

Paradoxes et contrastes en Afrique de l'Ouest : Impacts climatiques et anthropiques sur les écoulements

Luc Descroix¹, Pierre Genthon², Christophe Peugeot², Gil Mahé², Moussa Malam Abdou³, Jean-Pierre Vandervaere⁴, Ibrahim Mamadou³, Bachir Tanimoun⁵, Ilia Amadou⁵, Sylvie Galle⁶, Théo Vischel⁶, Guillaume Quantin⁶, Honoré Dacosta⁷, Ansoumana Bodian⁸, Yahaya Nazoumou⁹, Arnaud Zannou¹⁰

¹ hydrologue, UMR PALOC IRD/MNHN, Dakar, luc.descroix@ird.fr

² hydrogéologue et hydrologues, UMR HSM IRD/UM, Montpellier, pierre.genthon@ird.fr, christophe.peugeot@ird.fr ; gil.mahe@ird.fr

³ géographe, Université de Zinder, Niger, malanmoussa@gmail.com

⁴ physicien du sol, UMR LTHE UJF/CNRS/IRD/ENS3, Grenoble, jean-pierre.vandervaere@ujf-grenoble.fr

⁵ hydrologues, Autorité du Bassin du Niger ABN, Niamey, Niger, bat_alkalao@yahoo.com; i_amadou@yahoo.fr

⁶ hydrologue et informaticien, UMR LTHE IRD/CNRS/UJF/ENS3, Grenoble, sylvie.galle@ird.fr ; guillaume.quantin@ujf-grenoble.fr

⁷ géographe, UCAD, Dakar, Sénégal, honore.dacosta@ucad.edu.sn

⁸ géographe, UGB, Saint Louis, Sénégal, ansoumana.bodian@ugb.edu.sn

⁹ hydrogéologue, UAM, Niamey, Niger, nazoumou@gmail.com.

¹⁰ hydrologue, DGE Benin, arnaud.zannou@gmail.com

Introduction

Durant la seconde moitié du XX^e siècle, l'Afrique de l'Ouest a connu une période d'excédent pluviométrique de 1950 à 1967, puis une période de déficit pluviométrique prolongé et marqué, de 1968 à 1995. Cet épisode de sécheresse est considéré comme l'un des plus importants à l'échelle du climat mondial du XX^e siècle (Hulme, 2001). Depuis 1995, la plus grande partie de la région a retrouvé un niveau de pluviométrie intermédiaire ainsi qu'une variabilité interannuelle analogues à ceux de la première moitié du XX^e siècle (Descroix *et al.*, 2012).

Les débits des grands cours d'eau d'Afrique de l'Ouest ont été fortement impactés par la sécheresse avec un déficit d'écoulement deux fois plus prononcé que celui des précipitations (Olivry, 2002). Toutefois, au creux de la sécheresse, on a remarqué que les écoulements étaient en augmentation dans les bassins de petite taille de la zone sahélienne (Albergel, 1987), où pourtant le déficit pluviométrique était le plus prononcé (Lebel *et al.*, 2003) ; ceci a été confirmé par la suite pour les bassins de superficie intermédiaire de la zone sahélienne (Mahé *et al.*, 2003 ; Mahé *et al.*, 2005 ; Descroix *et al.*, 2012).

On se propose ici d'expliquer que cet antagonisme entre le comportement des grands fleuves d'Afrique de l'Ouest et celui de leurs affluents sahéliens résulte des propriétés de ruissellement des sols.

Matériel et méthodes

Les données des cours d'eau d'Afrique de l'Ouest ont été fournies par les agences de bassin du fleuve Niger (ABN), du fleuve Sénégal (OMVS), du fleuve Gambie (OMVG), du Lac Tchad (CBLT) et par la Direction générale de l'eau du Bénin (Ouémé) ; les autres proviennent d'une dizaine de publications sur des bassins versants, au Ghana, Côte d'Ivoire, Togo, et Cameroun.

Elles sont de bonne qualité et comportent peu de lacunes, sauf dans les années récentes. Les données pluviométriques sont celles qui ont été rassemblées durant le programme AMMA¹. Pour les années récentes, elles ont été achetées auprès des services météorologiques nationaux². Les champs de pluie ont été obtenus par krigeage à partir des mesures des postes pluviométriques. Les tendances et ruptures ont été calculées avec le logiciel Khronostat de l'IRD qui applique les tests de Pettitt, Buishand, Bois et la

¹ Voir le site de l'observatoire AMMA-Catch : www.amma-catch.org/

² Depuis les PAS (Plans d'Ajustement Structurels) imposés aux pays du sud par le FMI et les pays du Nord au début des années 1990, les services météo vendent leurs données (pour un prix relativement élevé, voir Mahé et Gioda, 2009).

segmentation de Hubert. Là où cette segmentation n'était pas possible, on a opposé la période humide 1950-1970 à la période sèche 1971-2000.

Résultats

Une diminution des débits en zone soudano-guinéenne

À l'échelle de la sous région Afrique de l'Ouest (**Fig. 1**), en comparant la période 1950-1970 avec la période 1971-2000, on observe une forte diminution des écoulements durant la période de sécheresse pour les grands bassins. En zone soudano-guinéenne, la diminution des précipitations lors de la phase de déficit des années 1968-1995 s'est traduite par une diminution des écoulements. Celle-ci s'est produite avec un temps de latence nécessaire à la vidange de certains réservoirs : sol et sol profond, mares, puis zones humides et réservoirs souterrains en connexion avec les cours d'eau. Elle a cependant été bien plus marquée que celle des pluies.

Figure 1. *Tendance dans l'évolution des débits annuels moyens des bassins d'Afrique de l'Ouest entre la période 1950-1970 et la période 1971-2000 : une répartition zonale dans l'évolution des débits annuels ; l'isohyète 700 mm marque la limite Sud du Sahel ; les points rouges sont les stations hydrométriques, leur nom en noir ; le nom des rivières en bleu et blanc (isohyètes pour la période 1950-2000 ; d'après Amogu et al., 2010 ; et les auteurs).*

Pour le fleuve Niger, à la station de Koulikoro, le fleuve Sénégal, à celle de Bakel et le fleuve Gambie à la station de Gouloumbou (**voir localisation figure 1**), l'essentiel des écoulements provient de zones soudano-guinéennes. Une baisse d'environ 25% des pluies durant 20 ans y a entraîné une diminution proche de 50% des débits, comme le signalait Olivry en 2002 (**Fig. 2 et tableau SM1**). Pour certains affluents, comme le Bani (voir figure 1), affluent du Niger, les débits de la décennie 1980 sont déficitaires de plus de 80% par rapport aux décennies humides antérieures. Ceci a été relié en partie à la nature géologique des nappes qui enregistrent une baisse accrue de niveau durant les années de forte sécheresse (Mahé et Paturel, 2009). Les bassins de plus petite taille de la zone soudano-guinéenne ont montré le même comportement, qu'ils soient localisés dans le haut bassin du Niger, où ils montrent une hydraulicité élevée (Haut Niger, Milo, Niandan), ou dans son bassin aval (Alibori, Sota, Mekrou) ou encore dans le bassin voisin de l'Ouémé, avec une hydraulicité bien plus faible (**Fig. 3**). La segmentation a permis de déceler une rupture en 1967 dans presque toutes les séries. Le tableau SM1 regroupe toutes les valeurs et tendances.

Figure 2. *Évolution du débit annuel moyen de 3 grands fleuves des latitudes soudano-sahéliennes (sources : ABN, OMVS, OMVG).*

Figure 3. *Évolution des débits des cours d'eau de la zone soudano-guinéenne, en deux groupes : petits bassins du Fouta Djallon en haut, Ouémé et affluents soudaniens du Niger en bas (source : les auteurs, d'après les données ABN et DGE du Bénin).*

Une augmentation des débits pour les petits et moyens bassins de la zone sahélienne

La **figure 4** montre une tendance à l'augmentation des coefficients d'écoulement en zone sahélienne à partir du début de la sécheresse (Descroix *et al.*, 2012). On a appelé cette opposition « paradoxe hydrologique du Sahel » et on l'attribue à un signal anthropique (les changements d'usage des sols) bien plus important que le signal climatique (la baisse des précipitations) (Albergel, 1987 ; Amani et Nguetora, 2002 Mahé *et al.*, 2003 ; Seguis *et al.*, 2003 ; voir bibliographie complète dans les deux articles de synthèse sur le paradoxe sahélien : Descroix *et al.*, 2012, Descroix *et al.*, 2013b). Ceci est attribué à l'encroûtement des sols entraînant un accroissement du ruissellement. Dans certains cas extrêmes (Gourma malien) l'accroissement des débits résulte de la disparition des sols suivant la dégradation de la végétation induite par la sécheresse. Les zones de socle sont majoritairement exoréiques alors que les bassins sédimentaires sont surtout endoréiques, une observation qui pourrait

s'expliquer par la faible profondeur et par la faible perméabilité des altérites du socle, mais qui fait encore l'objet de recherches. L'endoréisme pourrait aussi être lié à la présence de dunes.

Figure 4. *Évolution des coefficients d'écoulement annuels moyens de 3 affluents de rive droite du Niger aux latitudes sahéliennes (on a laissé les points, car de nombreuses années manquent) (source: les auteurs, d'après les données de l'ABN). Une figure montrant évolution des débits se trouve dans le matériel supplémentaire, SM2.*

L'accroissement des ruissellements en zone sahélienne se traduit donc :

- ❖ en secteur exoréique, par un accroissement très marqué des écoulements, qui a été exacerbé depuis un quasi retour à la normale des précipitations : le débit de certains affluents du Niger (Gorouol, Dargol et Sirba) a été multiplié par 3,5 entre 1960 et 2010: Il semble donc que les réservoirs naturels (zones humides, sols, etc.) aient perdu de leur capacité de rétention ;
- ❖ en secteur endoréique, Descroix *et al.* (2012a) et Amogu *et al.* (2015) ont observé un accroissement des écoulements ; celui-ci s'est traduit par un gonflement des mares, devenues plus nombreuses, plus étendues, plus durables. Or ces mares sont les principaux points de recharge de la nappe, d'où une augmentation du niveau de celle-ci ; une des conséquences du « paradoxe du Sahel est donc la hausse de la nappe phréatique, mise en évidence dans le degré carré de Niamey, le « paradoxe de Niamey » (Leduc *et al.*, 1997 ; Favreau et Leduc, 1998 ; Leduc *et al.*, 2001 ; Leblanc *et al.*, 2008 ; Favreau *et al.*, 2009). Par exemple, le niveau de la nappe du CT3 (Continental Terminal 3) est ainsi monté de 4 m entre 1980 et 2010 dans la région de Niamey (Leblanc *et al.*, 2008). Cependant, dans les Niayes sénégalaises, c'est la reprise des pluies et l'urbanisation qui expliquent la remontée de la nappe (Diop, 2006 ; Maugis *et al.*, 2009).

Une explication par les processus ?

L'augmentation des écoulements en zone sahélienne s'explique parce que l'encroûtement superficiel des sols limite sévèrement l'infiltration (Fig. 5) ; on dit que les sols sont saturés par le haut et que le ruissellement se produit par « refus d'infiltration ». On parle alors de comportement « hortonien » des sols (Horton, 1933). Au contraire, dans les zones soudano-guinéennes plus humides et au couvert végétal bien plus dense, l'eau de pluie s'infiltré facilement dans les sols épais qui gardent une importante capacité de rétention en eau ; le ruissellement ne se produit qu'une fois le sol saturé (Fig. 6). On parle alors de saturation du sol par le bas, de comportement « cappusien » (Cappus, 1960). La baisse des pluies ne diminue en rien la capacité de rétention en eau des sols. Une hauteur constante de pluie servant à saturer les sols avant que l'eau ne puisse ruisseler, le déficit d'écoulement est d'autant plus fort que la capacité de rétention en eau des bassins est élevée.

Figure 5. *Schéma simplifié du fonctionnement « hortonien » (apparaît lorsque les intensités de pluie dépassent la capacité d'infiltration des sols) d'un sol (source : les auteurs).*

Figure 6. *Schéma simplifié du fonctionnement « cappusien » (ruissellement par saturation du sol) d'un sol (source : les auteurs).*

La figure 1 synthétise l'évolution des écoulements par bassin, pour l'ensemble de la sous-région Afrique de l'Ouest ; on note bien l'étagement latitudinal avec des zones sahéliennes où les débits augmentent et des zones soudaniennes et guinéennes où ils diminuent. Il faut toutefois insister sur les points suivants :

- ❖ l'étagement latitudinal est à considérer en termes de zones d'alimentation des bassins : c'est surtout leur partie amont qui les approvisionne ;
- ❖ les bassins équipés, pour lesquels on dispose de données, sont loin de couvrir la totalité de la sous-région ; de plus les zones endoréiques (bassin des Iullemeden, Gourma malien, etc.) sont dépourvues de cours d'eau ; le bilan y est donc plus difficile à établir. Cependant, le bilan est possible à partir des eaux souterraines (Leblanc *et al.*, 2008) ;
- ❖ pour les bassins à cheval sur l'isohyète 700 mm, une modification faible du régime d'écoulement de l'ensemble du bassin reflète une augmentation forte dans sa partie sahélienne, compensée par

une diminution forte dans sa partie soudanienne (Sénégal par exemple et bassin témoin du Goroubi à la station de Diongoré au Niger, Mahé *et al.*, 2003), et également par un début de saison des pluies présentant des écoulements forts, qui s'atténuent ensuite avec le recouvrement végétatif important.

Discussion et Conclusion

Le signal anthropique dépasse celui du changement climatique dans le cycle de l'eau du Sahel : les écoulements ont augmenté dès le début de la période sèche observée de 1968 à 1995 en Afrique de l'Ouest. La cause ne pouvant pas en être climatique, on a attribué cette augmentation des écoulements à la diminution de la couverture végétale, elle-même liée : (i) au signal climatique, la sécheresse ayant eu des pics très prononcés entraînant une surmortalité irréversible de la végétation naturelle, (ii) au signal anthropique, une grande partie du déboisement étant liée à la coupe de bois destinée aux besoins domestiques (cuisine, construction, etc.), (iii) à l'ouverture de nouveaux champs à la culture, en association avec la réduction ou la suppression des temps de jachère, et au surpâturage. Pour la période 1995-2013, au cours de laquelle la pluie a augmenté sans atteindre ses cumuls annuels des années 1950-1970, les changements d'usage des sols se combinent avec le retour des pluies ainsi qu'avec un accroissement des précipitations de fort cumul journalier (Descroix *et al.*, 2013a ; Panthou, 2013 ; Panthou *et al.*, 2014) pour expliquer l'augmentation des débits et de l'occurrence des crues (Aich *et al.*, 2015, Cassé, 2015 ; Cassé *et al.*, 2015 ; Cassé et Gosset, 2015 ; Descroix *et al.*, 2013a),

On observe donc en zone sahélienne une augmentation des ressources en eau, en général de bonne qualité pour les eaux souterraines, mais très mauvaise pour les eaux de surface. En effet, le volume annuel ruisselé a triplé, voire quadruplé, mais la durée d'écoulement est plus courte. Dans un cas comme dans l'autre, cet accroissement des disponibilités est la conséquence d'un fait très négatif, la diminution de la capacité de rétention en eau des sols, diminution synonyme de désertification et qui entraîne des dommages graves à des nombreuses infrastructures (routes, digues, ponts, etc.). Il faut donc œuvrer pour profiter de cette manne provisoire et l'utiliser pour reverdir le Sahel en espérant initier un processus vertueux où le reverdissement ralentit la dégradation des sols, puis aide à la reconstitution de ceux-ci, de leur fertilité et de leur capacité de rétention en eau, comme cela s'est produit dans la région de Maradi au Niger (Luxereau et Roussel, 1997).

D'autres bassins ont expérimenté ce type d'évolution, comme l'Amazonie, où « de 1981 à 2003, la pluviométrie est stationnaire et même légèrement en baisse tandis que le coefficient d'écoulement et le taux de déforestation sont à la hausse. Ceci conduit logiquement à penser que le déboisement pourrait être la cause de l'augmentation du débit » (Callède *et al.*, 2008). Dans le bassin du Mékong, Lacombe *et al.* (2011) démontrent un effet méconnu de la Guerre du Viet-Nam, qui touche le Laos principalement : les coefficients d'écoulement des bassins déboisés par l'agent orange pendant la Guerre ont augmenté et restent supérieurs aux autres ; à l'inverse des bassins vidés de leur population, où la forêt a repris sa place première, ont vu leurs débits baisser.

On a observé depuis la fin des années 1990 que l'augmentation des précipitations de fort cumul journalier était plus rapide que l'augmentation des pluies annuelles. Alors qu'on est loin d'atteindre les valeurs de pluie annuelle des décennies humides 1951-1970, la fréquence des pluies de 60 à 100 mm a pratiquement rattrapé son niveau d'avant la sécheresse, tant dans le bassin du Niger Moyen qu'en Sénégambie, (Descroix *et al.*, 2013) (figure 7). Panthou *et al.* (2014), sur une fenêtre plus large, détectent également une forte croissance récente des pluies « extrêmes », en concluant qu'on observe une « intensification » des précipitations.

Figure 7. Evolution par décennie des hauteurs de pluie tombées les jours de forts cumuls de pluie sur le bassin du Niger Moyen (entre Kandadji et Niamey voir figure 1).

Si les cours d'eau ouest africains sont l'objet de nombreux projets de barrages, ils sont pour l'heure très peu équipés, leur débit et régime sont donc très peu influencés par les aménagements. Par contre l'évolution hydro-sédimentaire active y entraîne des ruptures d'endoréisme qui sont à l'origine d'un accroissement de l'impluvium du fleuve Niger (Mamadou *et al.*, 2015). Cet élément récent trouble

légèrement le déterminisme géologique qui ferait des zones de socle des secteurs majoritairement exoriques aux latitudes sahéliennes, les terrains sédimentaires étant inversement surtout endoriques.

Cette augmentation du ruissellement entraîne aussi mécaniquement une diminution de la quantité d'eau disponible pour le cycle local des flux hydriques au Sahel, puisqu'une plus grande quantité d'eau est exportée vers les régions plus humides par les cours d'eau. Ceci a certainement un impact sur les bilans d'énergie au Sahel, mais cet impact n'a pas encore été pris en compte dans les modèles de climat car le cycle de l'eau modélisé n'intègre pas les observations récentes d'augmentation du ruissellement. Par ailleurs, en zone soudano-guinéenne, on observe en général l'existence d'une importante capacité de rétention en eau des sols, des terroirs et des bassins, qui assure la « soudure » par le soutien d'étiage et écrête aussi les crues. Il est important de conserver cette capacité de rétention, puisque d'elle dépend l'alimentation en eau douce d'une grande partie de l'espace soudano-sahélien pendant les longs mois de saison sèche. *A contrario*, la zone nord-soudanienne confirme sa « sahélistation », déjà observée en 1988 (Albergel et Valentin) : les stations de cette zone ont vu leurs débits stagner ou n'augmenter que faiblement, durant la période déficitaire ; ils connaissent à présent de fortes augmentations des débits. Des mesures de conservation des terres doivent y être appliquées le plus vite possible.

Sauf pour les événements extrêmes, la pluviométrie n'a pas encore retrouvé son niveau des années humides; le quadruplement des débits des affluents de droite du Niger est à attribuer essentiellement aux changements d'usage des sols. Si la tendance actuelle se poursuit les inondations devraient donc encore s'aggraver.

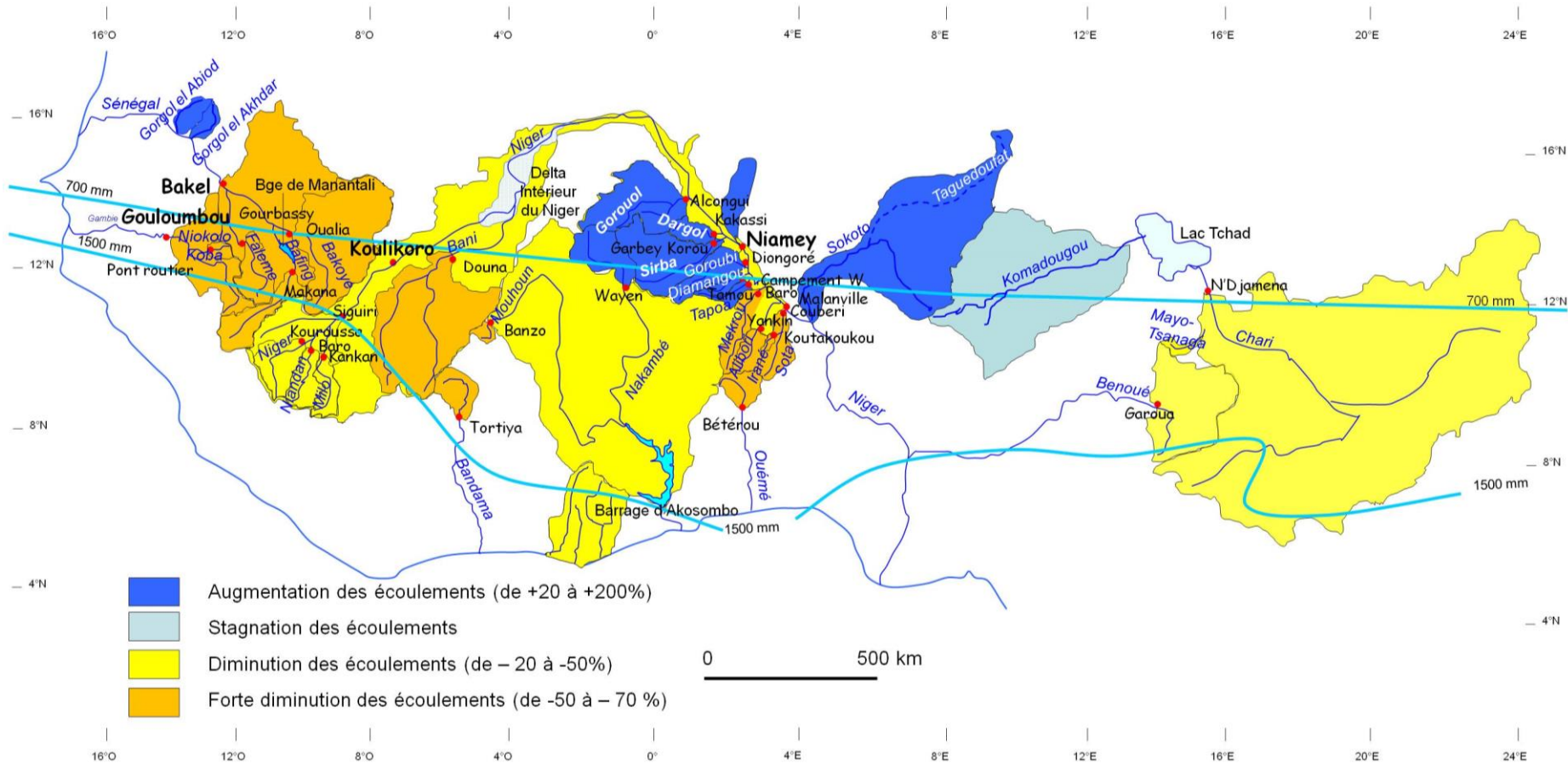
Remerciements : Nous remercions ici l'ANR (programmes ECLIS et ESCAPE) et le FSP PARRAF RHYVA, qui ont financé ces travaux de recherche, ainsi que l'ABN, l'OMVS, l'OMVG, la CBLT, la DGEAU du Bénin, l'ANACIM et les DMN, qui nous ont fourni les données hydrologiques et pluviométriques nécessaires. Un grand merci aussi aux deux réviseurs qui nous ont permis d'améliorer la qualité de ce manuscrit.

Références

- ❖ Aich, V., Liersch, S., Vetter, T., Andersson, J.C.M., Müller, E.N., Hattermann, F.F., 2015 Climate or Land Use?— Attribution of Changes in River Flooding in the Sahel Zone *Water* 2015, 7, 2796-2820; doi:10.3390/w7062796
- ❖ Albergel J. 1987. Sécheresse, désertification et ressources en eau de surface : application aux petits bassins du Burkina Faso. In *The Influence of Climate Change and Climatic Variability on the Hydrologic Regime and Water Resources*; IAHS publication N° 168, Wallingford, UK, 355-365.
- ❖ Albergel, J. et Valentin, C., 1988. « Sahélistation » d'un petit bassin versant soudanien : Kognéré-Boulsa au Burkina Faso. In : Bret, B., Ed. Les hommes face aux sécheresses, Nordeste brésilien-Sahel Africain. Paris : EST/IHEAL, coll. Travaux et Mémoires, 42 : 179-191.
- ❖ Amani, A., Nguetora, M., 2002. Evidence d'une modification du régime hydrologique du fleuve Niger à Niamey. In: Van Lannen, H., Demuth, S. (Eds.), FRIEND 2002 Regional Hydrology: Bridging the Gap Between Research and Practice. Proceedings of the FRIEND Conference, Cape Town, S.A., IAHS Pub. 274, pp. 449-456.
- ❖ Amogu O., Descroix L., Yéro K.S., Le Breton E., Mamadou I., Ali A., Vischel T., Bader J.-C., Moussa I.B., Gautier E., Boubkraoui S., Belleudy P., 2010. Increasing River Flows in the Sahel?. *Water*, 2(2):170-199.
- ❖ Amogu, O., Esteves, M., Descroix, L., Souley Yéro, K., Rajot, J-L., Malam Abdou, M., Boubkraoui, S., Lapetite, JM., Dessay, N., Zin, I., Vandervaere, J-P., Bachir A., Bouzou Moussa, I., Gautier, E., Le Breton, E., Mamadou, I., 2015. Runoff evolution according to land use change in a small Sahelian catchment. *Hydrol Science Journal*, 60:1, 78-95, DOI: 10.1080/02626667.2014.885654. Boyer, J-F., 2006. Manuel de prise en main, logiciel Khronostat, IRD laboratoire HSM, Montpellier.
- ❖ Callède, J., Ronchail, J., Guyot, J-L, De Oliveira, E., 2008. Déboisement amazonien : son influence sur le débit de l'Amazone à Óbidos (Brésil) » *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, vol. 21, n° 1,, p. 59-72.
- ❖ Cappus P., 1960. *Étude des lois de l'écoulement. Application au calcul et à la prévision des débits. Bassin expérimental d'Alrance. La Houille Blanche, No. A. Grenoble, France, 521-529.*
- ❖ Cassé, C., 2015. Impact du forçage pluviométrique sur les inondations du fleuve Niger à Niamey. Etude à partir de données satellitaires et in-situ. Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 260 p.
- ❖ Cassé, C. et Gosset, M., 2015. Analysis of hydrological changes and flood increase in Niamey based on the PERSIANN-CDR satellite rainfall estimate and hydrological simulations over the 1983-2013 period. *Proc. IAHS*, 370, 117-123.
- ❖ Cassé, C., Gosset, M., Peugeot, C., Pedinotti, V., Boone, A., Tanimoun, B.A., Decharme, B., 2015. Potential of satellite rainfall products to predict Niger River flood events in Niamey *Atmospheric Research* 163, 162-176
- ❖ Descroix, L., Laurent, J-P., Vauclin, M., Amogu, O., Boubkraoui, S., Ibrahim, B., Galle, S., Cappelaere, B., Bousquet, S., Mamadou, I., Le Breton, E., Lebel, T., Quantin, G., Ramier, D., Boulain, N. 2012a. Experimental evidence of deep infiltration under sandy flats and gullies in the Sahel. *Journal of Hydrology* 424-425, 1-15;

- ❖ Descroix L., Genthon P., Amogu O., Rajot J. -L., Sighomnou D., Vauclin M., 2012b. Change in Sahelian Rivers hydrograph: The case of recent red floods of the Niger River in the Niamey region. *Global Planetary Change*, 98-99, 18-30.
- ❖ Descroix, L., Diongue-Niang, A., Dacosta, H., Panthou, G., Quantin, G., Diedhiou, A., 2013a. Evolution des pluies extrêmes et recrudescence des crues au Sahel ; *Climatologie* 10, 37-49.
- ❖ Descroix, L., Bouzou Moussa, I., Genthon, P., Sighomnou, D., Mahé, G., Mamadou, I., Vandervaere, J-P., Gautier, E., Faran Maiga, O., Rajot, J-L., Malam Abdou, M., Dessay, N., Ingatan, A., Noma, M., Souley Yéro, K., Karambiri, H., Fensholt, R., Albergel, J., and Olivry, J-C., 2013b. Impact of Drought and Land – Use Changes on Surface –Water Quality and Quantity: The Sahelian Paradox. Hydrology, In Tech, Zagreb, Croatie. <http://dx.doi.org/10.5772/54536>.
- ❖ Diop, A., 2006. Dynamique de l'occupation du sol dans des Niayes de la région de Dakar de 1954 à 2003 : exemples de la grande niaye de Pikine et de la niaye de Yembeul. Université Cheikh Anta Diop de Dakar, mémoire de DEA, 112 p.
- ❖ Favreau, G., Leduc, C., 1998. Fluctuations à long terme de la nappe phréatique du Continental Terminal près de Niamey (Niger) entre 1956 et 1997. in : “Variabilité des ressources en eau en Afrique au XXème siècle”, conférence Abidjan '98, 1998. AISH Publ., 252,253-258.
- ❖ Favreau, G., Cappelaere, B., Massuel, S., Leblanc, M., Boucher, M., Boulain, N., Leduc, C. 2009. Land clearing, climate variability, and water resources increase in semiarid southwest Niger: A review. *Water Resources Research*, 45(7).
- ❖ Horton R.E., 1933. The role of infiltration in the hydrologic cycle. *EOS. American Geophysical Union Transactions* 14, 44-460.
- ❖ Hubert, P., Carbonnel, J-P. et Chaouche, A., 1989. Segmentation des séries hydrométéorologiques – applications à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *J. of Hydrol.*, 110 : 349-367.
- ❖ Hulme M., 2001. Climatic perspectives on Sahelian desiccation : 1973-1998. *Global Environmental Change* 11, 19-29.
- ❖ Lacombe, G., Pierret, A., Hoanh, C.T., Sengtaheuanghong, O., Noble, A.D., 2010. Conflict, migration and land-cover changes in Indochina: a hydrological assessment *Ecohydrol.* 3, 382-391.
- ❖ Lebel T., Diedhiou A., Laurent H., 2003. Seasonal cycle and interannual variability of the Sahelian rainfall at hydrological scales. *J. Geophys. Res.*, 108, 8839.
- ❖ Leblanc M., Favreau G., Massuel S., Tweed S., Loireau M., Cappelaere B., 2008. Land clearance and hydrological change in the Sahel: SW Niger. *Glo Pla Cha*, 61, 49-62.
- ❖ Leduc C., Bromley J., Shroeter P., 1997. Water table fluctuation and recharge in semi-arid climate: some results of the HAPEX Sahel hydrodynamic survey (Niger). *J. Hydrol.*, 188-189, 123-138.
- ❖ Leduc, C., Favreau, G., Shroeter, P., 2001. Long-term rise in a Sahelian water-table: the continental terminal in south-west Niger. *J. Hydrol.* 243, 43-54.
- ❖ Luxereau A. et Roussel, B. , 1997. Changements écologiques et sociaux au Niger, études africaines, L'Harmattan, 239 p.
- ❖ Mahé G., Leduc, C., Amani A., Paturol J-E., Girard S., Servat, E., Dezetter A., 2003. Augmentation récente du ruissellement de surface en région soudano sahélienne et impact sur les ressources en eau. In *Hydrology of the Mediterranean and Semi-Arid Regions, Proceedings of an International Symposium. Montpellier (France)*, 2003/04/1-4, Servat E., Najem W. , Leduc C., Shakeel A. (Ed.); Wallingford, UK, IAHS, 2003, publication n° 278, 215-222.
- ❖ Mahe, G., Paturol, J. E., Servat, E., Conway, D., & Dezetter, A. 2005. The impact of land use change on soil water holding capacity and river flow modelling in the Nakambe River, Burkina-Faso. *Journal of Hydrology*, 300(1), 33-43.
- ❖ Mahé G., Gioda A., 2009. Les données climatiques devraient devenir publiques. *Le Monde.fr* 21/12/09.
- ❖ Mahé G., Paturol J-E., 2009. 1896-2006 Sahelian rainfall variability and runoff increase of Sahelian rivers. *C.R. Geosciences*, 341, 538-546.
- ❖ Mahé, G., Lienou, G., Bamba, F., Paturol, J-E., Adeaga, O., Descroix, L., Mariko, A., Olivry, J-C., Sangaré, S., Ogilvie, A., Clanet, J-C., 2011. Le fleuve Niger et le changement climatique au cours des 100 dernières années. *Hydro-climatology variability and change (Proceedings of symposium held during IUGG 2011, Melbourne, Australia)*; IAHS pub. n° 344, 131-137.
- ❖ Mahé, G., Lienou, G., Descroix, L., Bamba, F., Paturol, J.E., Laraque, A., Meddi, M., Moukolo, N., Hbaieb, H., Adeaga, O., Dieulin, C., Kotti, F., Khomsi, K., 2013. The rivers of Africa: witness of climate change and human impact on the environment. *Hydrological Processes* 27, 2105-2114, DOI. 10.1002/hyp.9813
- ❖ Mamadou, I., Gautier, E., Descroix, L., Noma, I., Bouzou Moussa, I., Faran Maiga, O., Genthon, P., Amogu, O., Malam Abdou, M., et Vandervaere, J-P., 2015. Exorheism growth as an explanation of increasing flooding in the Sahel. *Catena*, 130:131-139.
- ❖ Maugis, P., Aguiar, L., Grenier C., 2009. Hydrogeological modeling as a tool supporting the interpretation of pollen proxies for palaeoclimate reconstruction: the Senegalese “Niayes” case-study. *C.R. Geoscience*, 341:8-9, 783-793. Olivry J-C., 2002. *Synthèse des connaissances hydrologiques et potentiel en ressources en eau du fleuve Niger*. World Bank, Niger Basin Authority, provisional report, 160 p, Niamey.
- ❖ Panthou, G., 2013. Analyse des extrêmes pluviométriques en Afrique de l'Ouest et de leur évolution au cours des 60 dernières années, Université de Grenoble, 350 p.
- ❖ Panthou, G., Vischel, T., Lebel, T., 2014. Recent trends in the regime of extreme rainfall in the Central Sahel. *International Journal of Climatology*. 34 : 3998-4006
- ❖ Séguis, L., Cappelaere, B., Peugeot, C., Leduc, C., Milesi, G. 2003. Influences de la sécheresse et du défrichement sur les écoulements d'un petit bassin sahélien. *IAHS PUBLICATION*, 429-434

Figure1 :



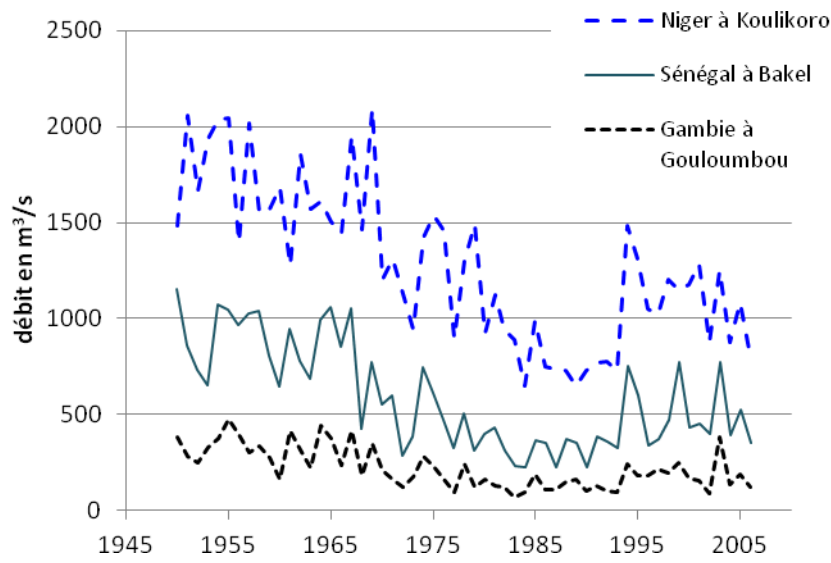


Figure 2

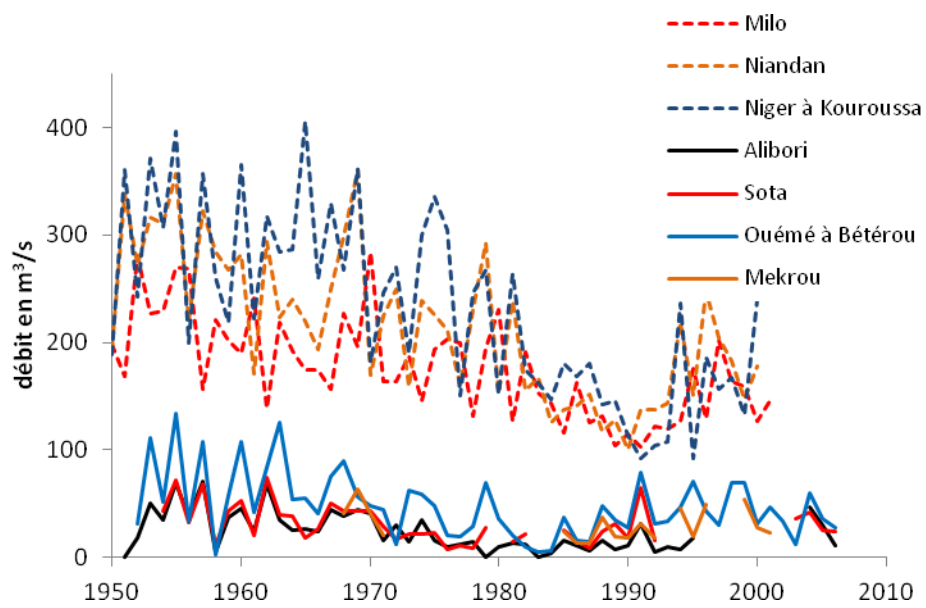


Figure 3

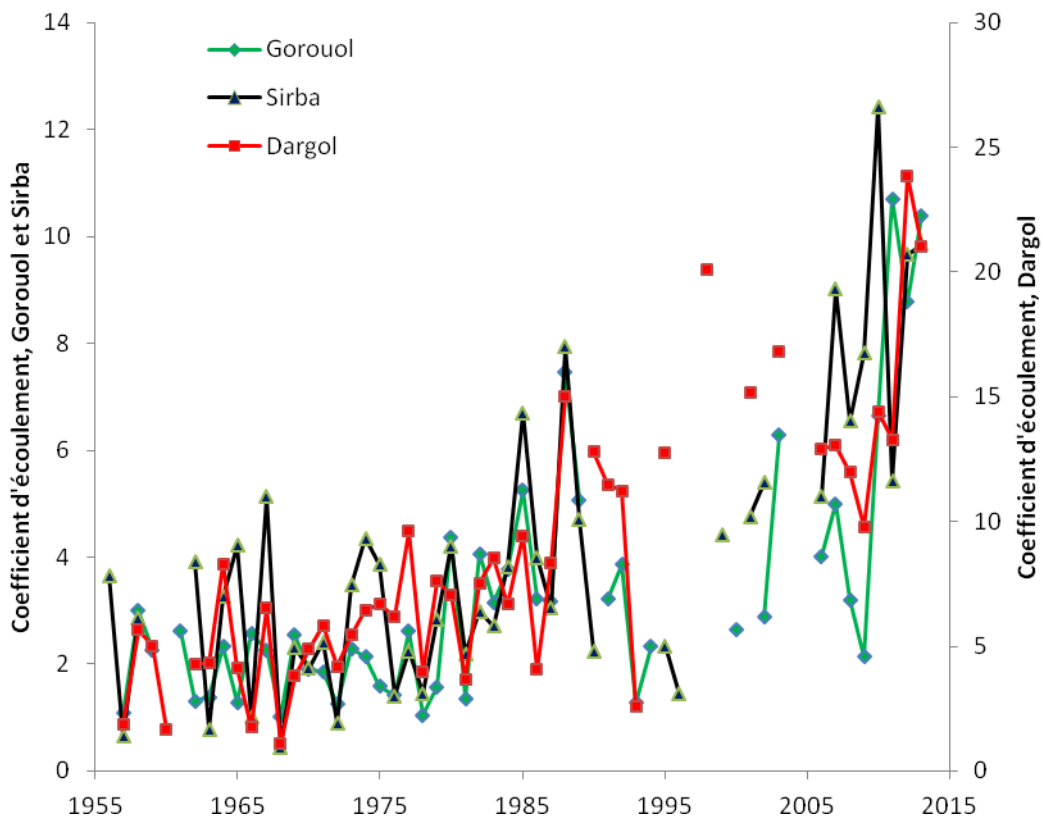


Figure 4

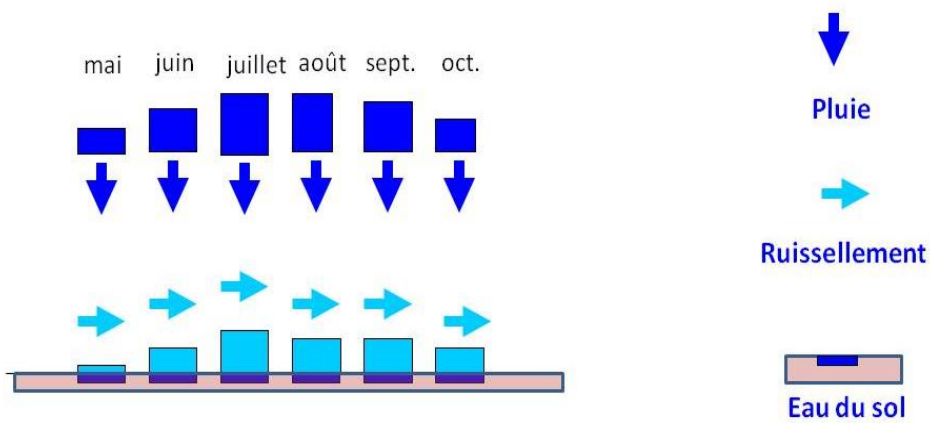


Figure 5

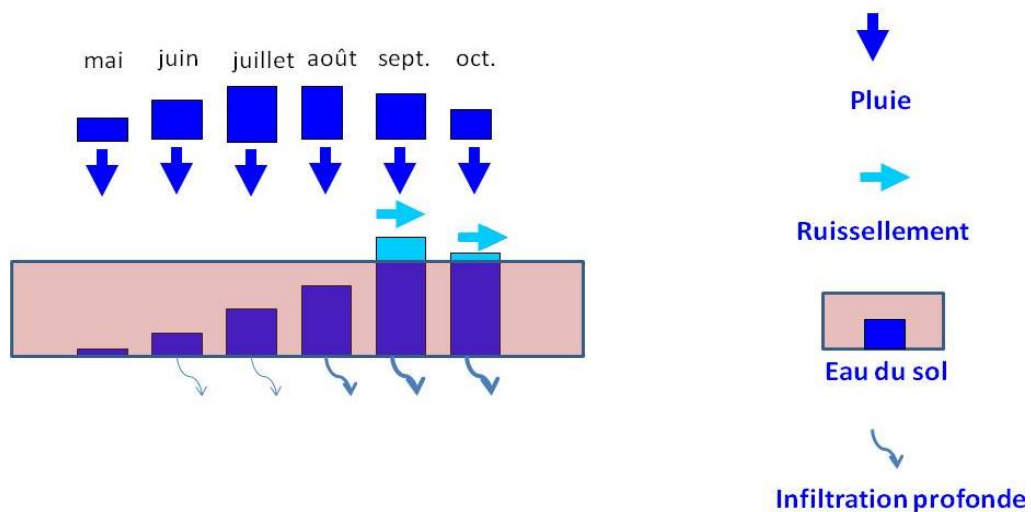


Figure 6

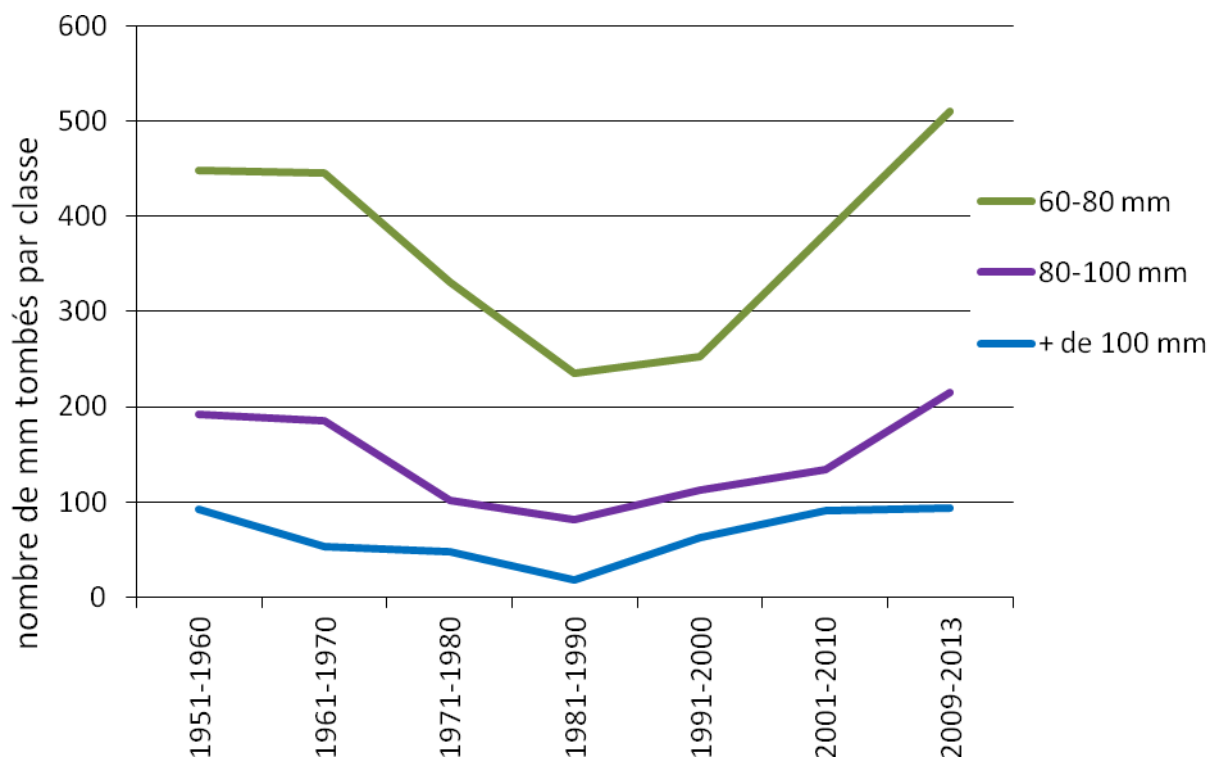


Figure 7

Matériel supplémentaire (à joindre dans une version en ligne ?)

SMI : Tableau : Ruptures et valeurs des séries statistiques des pluies et des débits pour trois grands fleuves d'Afrique de l'Ouest (d'après données de l'OMVG, OMVS et ABN)

1950-2006	segmentation Hubert	lame précipitée (mm)	Evolution par rapport à la période humide	lame écoulée (mm)	Evolution par rapport à la période humide	Coefficient d'écoulement
Gambie	1950-1967	1451	var/1950-1967	227	var/1950-1967	15,7
45200 km²	1968-2006	1056	-27%	114	-50%	10,8
Sénégal	1950-1967	1162	var/1950-1967	131	var/1950-1967	11,3
218000 km²	1968-2006	866	-25%	64	-52%	7,4
Niger*	1950-1967	1688	var/1950-1967	449	var/1950-1967	26,6
120000 km²	1968-2006	1267	-25%	274	-39%	21,7
Niger**	1950-1969	1657	var/1950-1969	449	var/1950-1969	27,1
	1970-1981	1289	-22%	323	-28%	25,1
	1982-1993	1189	-28%	204	-54%	17,2
	1994-2006	1301	-21%	294	-35%	22,6

* le logiciel Khronostat propose parfois plusieurs segmentations pour la même population, lorsque cela est pertinent, avec un nombre variable de segments; pour la segmentation en deux segments, et pour le Niger; la segmentation était autour d'une rupture en 1969 (donc 1950-1969; 1970-2006); nous avons indiqué les valeurs pour les segments 1950-1967 et 1968-2006 afin de rendre les valeurs du bassin du Niger plus facilement comparables avec celles des autres bassins. A noter que pour le Niger, si la coupure de la série des débits en deux se fait en 1969, celle des pluies se fait en 1967; une conséquence du temps de réponse du bassin et de ses capacités de stockage ?

Dans le tableau 1, on a regroupé les données de pluies, débits, coefficients d'écoulement suivant les périodes déterminées par une segmentation suivant méthode de Hubert (Hubert *et al*, 1989 ; Boyer, 2006). Pour le Niger, seule la période 1982-1993 connaît une baisse de débits aussi forte que les deux autres fleuves. Dans tous les cas, la baisse des débits est pratiquement deux fois plus forte que celle des précipitations.

SM2 : Figure: évolution des débits des trois affluents sahéliens de rive droite du fleuve Niger

