

Facteurs anthropiques et environnementaux de la recrudescence des inondations au Sahel

*Luc DESCROIX, Gil MAHÉ, Jean-Claude OLIVRY, Jean ALBERGEL, Bachir TANIMOUN,
Ilia AMADOU, Brehima COULIBALY, Ibrahim BOUZOU MOUSSA,
Oumarou FARAN MAIGA, Moussa MALAM ABDOU, Kadidiatou SOULEY YÉRO,
Ibrahim MAMADOU, Jean-Pierre VANDERVAERE, Emmanuèle GAUTIER,
Aida DIONGUE-NIANG, Honoré DACOSTA, Arona DIEDHIOU*

Introduction

L'hydrologie de la bande soudano-sahélienne a connu une évolution rapide ces dernières décennies. La région ouest-africaine a été l'objet de profonds changements climatiques et environnementaux qui ont profondément modifié le bilan ruissellement/infiltration/évapotranspiration et en conséquence les conditions de la formation des écoulements.

On peut résumer en quelques étapes clés les observations et avancées scientifiques qui ont permis de mieux cerner l'impact des changements environnementaux sur le cycle hydrologique. Durant les travaux de terrain menés pour sa thèse, ALBERGEL (1987) remarque que depuis le (et en dépit du) début de la sécheresse, les écoulements augmentent dans les bassins versants expérimentaux de l'Orstom au Burkina Faso situés en zone sahéenne, mais diminuent, plus logiquement, pour ceux situés dans la zone soudanienne. Quelques années plus tard, OLIVRY *et al.* (1993) et OLIVRY (2002) montrent que les débits du Haut Niger à Koulikoro (bassin versant de 120 000 km²) et de nombreux grands cours d'eau ouest-africains diminuent deux fois plus vite que les précipitations. Ceci sera corroboré pour l'ensemble de la région par MAHÉ *et al.* (2003, 2005, 2009, 2011, 2013) ainsi que par AMOGU *et al.* (2010) qui mettent en évidence la césure entre comportements « sahéen » (augmentation des écoulements en dépit de la sécheresse) et « soudano-guinéen » (diminution des écoulements plus forte que celle de la pluie). La mise en évidence de l'extension régionale de la hausse des écoulements depuis le début de la sécheresse a conduit à

parler de « paradoxe hydrologique du Sahel » (DESCROIX *et al.*, 2009 ; DESCROIX *et al.*, 2013 a). Entre-temps, CASENAVE et VALENTIN (1989) avaient mis en évidence la primauté du rôle des « états de surface » dans la formation du ruissellement, et LEDUC *et al.* (2001) avaient défini le « paradoxe de Niamey » : la hausse du niveau de la nappe phréatique depuis le début de la sécheresse, dans le degré carré de Niamey. Celle-ci est une conséquence indirecte de la hausse des écoulements (liée aux modifications des états de surface induites par les changements environnementaux...) ; elle n'est pour le moment avérée que pour l'aquifère du CT3 (Continental Terminal 3) dans cette zone de Niamey¹.

On peut donc opposer schématiquement :

– une zone soudano-guinéenne où le régime des écoulements n'a pas (encore ?) été modifié par les transformations de l'environnement. Le fonctionnement des sols et des bassins versants y est tel que le ruissellement ne s'y produit que lorsque le sol est saturé. La baisse des précipitations n'affecte pas la capacité de rétention en eau des sols, et la couverture végétale, même modifiée, reste dense et absorbe les mêmes quantités d'eau qu'auparavant ; seule la fraction d'eau de pluie qui est destinée au ruissellement est donc concernée par la baisse des précipitations. Cela explique que la baisse des écoulements soit plus forte que celle des précipitations ;

– une zone sahélienne où le ruissellement est dû, pour une part croissante, au refus d'infiltration, car une induration superficielle produit très vite la saturation des sols (par le haut donc) qui n'ont plus de capacité de rétention en eau. C'est cette perte d'infiltrabilité d'une partie des sols sahéliens qui est à l'origine du « paradoxe du Sahel ». La mise à nu des sols et le raccourcissement des jachères provoquent une dégradation des sols dont ALBERGEL et VALENTIN (1988), VALENTIN et BRESSON (1992) et AMBOUTA *et al.* (1996), entre autres, ont montré qu'elle était propice à leur encroûtement superficiel. Dans des secteurs nord-sahéliens où s'observe une reconquête végétale depuis la fin des périodes les plus déficitaires en pluie (milieu des années 1980), le sol ne peut se reconstituer dans les secteurs rocheux où il était squelettique et retenu par la végétation en place (HIERNAUX *et al.*, 2009 ; GARDELLE *et al.*, 2010).

Cette augmentation des débits des cours d'eau sahéliens, observée depuis le début de la sécheresse de l'Afrique de l'Ouest, semble s'exacerber avec la modeste remontée des totaux annuels de pluie enregistrée depuis le milieu de la décennie 1990 environ. On ne peut donc plus parler de situation paradoxale depuis la fin des années 1990 et cette remontée des précipitations ; celle-ci a logiquement encore accru le ruissellement. En effet, ces toutes dernières années, depuis le milieu de la décennie 2001-2010, on observe une accélération dans l'accroissement du volume des crues annuelles et une recrudescence des inondations en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne. (DESCROIX *et al.*, 2012 ; SIGHOMNOU *et al.*, 2013).

1. Une extension vers l'est du Niger, comportant la mesure de la hauteur de la nappe dans une demi-douzaine de sites supplémentaires sur la route de Zinder, où avaient lieu des tournées semestrielles, a été entamée en 2006 dans le cadre du programme Amma. Ces mesures ont été suspendues en 2008 à la demande des hydrogéologues d'Amma, mais, pendant trois ans (2005-2008), c'est *a minima* jusqu'à la longitude de Maradi que le niveau de l'aquifère remontait.

Ce chapitre prétend montrer comment, au-delà du paradoxe hydrologique du Sahel, des facteurs naturels et humains provoquent cette recrudescence des inondations dans cette région. On verra qu'une éventuelle intensification des précipitations n'est pas encore assez prononcée pour expliquer des débits bien plus élevés que durant les décennies « humides » 1950-1970. À l'inverse, l'urbanisation des zones inondables explique pourquoi les inondations sont plus graves qu'auparavant. Enfin l'augmentation du ruissellement accentue l'érosion déjà importante des sols sahéliens, et avec elle transports solides et sédimentation : ces éléments sont à l'origine des ruptures d'endoréisme (MAMADOU *et al.*, 2015) et de l'encombrement des lits des cours d'eau par le sable apporté des versants (AMOGU *et al.*, 2010), deux facteurs complémentaires de l'augmentation de la sévérité des inondations.

Une augmentation des débits ayant conduit à l'augmentation du risque de crues

On a pu montrer qu'une tendance de fond à l'accroissement des coefficients d'écoulement pouvait être attribuée aux changements d'usage des sols, en particulier à l'extension très significative des surfaces de sols encroûtés.

Tant dans les zones sud-soudaniennes (TSCHAKERT *et al.*, 2010), que dans les régions sahéliennes (TARHULE, 2005), un accroissement de l'occurrence des inondations a été souligné dans les dernières années. Dès 2005, Tarhule montrait en effet, à travers une étude de coupures de presse, que les inondations étaient en train de gagner en importance et en dégâts causés ; il a montré qu'au Niger, la distribution des inondations reportées par la presse était principalement liée à l'altitude et à la répartition spatiale de la population. Comme suite aux graves inondations qui ont touché le sud du Burkina, le nord du Togo et du Ghana en 2007, l'étude de TSCHAKERT *et al.* (2010) a montré la récurrence des inondations en Afrique de l'Ouest, phénomène trop négligé et à prendre désormais en considération.

Par ailleurs, DI BALDASSARE *et al.* (2010) ont montré que les inondations causaient des dégâts croissants en Afrique de l'Ouest ; ainsi les pertes humaines ont crû d'un ordre de grandeur depuis 1950, ce qui s'explique partiellement par la croissance démographique, en particulier urbaine, qui elle-même induit un fort accroissement de la vulnérabilité des sociétés.

Comme suite aux observations d'ALBERGEL (1987) et d'OLIVRY (2002), DESCROIX *et al.* (2012) et SIGHOMNOU *et al.* (2013) ont montré que les changements d'usage des sols et la fatigue de ceux-ci étaient l'explication principale de la hausse considérable des débits issus des bassins sahéliens et de l'occurrence des inondations. De fait, la figure 1 montre que les coefficients d'écoulement des bassins des affluents de rive

droite du Niger dans la région sahélienne ont triplé depuis le début de la sécheresse à la fin des années 1960. La figure 2 représente l'évolution interdécennale de la double crue annuelle du Niger à Niamey ; elle montre clairement l'évolution contraire :

– de la première crue, d'origine sahélienne, qui se produit au cours de l'hivernage, et est liée aux écoulements en lien avec les pluies de mousson, généralement de forte intensité (35 % des pluies tombent avec une intensité supérieure à 60 mm/h). Cette crue se produit de manière de plus en plus précoce ; la date de son occurrence à Niamey a avancé de 40 jours en une quarantaine d'années. Elle est par ailleurs de plus en plus individualisée par rapport à la seconde et principale crue, la crue guinéenne ;

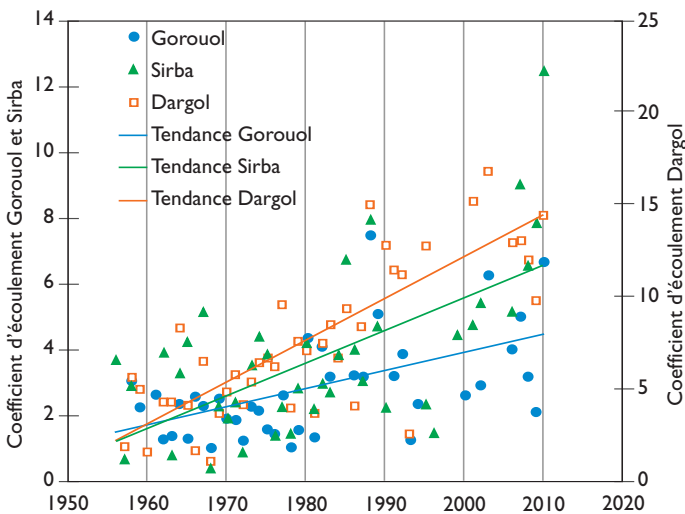


Figure 1.

Augmentation des coefficients d'écoulement des bassins des affluents sahéliens de rive droite du fleuve Niger.

– et de la seconde crue, appelée crue guinéenne, qui correspond à l'arrivée des écoulements générés par la même mousson dans le bassin amont, et qui ont mis plusieurs mois pour franchir les 2 000 kilomètres à parcourir depuis la Guinée, et surtout le delta intérieur du Niger, une vaste étendue de 120 000 km² de lacs et de marais dans laquelle le fleuve perd en moyenne chaque année la moitié de son débit. Après avoir considérablement baissé durant les décennies sèches (1970 à 1990), la pointe de cette crue a bien ré-augmenté depuis la décennie 1990, mais reste loin d'atteindre les volumes observés avant la sécheresse. Surtout, la crue principale reste plus courte de plus de deux mois par rapport aux décennies humides, comme conséquence de la très forte diminution des écoulements dans le bassin amont. En termes de ressource, c'est donc durant la saison sèche que les apports en eau ont été le plus affectés, l'étiage se produisant bien plus tôt qu'auparavant (fig. 2).

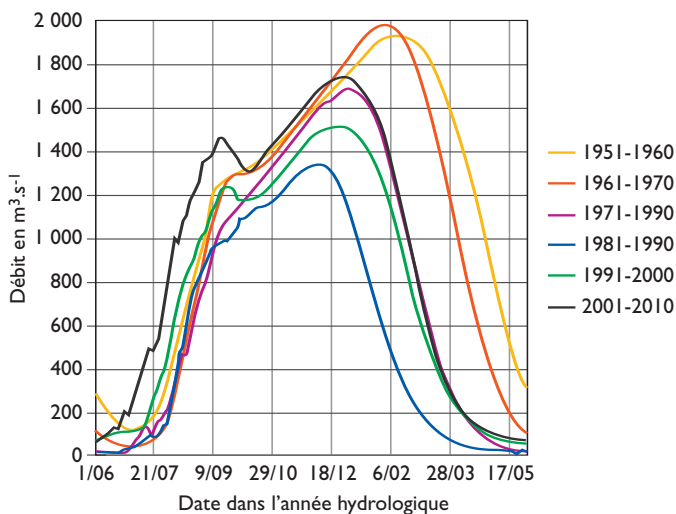


Figure 2.

Évolution interdécennale de l'hydrogramme du fleuve Niger à Niamey : précocité croissante de la première crue, diminution drastique de la durée de la seconde.

Les thèses récentes de AMOGU (2009), SOULEY YÉRO (2012) et de MALAM ABDOU (2014) ont confirmé l'importante contraction de la couverture végétale depuis quelques décennies, la première sur le bassin de la Sirba et du Gorouol (cf. fig. 3), la deuxième dans le degré carré de Niamey, la troisième dans le bassin du Dargol, ainsi que les conséquences à en attendre en termes de baisse de la capacité de rétention en eau des sols et des bassins et d'accroissement des coefficients d'écoulement. Ces travaux corroborent l'évolution de la couverture végétale à l'échelle régionale telle que mise en évidence par les cartes produites par FENSHOLT et RASMUSSEN (2011).

Un facteur climatique : la hausse du nombre de pluies de fort cumul

Toutefois, il semble que l'occurrence des événements de cumul pluviométrique élevé soit en hausse, ce qui contribuerait à expliquer la hausse des coefficients d'écoulement et des débits.

Pour vérifier cette hypothèse de travail, une étude statistique des pluies de fort cumul journalier a été réalisée dans deux secteurs de l'Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne : le Sénégal (DIONGUE *et al.*, soumis) et le bassin du fleuve Niger moyen (DESCROIX *et al.*, 2013 b). Les figures 3 et 4 montrent la localisation des deux secteurs d'étude situés à la même latitude.

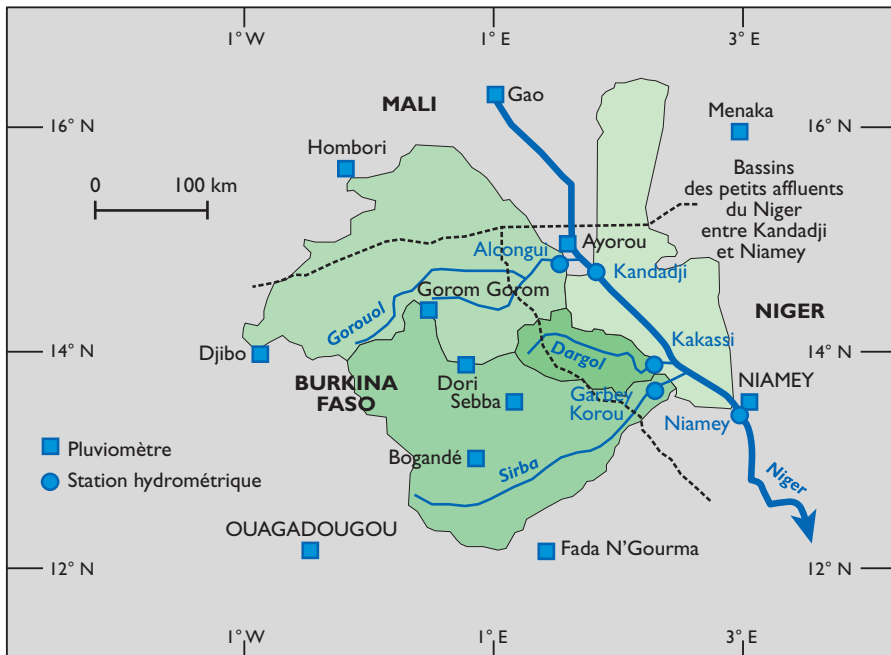
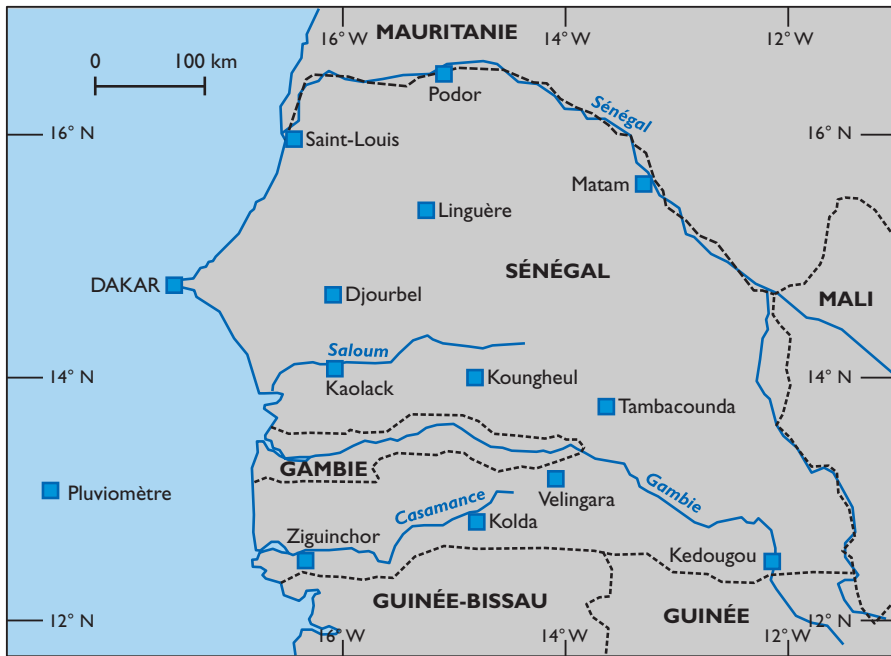


Figure 3.
Carte schématique du Sénégal (en haut) et du bassin du Niger moyen (en bas).

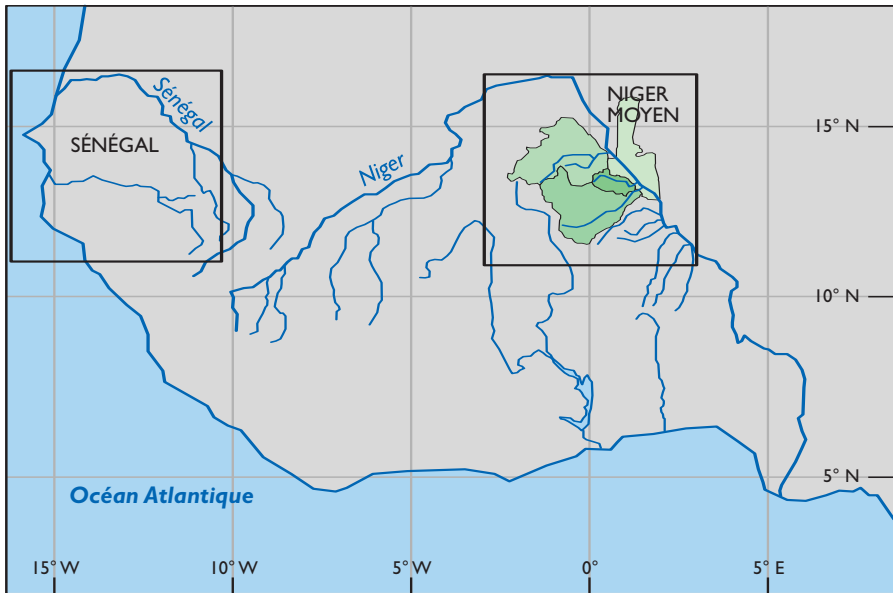


Figure 4.
Localisation du Sénégal et du bassin du Niger moyen, aux mêmes latitudes.

Les figures 5 et 6 montrent que le nombre d'événements de plus fort cumul est en hausse et se rapproche beaucoup, dans le bassin du Moyen Niger, de ses valeurs des décennies humides. C'est déjà le cas pour les événements de plus de 60 mm. On observe aussi une arrivée plus précoce de la crue, qui pourrait bien être liée à la conjonction de l'encroûtement des sols (cause anthropique) et de l'augmentation de

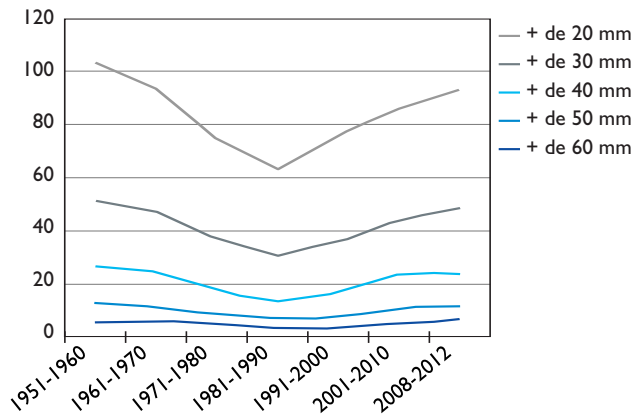


Figure 5.
Nombre d'événements par décennie et par classe de cumul précipité par événement, bassin du Niger moyen.

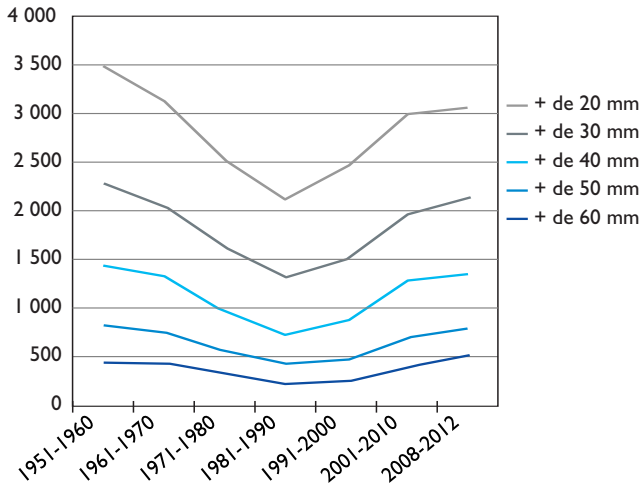


Figure 6.

Nombre de mm de pluie par an et par catégorie, bassin du Niger moyen.

l'occurrence des événements pluviométriques extrêmes (cause climatique à relier éventuellement au changement climatique en partie dû aux activités anthropiques), surtout en début de saison des pluies (mai et juin, et moins significativement sur juillet) (DESCROIX *et al.*, 2013 b). DIONGUE *et al.* (soumis) ont remarqué la même évolution sur le Sénégal. Toutefois, dans ce pays, malgré une forte croissance ces dernières années, le nombre d'événements de fort cumul (jusqu'à plus de 60 mm/jour) n'a pas encore atteint, pour aucune station ni aucune saison, les valeurs maximales observées dans les années 1950-1968.

Les figures 7 et 8 montrent cette tendance pour ce pays.

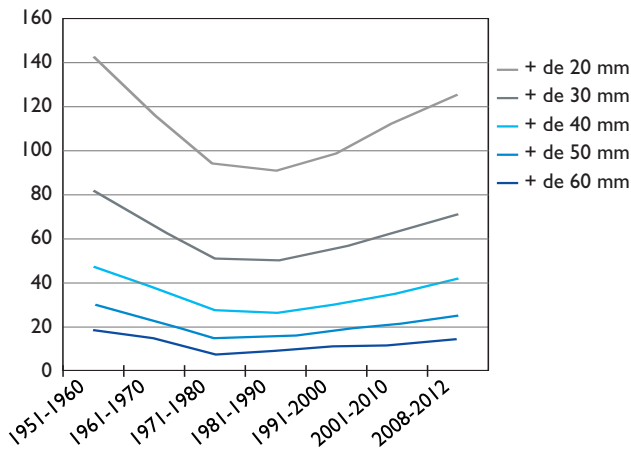


Figure 7.

Nombre d'événements par décennie et par classe de cumul précipité par événement, Sénégal.

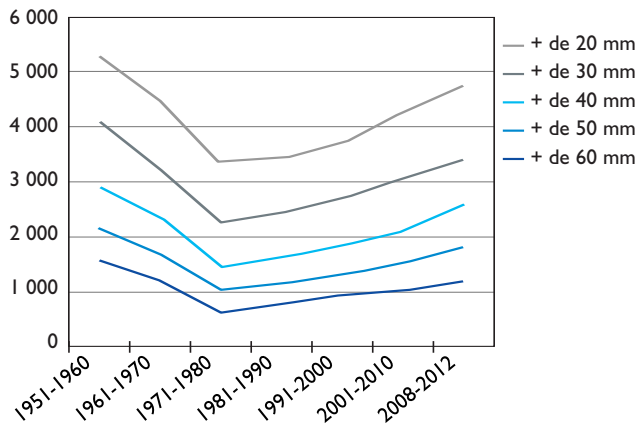


Figure 8.

Nombre de mm de pluie par an et par catégorie, Sénégal.

Enfin, PANTHOU (2013) a analysé les pluies journalières dans une fenêtre allant de 10° W à 5° E et de 10° à 15° N (englobant partiellement le bassin du Niger moyen cité ci-dessus), pour étudier l'évolution des précipitations extrêmes. Il a montré un accroissement récent du nombre d'événements pluviométriques « extrêmes » (en fait des événements de fort cumul pluviométrique) depuis le milieu des années 2001-2010. Par ailleurs, PANTHOU *et al.* (2013) ont mis en évidence la baisse du nombre de ces épisodes lors de la période de déficit pluviométrique, et sa remontée récente (voir en particulier chap. 2 Panthou *et al.*).

Une explication « urbaine »

L'urbanisation elle-même peut expliquer l'accroissement du risque d'inondation. Elle s'accompagne en effet des processus décrits ci-dessous.

L'imperméabilisation de l'espace urbain et péri-urbain

Celle-ci est le fait de l'essentiel des éléments « urbains », à savoir, chaussées, bâti, autres surfaces imperméabilisées, telles que trottoirs, parkings, terrains de sport, etc. Cette réduction des zones d'infiltration possible pour l'eau de pluie est un facteur d'accroissement notoire des coefficients d'écoulement. C'est ce qui est à l'origine de l'inondation des quartiers nord de la ville de Bamako le 28 août 2013 ; la pluie de 85 mm qui l'a occasionnée a un temps de retour de 3 ans, mais l'urbanisation incontrôlée des collines dominant le quartier de Banconi a provoqué la formation de débits qui ont entraîné de gros dégâts (fig. 9).



Figure 9.
Lit encombré de l'un des deux cours d'eau ayant débordé et inondé le quartier de Banconi à Bamako le 28 août 2013.



Figure 10.
Creusement des drains dont l'absence a provoqué l'inondation du quartier Ouest Foire à Dakar le 26 août 2012 (photo décembre 2013).

Toutefois, on a assisté ces dernières années à des inondations purement urbaines concernant des zones urbanisées depuis très longtemps et qui n'avaient pas, jusque-là, été inondées. C'est le cas, particulièrement, des événements survenus le 1^{er} septembre 2009 à Ouagadougou et le 26 août 2012 à Dakar (fig. 10). Dans les deux cas, les crues ayant causé ces inondations sont des crues purement urbaines. Il faut donc pour ces événements arguer de l'augmentation de l'occurrence de précipitations intenses (voir ci-dessus). En effet, ces dernières inondations ont concerné des villes sans cours d'eau, mais des secteurs déjà urbanisés depuis longtemps. Or les événements les plus intenses survenus ces dernières décennies n'avaient pas provoqué de tels écoulements et donc de tels dégâts.

L'urbanisation de secteurs inondables

L'autre grand impact de l'urbanisation est le fait de rendre vulnérables des populations qui ne l'étaient pas. En effet, si dans le cas de Bamako en 2013, c'est l'urbanisation qui explique au moins en partie la gravité des inondations, il est devenu plus fréquent de voir l'urbanisation sauvage se diriger vers les secteurs classés comme inconstructibles, dont par exemple les zones inondables. Comme le signalent DI BALDASSARE *et al.* (2010), l'augmentation de la population et la forte urbanisation des pays d'Afrique subsaharienne sont l'une des composantes principales de l'accroissement des pertes et du nombre des victimes des inondations. Dans le cas de la ville de Niamey, on a assisté à trois épisodes en quatre ans, ce qui dénote à la fois l'accroissement des débits et donc l'existence d'un risque accru, et celle de la vulnérabilité des populations qu'on a laissé s'installer en zone interdite inondable, faute pour les autorités d'avoir loti suffisamment d'espaces pour loger les nombreux nouveaux arrivants. Une étude de l'ABN (Autorité du bassin du Niger) (SIGHOMNOU *et al.*, 2012) montre les cartes d'inondations réalisées par cet organisme avec Agrhymet (le centre de formation en agronomie, hydrologie et météorologie du CILSS, situé à Niamey) : une grande proportion de la rive droite de Niamey inondée ces dernières années est en zone réputée inondable.

En 2010, le fleuve Niger a atteint sa plus forte cote de saison des pluies (rappelons – première partie ci-dessus – que la crue sahélienne est traditionnellement bien moins importante que la crue guinéenne). Cette cote n'avait du reste été dépassée que deux fois depuis le début des enregistrements en 1929 : durant la crue guinéenne de 1968, puis durant celle de 1970. De nombreux dégâts furent observés du fait de l'urbanisation spontanée d'un ancien bras du Niger, bien visible sur la figure 12 ; le débit avait alors atteint $2\,080\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$. En 2012, la crue a atteint par deux fois un débit jamais observé depuis 1929, toutes crues confondues. Par deux fois en effet, le débit a dépassé $2\,400\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ (max. $2\,480\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$). Les dégâts furent bien plus sévères encore, et une cinquantaine de victimes au moins furent à déplorer, sans compter les dizaines de milliers de sans-abri du fait de la destruction des maisons par les flots et de l'humectation du banco dont sont faites la plupart des habitations. Celles-ci se sont en grande partie effondrées, occasionnant de nombreuses victimes. La troisième crue, en 2013, fut presque aussi prononcée que celle de 2012, en tout cas bien plus haute que celle de 2010, ayant atteint un débit de $2\,420\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ au pic de la crue. Mais les dégâts furent bien plus limités, car la partie inondée en 2012 n'avait pas été réoccupée entre-temps.

Une accélération des processus hydrologiques et sédimentaires

Le cas particulier de la ville de Niamey est emblématique des transformations environnementales profondes que subit le Sahel depuis plusieurs décennies. On peut évoquer défrichements et fatigue des sols observés en amont, dans les bassins des affluents du fleuve Niger (voir la première partie) ; on sait qu'on assiste, depuis quelques années, à une recrudescence des événements pluvieux de fort cumul (voir la deuxième partie) ; enfin les inondations récentes ont concerné des quartiers bâtis souvent de manière spontanée dans des zones inondables, mais qui n'avaient pas été inondés depuis plusieurs décennies, du fait entre autres du déficit pluviométrique régional, ce qui a été évoqué en troisième partie.

Dans cette dernière partie, nous abordons deux processus hydrologiques et hydrographiques observés récemment : l'ensablement du lit des cours d'eau et l'extension de l'exoréisme.

L'ensablement du lit des cours d'eau (ici le fleuve Niger)

Il a pu conduire des crues dont le débit avait déjà été observé dans le passé sans inondation à déborder ces dernières années. En effet, la phase d'érosion des sols que connaît le Sahel depuis le début de la sécheresse a considérablement accru les transports solides. Les matériaux transportés ont tendance à se déposer dans le lit des cours d'eau (du Niger, quand il s'agit des koris, affluents directs de ce fleuve). On observe donc une réduction sensible de la section active du cours d'eau, ce qui provoque le débordement du fleuve pour des débits sensiblement plus faibles que ceux nécessaires auparavant. La figure 11 montre l'intrusion dans le lit du fleuve du cône affluent du Kourtéré, affluent de rive droite du Niger confluent juste en amont de Niamey, et sa progression au fil des ans, telle que rapportée par AMOGU *et al.* (2010), réduisant d'autant la section de son lit et rendant plus probable son débordement lors des crues importantes.

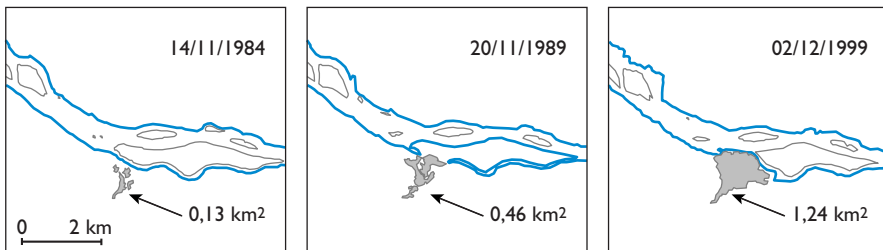


Figure 11.
Progression du cône de déjection du kori de Kourtéré de 1984 à 1999.

L'extension de l'exoréisme

Nul mieux que ce petit affluent (son bassin mesure 350 km²) n'illustre le processus d'extension de l'exoréisme, tel qu'on l'observe depuis quelques décennies dans la vallée du Niger moyen (MAMADOU *et al.*, 2015). En effet, CHINEN (1999) a montré que le bassin de ce kori était endoréique jusque dans les années 1950, et que c'est au plus tard en 1975 (d'après la photographie aérienne de l'IGNN) que le kori a percé le bourrelet sableux qui retenait la mare dans laquelle s'accumulaient ses écoulements. C'est seulement à ce moment-là que ce kori est devenu un affluent du Niger.

MAMADOU *et al.* (2015) ont par ailleurs montré récemment que les ruptures d'endoréisme avaient conduit, encore une fois sur le cours du Niger moyen, à un accroissement de la superficie du bassin actif du cours d'eau, contribuant, à coefficient d'écoulement égal, à accroître les débits à écouler. La figure 12 montre la localisation des ruptures observées ou supposées d'endoréisme qui se sont produites ces dernières décennies dans ce tronçon de la vallée du Niger.

Sans préjuger de celles qui pourraient exister ailleurs, on peut toutefois supposer que la région de Niamey en concentre un grand nombre du fait de la sévère dégradation du milieu qu'on y observe (CHINEN, 1999 ; AMOGU *et al.*, 2010 ; MAMADOU, 2012 ; MAMADOU *et al.*, 2015). En effet, aux défrichements inhérents à l'ensemble du

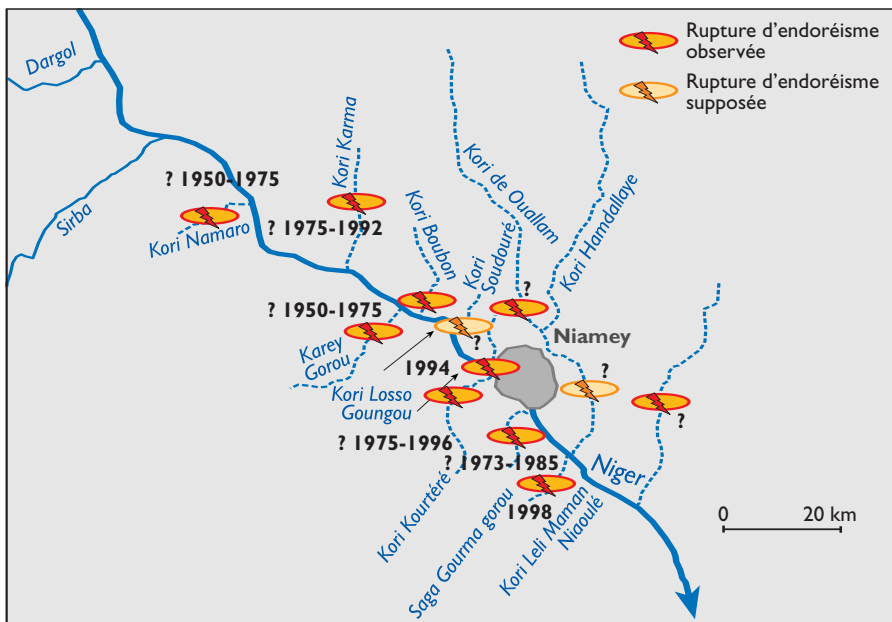


Figure 12.

Localisation de certains phénomènes de rupture d'endoréisme, ayant conduit à accroître la zone exoréique alimentant le fleuve Niger. Quand elle est connue, la date de la rupture d'endoréisme est indiquée.

Sahel, exacerbés ici car la population y est en croissance plus forte qu'ailleurs, s'ajoutent les défrichements liés à la demande urbaine en bois de cuisine et construction, ainsi que le surpâturage en lien avec la présence de nombreux troupeaux en attente d'accéder au marché urbain de la ville.

Une dynamique érosive et hydrique intense s'observe donc aux alentours de Niamey (mais BOUZOU MOUSSA *et al.* [2009] témoignent de tels processus aussi à 300 km à l'est de Niamey) ; elle est mise en évidence par les nouveaux koris (néo-exoréisme) visibles dans le paysage par les tranchées franches et fraîches laissées dans les dunes et sols sableux par ces formes récentes, ainsi que par les cônes de déjection importants et très actifs qui obstruent chaque jour plus le lit du fleuve Niger aux alentours de Niamey. Les surfaces encroûtées et ruisselantes y sont de plus en plus étendues, et les nouveaux petits affluents du Niger apportent à celui-ci de nouvelles aires très contributives, du fait des forts coefficients de ruissellement qu'on y observe. Ces observations faites sur le Niger moyen sont malheureusement vérifiées dans presque toute la bande soudano-sahélienne.

Conclusion

Les récentes inondations de 2007 (nord du Ghana et du Togo, sud du Burkina Faso), de 2009 (le 1^{er} septembre, Ouagadougou recevait 270 mm en moins de 24 heures, le même jour, l'oued Teloua rompait ses digues et inondait Agadès), les débordements répétés du fleuve Niger à Niamey (en 2010, 2012, 2013), les inondations de Dakar (le 26 août 2012, la ville recevait la deuxième plus forte pluie en 24 heures depuis le début des enregistrements, mais la plus forte en intensité horaire) et de Bamako (le 28 août 2013) semblent témoigner d'un accroissement du risque d'inondation en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne. On sait depuis l'expérience Amma que les changements d'usage des sols sont l'élément moteur principal du « paradoxe hydrologique du Sahel ». Mais des éléments plus ou moins récents viennent aggraver ce processus :

- on assiste à un accroissement de l'occurrence des épisodes pluvieux de fort cumul, que ce soit à l'ouest (Sénégal) ou au centre du Sahel (bassin du Niger moyen) ;
- l'urbanisation, par l'imperméabilisation des surfaces réceptrices qu'elle entraîne à son tour, accroît les coefficients de ruissellement et peut expliquer la formation de forts courants urbains ;
- par ailleurs l'urbanisation incontrôlée d'espaces de plus en plus étendus aggrave l'effet des inondations, rendant les populations, et en particulier les populations les plus pauvres, très vulnérables au risque inondation ;
- la puissance des crues, en particulier celles issues des zones sahéliennes, peuvent être accrues par l'extension en cours de l'exoréisme, des secteurs historiquement endoréiques devenant exoréiques par suite de ruptures de cordons sableux et déversements des mares ;

– enfin, l'érosion accrue des secteurs sahéliens, et en particulier les ruptures d'endoréisme, provoquent la formation rapide de vastes cônes de déjection dans le lit des grands fleuves, diminuant la section de ceux-ci, facilitant les débordements et les inondations.

Les preneurs de décision doivent prendre en compte ces multiples facteurs, car tous semblent suivre des tendances lourdes et pourraient rendre la gestion des écoulements extrêmement délicate dans les zones sahéliennes, plus particulièrement dans les zones urbanisées.

Scientifiques et décideurs ont centré leur attention sur le long épisode de sécheresse qu'a connu l'Afrique de l'ouest, sans qu'on sache s'il est vraiment fini. Mais le risque de crue n'a cessé, durant ces années de déficit, de s'exacerber au point que la hausse relative et récente des précipitations annuelles pourrait le rendre dramatique

Remerciements

Ce travail a été rendu possible grâce à l'appui du projet « Niger-Hycos » de l'Autorité du bassin du Niger à Niamey (ABN ; "<http://nigerhycos.abn.ne/user-anon/htm/listStationByGroup.php>" "<http://nigerhycos.abn.ne/user-anon/htm/listStationByGroup.php>), des services hydrologiques nationaux du Mali, du Burkina Faso et du Niger qui nous ont fourni les données de débit du Niger. Nos remerciements vont également à nos collègues des Directions nationales des météorologies de ces mêmes pays, ainsi que l'Anacim du Sénégal, les animateurs du réseau Friend, ainsi que ceux de Amma-Mali et Amma-Niger pour les données météorologiques. Les données du Sierem nous ont été fournies par A. l'Aour-Crès, N. Rouché et C. Dieulin (IRD-HSM). Outre l'AFD qui finance la collecte des données hydrométriques de Niger-Hycos, ce travail a été financé par les programmes ANR Eclis et ANR-10-CEPL-005 Escape, ainsi que par la JEAI (Jeune Équipe associée à l'IRD) « Savane parc à long terme », animée par le département de géographie de l'université de Niamey.

Références

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*, Wallingford, UK, IAHS publication, 168 : 355-365.

ALBERGEL J., VALENTIN C., 1988

« "Sahélisation" d'un petit bassin versant soudanien : Kognéré-Boulsa au Burkina Faso ». In Bret B. (éd.) : *Les hommes face aux sécheresses, Nordeste brésilien-Sahel africain*. Paris, EST/Iheal, coll. Travaux et Mémoires, 42 : 179-191.

AMBOUTA J. M. K., VALENTIN C.,

LAVERDIÈRE M. R., 1996

Jachères et croûtes d'érosion au Sahel. *Sécheresse*, 7 : 269-275.

AMOGU O., 2009

La dégradation des espaces sahéliens et ses conséquences sur l'alluvionnement du lit du fleuve Niger.

Thèse, UJF Grenoble, 360 p.

AMOGU O., DESCROIX L., YÉRO K. S.,

LE BRETON E., MAMADOU I., ALI A.,

VISCHEL T., BADER J.-C.,

BOUZOU MOUSSA I. B., GAUTIER E.,

BOUBKRAOUI S., BELLEUDY P., 2010

Increasing River Flows in the Sahel? *Water*, 2 (2) : 170-199.

BOUZOU MOUSSA I., FARAN MAIGA O., AMBOUTA J. M. K., SARR B., DESCROIX L., MOUSTAPHA ADAMOU M., 2009

Les conséquences géomorphologiques de l'occupation du sol et des changements climatiques dans un bassin versant rural sahélien. *Sécheresse*, 20 (1) : 1-8.

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*, A, Grenoble, France : 521-529.

CASENAVE A., VALENTIN C., 1989

Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration.

Paris, Orstom, coll. Didactiques, 224 p.

CHINEN T., 1999

« Recent accelerated gully erosion and its effects in dry savanna. southwest of Niger ». In : *Human Response to Drastic Changes of Environments in Africa*, Hirahata, Ryugasaki, Japan, Faculty of Economics, Ryutsu Keizai University publication, 120 : 67-102.

DESCROIX L., MAHÉ G.,

LEBEL T., FAVREAU G., GALLE S.,

GAUTIER E., OLIVRY J.-C.,

ALBERGEL J., AMOGU O.,

CAPPELAERE B., DESSOUASSI R.,

DIEDHIOU A., LE BRETON E.,

MAMADOU I. SIGHOMNOU D., 2009

Spatio-Temporal Variability of Hydrological Regimes Around the Boundaries between Sahelian and Sudanian Areas of West Africa: A Synthesis. *Journal of Hydrology, Amma special issue*, 375 : 90-102.

doi: 10.1016/j.jhydrol.2008.12.012

DESCROIX L., GENTHON P.,

AMOGU O., RAJOT J.-L., SIGHOMNOU D.,

VAUCLIN M., 2012

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., 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.,

OLIVRY J.-C., 2013 a

« 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

DESCROIX L., DIONGUE-NIANG A.,

DACOSTA H., PANTHOU G., QUANTIN G.,

DIEDHIOU A., 2013 b

Évolution des pluies extrêmes

et recrudescence des crues au Sahel.

Climatologie, 10 : 37-49..

DI BALDASSARRE G., MONTANARI A., LINS H., KOUTSOYIANNIS D., BRANDIMARTE L. BLÖSCH G., 2010

Flood fatalities in Africa: From diagnosis to mitigation. *Geophysical Research Letters*, 37, L22402, doi:10.1029/2010GL045467.

DIONGUE NIANG A., DACOSTA H., DIEDHIOU T., QUANTIN G., PANTHOU G., BOUZOU MOUSSA I., VANDERVAERE J.-P., DIEDHIOU A., DESCROIX L.,

L'inondation de Dakar en août 2012 : vers une recrudescence des inondations urbaines au Sahel ?
Soumis à *La Houille Blanche*.

FENSHOLT R., RASMUSSEN K., 2011
Analysis of trends in the Sahelian 'rain-use efficiency' using GIMMS NDVI, RFE and GPCP rainfall data. *Remote Sensing of Environment*, 115 : 438-451. doi:10.1016/j.rse.2010.09.014

GARDELLE J., HIERNAUX P., KERGOAT L., GRIPPA M., 2010

Less rain, more water in ponds: a remote sensing study of the dynamics of surface waters from 1950 to present in pastoral Sahel. (Gourma region, Mali). *Hydro. Earth Syst. Sci.*, 14 : 309-324.

HORTON R. E., 1933
The role of infiltration in the hydrologic cycle. *EOS. American Geophysical Union Transactions*, 14 : 44-460.

HIERNAUX P., MOUGIN E., DIARRA L., SOUMAGUEL N., LAVENU F., TRACOL Y., DIAWARA M., 2009

Sahelian Rangeland response to changes in rainfall over two decades in the Gourma, Mali. *J. Hydrol.*, 375 (1-2) : 114-127, doi:10.1016/j.jhydrol.2008.11.005, 2009 b.

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.

MAHÉ G., LEDUC C., AMANI A., PATUREL 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 Servat E., Najem W., Leduc C., Shakeel A. (eds) : *Hydrology of the Mediterranean and Semi-Arid Regions, proceedings*

of an international symposium. Montpellier (France), Wallingford, UK, IAHS publication, 278 : 215-222.

MAHÉ G., PATUREL J.-E., SERVAT E., CONWAY D., DEZETTER A., 2005

Impact of land use change on soil water holding capacity and river modelling of the Nakambe River in Burkina-Faso. *J. Hydrol.*, 300 : 33-43.

MAHÉ G., PATUREL J.-E., 2009
1896-2006 Sahelian annual rainfall variability and runoff increase of Sahelian rivers. *C. R. Geosciences*, 341 : 538-546.

MAHÉ G., LIENOU G., BAMBA F., PATUREL J. E., ADEAGA O., DESCROIX L., MARIKO A., OLIVRY J. C., SANGARE S., 2011

« Niger river and climate change over 100 years ». In Franks S. W., Boegh E., Blyth E., Hannah D. M., Yilmaz K. K. (eds) : *Hydro-climatology: Variability and Change*, Proceedings of symposium J-H02 held during IUGG2011 in Melbourne, Australia, *IAHS Pub.*, 344 : 131-137.

MAHÉ G., LIENOU G., DESCROIX L., BAMBA F., PATUREL 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 (15) : 2105-2114. HYP-12-0792.R2. doi: 10.1002/hyp981

MALAM ABDOU M., 2014
États de surface et fonctionnement hydrodynamique multi-échelles des bassins sahéliens ; études expérimentales en zones cristalline et sédimentaire.
Thèse, UJF Grenoble/UAM, 260 p.

MAMADOU I., 2012
La dynamique des koris et l'ensablement de leur lit et de celui du fleuve Niger dans la région de Niamey.
Thèse, université Paris 1/UAM, 280 p.

MAMADOU I., GAUTIER E., DESCROIX L., NOMA I., BOUZOU MOUSSA I., FARAN MAIGA O., GENTHON P., AMOGO O., MALAM ABDOU M., VANDERVAERE J.-P., 2015

Exorheism growth as an explanation of increasing flooding in the Sahel. *Catena*, 130 :131-139.

OLIVRY J. C., 2002

Synthèse des connaissances hydrologiques et potentiel en ressources en eau du fleuve Niger. Niamey, World Bank, Niger Basin Authority, provisional report, 160 p.

OLIVRY J. C., BRICQUET J. P., MAHÉ G., 1993

Vers un appauvrissement durable des ressources en eau de l'Afrique humide ?
Proceedings of the Symposium « Hydrology of Warm Humid Regions », IAHS Sc. Assembly Yokohama. *IAHS*, 216 : 66-78.

PANTHOU G., 2013

Analyse des extrêmes pluviométriques en Afrique de l'Ouest et de leur évolution au cours des 60 dernières années. Thèse, UJF-Grenoble, 230 p.

PANTHOU G., VISCHÉL T., LEBEL T., 2013

From pointwise testing to a regional vision: an integrated statistical approach to detect non stationarity in extreme daily rainfall. Application to the Sahelian region. *Journal of Geophysical Research*, 118 : 8222-8237.

SIGHOMNOU D., TANIMOUN B., ALIO A., ZOMODO L., ILIA A., OLOMODA I., COULIBALY B., KONÉ S., ZINSOU D., DESSOUASSI R., 2012

Crue exceptionnelle et inondations au cours des mois d'août et septembre 2012 dans le Niger moyen et inférieur. Note technique de l'ABN (Autorité du bassin du Niger), 11 p.

SIGHOMNOU D., DESCROIX L., GENTHON P., MAHÉ G., BOUZOU MOUSSA I., GAUTIER E., MAMADOU I., VANDERVAERE J.-P., BACHIR T., COULIBALY B., RAJOT J. L., MALAM ISSA O., MALAM ABDOU M., DESSAY N., DELAITRE E., MAIGA O. F., DIEDHIOU A., PANTHOU G., VISCHÉL T., YACOUBA H., KARAMBIRI H., PATUREL J.-E., DIELO P., MOUGIN E., KERGOAT L., HIERNAUX P., 2013

La crue de 2012 à Niamey : un paroxysme du paradoxe du Sahel ?
Sécheresse, 24 : 1-11.
doi : 10.1684/sec.2013.0370.

SOULEY YÉRO K., 2012

L'évolution du changement d'usage des sols au Sahel et ses conséquences hydrologiques. Thèse, UJF Grenoble, 250 p.

TARHULE A., 2005

Damaging rainfall and floodings: the other Sahel hazards.
Climatic Change, 72 : 355-377.
doi: 10.1007/s10584-005-6792-4.

TSCHAKERT P., SAGOE R., OFORI-DARKO G., CODJOE S. M., 2010

Floods in the Sahel: an analysis of anomalies, memory, and participatory learning.
Climatic Change, 103 : 471-502.
doi: 10.1007/s10584-009-9776-y.

VALENTIN C., BRESSON L. M., 1992

Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils.
Geoderma, 55 : 225-245.

Descroix Luc, Mahé Gil, Olivry J.C., Albergel Jean, Tanimoun B., Amadou I., Coulibaly B., Bouzou Moussa I., Faran Maiga O., Malam Abdou M., Souley Yéro K., Mamadou I., Vandervaere J.P., Gautier E., Diongue-Niang A., Dacosta H., Diedhiou Arona.

Facteurs anthropiques et environnementaux de la recrudescence des inondations au Sahel.

In : Sultan Benjamin (ed.), Lalou Richard (ed.), Amadou Sanni M. (ed.), Oumarou A. (ed.), Soumaré M.A. (ed.). Les sociétés rurales face aux changements climatiques et environnementaux en Afrique de l'Ouest.

Marseille : IRD, 2015, p. 153-170. (Synthèses). ISBN 978-2-7099-2146-6