leur pH est compris entre 5,8 et 7, avec une moyenne annuelle de $6,35 \pm 0,37$, soit une ambiance acide dudit milieu.

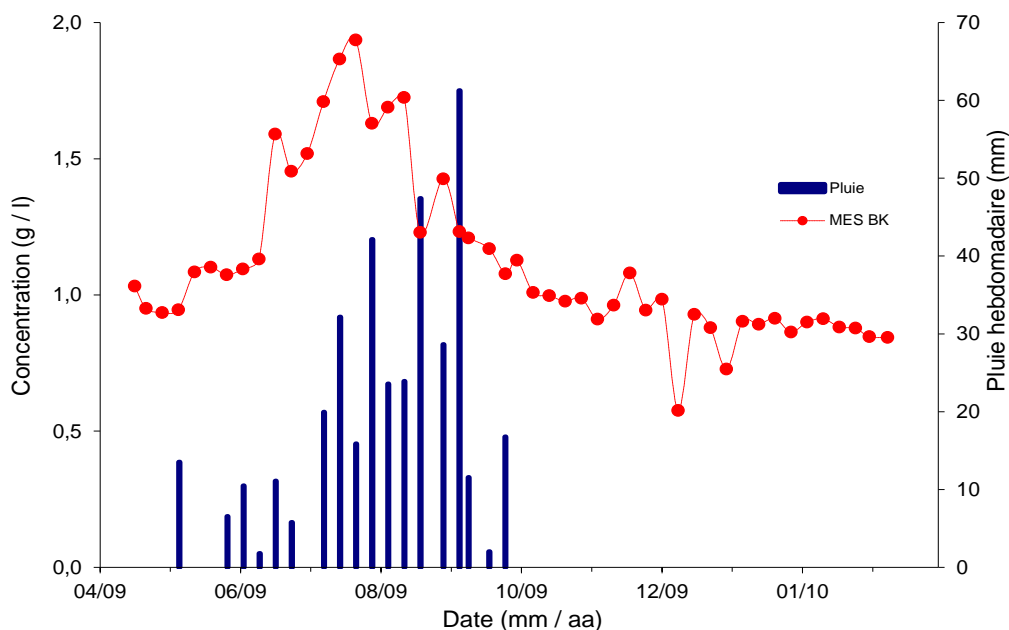


Figure 3 : Hauteur de pluie maximale hebdomadaire et de la concentration en MES dans Bangou Kirey (BK) entre avril 2009 et mars 2010

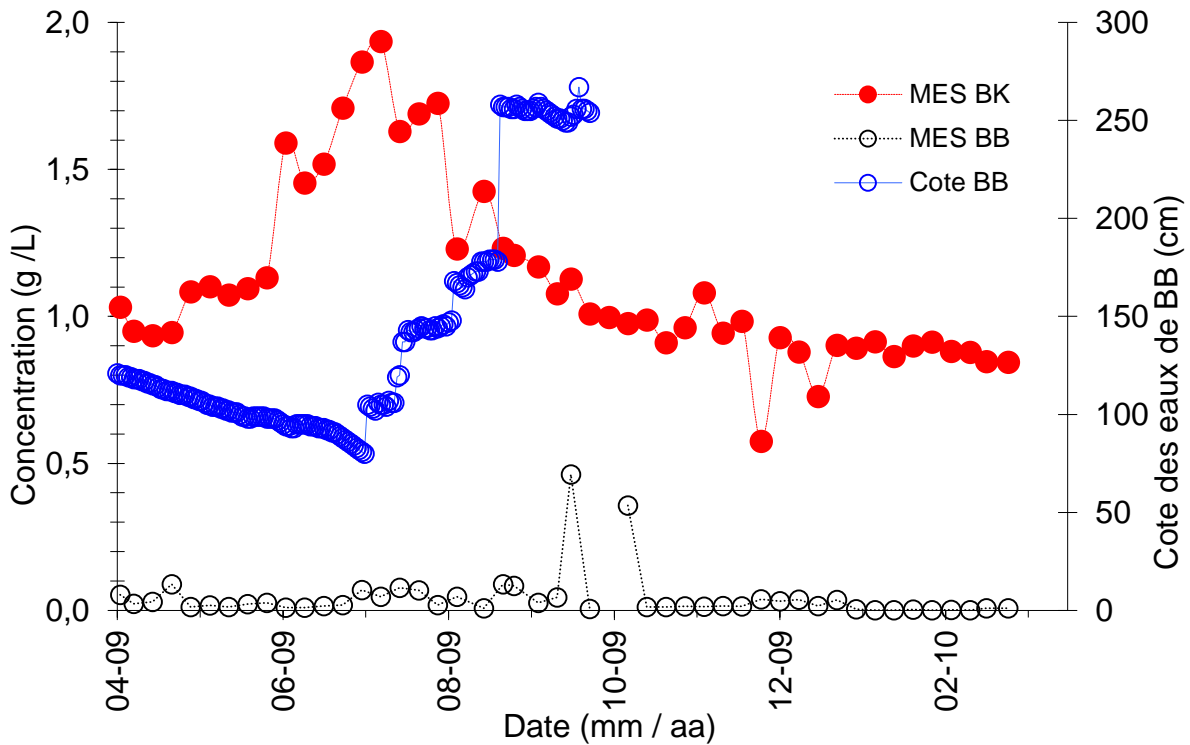


Figure 4 : Variations de la concentration en MES dans Bangou Kirey (BK) et Bangou Bi (BB), et variation piézométrique (cote BB)

4. Conclusion

Il ressort de cette étude que la dynamique globale des lacs sahéliens de la région de Niamey, Bangou Kirey et Bangou bi, est différente. En effet, les risques liés à l'envasement de ces retenus, plus important dans Bangou Kirey, peuvent être contrôlés par trois facteurs principaux : le niveau de la nappe phréatique, la pluviométrie et la structure du bassin versant :

- La crue de la nappe phréatique se manifeste par une dilution des eaux de Bangou Kirey traduite par une baisse continue de la concentration en MES au fur de la montée des eaux de ladite nappe.
- Les premières pluies se sont traduites par une érosivité importante des surfaces des bassins versants drainant, ainsi, des flux sédimentaires qui ont augmenté la concentration en MES des lacs. Cependant, dans la seconde partie de la saison des pluies (après mi-juillet), l'effet de la dilution étant plus importante, les importantes et fréquentes pluies ont conduit, seulement, à une augmentation sporadique de la concentration en MES.
- Le bassin versant de Bangou kirey, plus vaste et marqué par de très gros koris a induit une concentration en MES plus élevée que dans Bangou Bi dont le bassin versant est très restreint et quasi-confiné.

Références

- [1] - P. OZER, M. ERPICUM, "Méthodologie pour une meilleure représentation spatio-temporelle des fluctuations pluviométriques observées au Niger depuis 1905", *Sécheresse* ; 6 (1995) 103-108.
- [2] - B. G. HUNT, "Natural climatic variability and sahelian rainfall trends", *Global and Planetary Change*, 24 (2000) 107-131.
- [3] - Y. L'HÔTE, G. MAHÉ, B. SOMÉ, J. P. TRIBOULET, "Analysis of a sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000; the drought continues", *Hydrological Sciences Journal*; 47-4 (2002) 563-572.
- [4] - PH. C. CHAMARD, M. F. COUREL, "La forêt sahélienne menacée", *Sécheresse*, 10 (1999) 11-18.
- [5] - C. RAYNAUT, "Societies and nature in the Sahel: ecological diversity and social dynamics", *Global Environmental Change*, 11 (2001) 9-18.
- [6] - M. BANOIN, J. P. GUENGANT, "Les systèmes agraires traditionnels nigériens dans l'impasse face à la démographie in *Jachères et systèmes agraires*", Eds. Floret C., Pontanier R., CORAF/Union Européenne, Dakar, (1999) 1-14.
- [7] - J. P. GUENGANT, M. BANOIN, "Dynamique des populations, disponibilités en terres et adaptation des régimes fonciers : le cas du Niger". FAO-CICRED, (2003) 144.
- [8] - L. SEGUIS, B. CAPPELAERE, G. MILESI, C. PEUGEOT, S. MASSUEL, G. FAVREAU, "Simulated impacts of climate change and land-clearing on runoff from a small Sahelian catchment", *Hydrological Processes* 18 (2004) 3401-3413.
- [9] - M. LEBLANC, G. FAVREAU, S. MASSUEL, S. TWEED, M. LOIREAU, B. CAPPELAERE, "Land clearance and hydrology change in the Sahel, SW Niger". *Global and Planetary Change*, 61 (2007) 135 - 150.
- [10] - A. ABDOURHAMANE TOURE, R. GUILLON, Z. GARBA, J. L. RAJOT, C. PETIT, V. BICHET, A. DURAND, D. SEBAG, "Evolution des paysages sahéliens au cours des 6 dernières décennies dans la région de Niamey : de la disparition de la brousse à l'encroûtement de surface des sols". *Pangea, Volume Spécial*, (2010) 35-40.
- [11] - E. M. A SMALING, J. J. STOOHVAGEL, P. N. WINDMEIJER, "Calculating soil nutrient balances in Africa at different scales 2", *Districtal scale Fert Res* , 35 (1993) 237-50.
- [12] - C. L. BIELDERS, J. L. RAJOT, M. AMADOU, "Transport of soil and nutrients by wind in bush fallow land and traditionally managed cultivated fields in the Sahel", *Geoderma*, 109 (2002) 19-39.
- [13] - C. L. BIELDERS, J. L. RAJOT, M. KARLHEINZ, "L'érosion éolienne dans le Sahel nigérien : influence des pratiques culturales actuelles et méthodes de lutte". *Sécheresse*, 15 (2004) 19-32.
- [14] - K. MCGUFFIE, A. HENDERSON-SELLERS, H. ZHANG, T. B. DURBIDGE, A. J. PITMAN, "Global climatic sensitivity to tropical deforestation", *Global and Planetary Change*, 10 (1995) 97-128.
- [15] - G. MAHE, J. C. OLIVRY, "Assessment of freshwater yields to the ocean along the intertropical Atlantic coast of Africa (1951-1989)", *C. R. Acad. Sci., Paris IIa*, 328 (1999) 621-626.
- [16] - D. A. TAYLOR, "Dust in the wind", *Environmental Health Perspectives*, 110 (2002) A80-A87.
- [17] - C. LEDUC, G. FAVREAU, P. SHROETER, "Long term rise in a Sahelian water-table : the continental terminal in South-West Niger", *Journal of Hydrology*, 243 (2001) 43-54.
- [18] - A. ABDOURHAMANE TOURE, R. GUILLON, C. PETIT, J. L. RAJOT, Z. GARBA, V. BICHET, A. DURAND, D. SEBAG, "Les sédiments des lacs de la région de Niamey : mémoire de l'évolution récente (50 ans) du milieu sahélien ?" *Pangea, Volume Spécial*, (2010) 41-46.
- [19] - R. MABICKA OBAME, C. YOANN, D. SEBAG, A. ABDOURHAMANE TOURÉ, C. DI-GIOVANNI, V. BICHET, M. BOUSSAFIR, A. DURAND, Z. GARBA, R. GUILLON, C. PETIT, J. L. RAJOT, E. LALLIER-VERGÈS, "Carbon storage in small Sahelian lakes as an unexpected effect of land use changes since 1960s (Saga Gorou and Dallol Bosso, SW Niger)", *Catena*, 114 (2014) 1-10.

- [20] - H. LUBES-NIEL, L. SEGUIS, R. SABATIER, "Etude de stationnarité des caractéristiques des événements pluvieux de la station de Niamey sur la période 1956-1998". *C. R. Acad Sci*, 333 (2001) 645-650.
- [21] - G. FAVREAU, "Caractérisation et modélisation d'une nappe phréatique en hausse au Sahel : dynamique et géochimie de la dépression piézométrique du kori de Dantiandou (sud-ouest du Niger)", thèse de l'Université Paris-Sud 11, (2000) 348.
- [22] - W. MARTIN-ROSALES, C. LEDUC, "Dynamics of emptying of a temporary pond in the Sahel : the case study of Banizoumbou (southwestern Niger)", *Geoscience*, 335 (2003) 461-468.
- [23] - J. C. DESCONNETS, J. D. TAUPIN, T. LEBEL, C. LEDUC, "Hydrology of the Hapex-Sahel Central super-site: surface water drainage and aquifer recharge through the pool systems". *Journal of Hydrology*, 188-189 (1997) 155-178.
- [24] - C. LEDUC, J. BROMLEY, P. SCHROETER, "Water-table fluctuation and recharge in semi-arid climate : some results of the Hapex-Sahel hydrodynamic survey (Niger)". *Journal of Hydrology* 188-189 (1997) 123-138.