



HAL
open science

La crue de 2012 à Niamey : un paroxysme du paradoxe du Sahel ?

Daniel Sighomnou, Luc Descroix, Pierre Genthon, Gil Mahe, Ibrahim Bouzou Moussa, E. Gautier, Ibrahim Mamadou, Jean-Pierre Vandervaere, Tanimoun Bachir, Bréhima Coulibaly, et al.

► To cite this version:

Daniel Sighomnou, Luc Descroix, Pierre Genthon, Gil Mahe, Ibrahim Bouzou Moussa, et al.. La crue de 2012 à Niamey : un paroxysme du paradoxe du Sahel ?. Science et changements planétaires / Sécheresse, 2013, 24 (1), pp.3-13. 10.1684/sec.2013.0370 . ird-02153190

HAL Id: ird-02153190

<https://ird.hal.science/ird-02153190v1>

Submitted on 12 Jun 2019

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.

La crue de 2012 à Niamey : un paroxysme du paradoxe du Sahel ?

Daniel Sighomnou¹

Luc Descroix
Pierre Genthon
Gil Mahé
Ibrahim Bouzou Moussa
Emmanuèle Gautier
Ibrahim Mamadou
Jean-Pierre Vandervaere
Tanimoun Bachir
Bréhima Coulibaly
Jean-Louis Rajot
Oumarou Malam Issa
Moussa Malam Abdou
Nadine Dessay
Eric Delaitre
Oumarou Faran Maiga
Arona Diedhiou
Gérémy Panthou
Théo Vischel
Hamma Yacouba
Harouna Karambiri
Jean-Emmanuel Paturel
Pierre Diello
Eric Mougine
Laurent Kergoat
Pierre Hiernaux

¹ABN, BP 729, Niamey, Niger
<danielsighomnou@yahoo.fr>
<luc.descroix@ird.fr>
<pierre.genthon@ird.fr>
<gil.mahe@ird.fr>
<ibrahimbouzoumoussa@gmail.com>
<emmanuele.gautier@cnsr-belleuve.fr>
<imadou_ib@yahoo.fr>

Tirés à part : D. Sighomnou

Résumé

Le fleuve Niger a connu lors de la mousson 2012 sa plus forte crue jamais enregistrée à Niamey, et une inondation de vastes secteurs y compris dans la capitale du Niger. À une tendance de fond à l'augmentation des coefficients de ruissellement en zone sahélienne, liée à l'encroûtement des sols, s'est ajoutée une pluviométrie exceptionnelle (la plus forte depuis le début de la sécheresse du Sahel en 1968). Les dégâts ont été très importants, et cet événement doit faire prendre conscience aux décideurs de l'augmentation des écoulements qui a pour corollaire l'accroissement du risque d'inondation.

Mots clés : coefficient de ruissellement, crue rouge, encroûtement des sols, pluies extrêmes, Niger.

Abstract

The Niger River Niamey flood of 2012: The paroxysm of the Sahelian paradox?

During the 2012 monsoon, the Middle Niger River exhibited the highest flood ever registered from the beginning of its monitoring in 1929. Large areas were flooded, including parts of the city of Niamey. This flooding was due to the combination of an increase in runoff coefficient observed in the Sahelian basin, linked to soil crusting, and an exceptionally high amount of rainfall. Indeed, it was the highest observed since the beginning of the drought in 1968. Due to the level of damage, policy makers should be made aware of the increase in discharges, which is increasing the risk of flooding.

Key words: crusted soils, extreme rainfall events, Niger, red flood, runoff coefficient.

En août 2012, le fleuve Niger a connu une crue exceptionnelle dans le bassin du Niger moyen. Plusieurs épisodes pluvieux parfois exceptionnels se sont succédé dans ce bassin et notamment sur le bassin-versant des affluents burkinabés. Elle a provoqué de très graves inondations dans la région

de Niamey. L'Autorité du bassin du Niger (ABN) qui coordonne les activités de suivi du fleuve, doit éclairer les décisions à prendre, tant au niveau régional que dans les pays concernés. Le bilan humain est terrible puisque 81 personnes ont perdu la vie au Niger ; les dégâts matériels sont énormes. Cette crue fait

Pour citer cet article : Sighomnou D, Descroix L, Genthon P, Mahé G, Bouzou Moussa I, Gautier E, Mamadou I, Vandervaere JP, Bachir T, Coulibaly B, Rajot JL, Malam Issa O, Malam Abdou M, Dessay N, Delaitre E, Maiga OF, Diedhiou A, Panthou G, Vischel T, Yacouba H, Karambiri H, Paturel JE, Diello P, Mougine E, Kergoat L, Hiernaux P, 2013. La crue de 2012 à Niamey : un paroxysme du paradoxe du Sahel ? *Sécheresse* 24 : 3-13. doi : 10.1684/sec.2013.0370

<jean-pierre.vandervaere@ujf-grenoble.fr>
<bat_alkalao@yahoo.com>
<bremacoul@yahoo.fr>
<jeanlouis.rajot@ird.fr>
<oumarou.malam-issa@univ-reims.fr>
<malanmoussa@gmail.com>
<nadine.dessay@teledetection.fr>
<eric.delaitre@ird.fr>
<faranmaigaoumarou@yahoo.fr>
<arona.diedhiou@ird.fr>
<geremy.panthou@ujf-grenoble.fr>
<theo.vischel@ujf-grenoble.fr>
<hamma.yacouba@2ie-edu.org>
<harouna.karambiri@2ie-edu.org>
<jean-emmanuel.paturel@ird.fr>
<bonadiel@yahoo.com>
<mouginbassignac@aol.com>
<laurent.kergoat@get.obs-mip.fr>
<pierre.hiernaut@get.obs-mip.fr>

partie d'une série d'événements récents, laissant entrevoir une recrudescence du risque d'inondation malgré la persistance de conditions pluviométriques plutôt déficitaires sur toute l'Afrique de l'Ouest ; elle semble témoigner d'un changement hydrologique en cours qu'il convient d'étudier.

Le but de cet article est d'analyser l'évolution des relations pluie – débit sur le bassin du Niger et ses causes, en particulier dans sa partie sahélienne, et d'étudier leur impact sur la modification du régime et du débit des cours d'eau.

Le contexte

Le fleuve Niger moyen (en aval du delta intérieur, *figures 1 et 2*) a toujours eu deux crues. La première, dite « crue locale » (ou crue rouge, elle doit sa couleur à sa forte charge solide venant de sols latéritiques), intervient en général pendant les mois d'août à septembre. Elle résulte des apports de plusieurs affluents dans cette partie du fleuve, dont principalement les affluents de la rive droite en amont de Niamey (Gorouol, Dargol et Sirba), qui prennent leur source au Burkina Faso. La superposition des eaux de crue de ces cours d'eau aux régimes torrentiels à celles du cours principal du Niger conduit à une évolution de l'hydrogramme en dents de scie, au gré des précipitations locales. Mais les hydrogrammes décennaux montrent une montée progressive vers les plus hautes eaux de la seconde crue. La seconde crue, beaucoup plus importante en volume et à pointe unique, est appelée « crue guinéenne » (ou crue noire). Elle résulte des eaux provenant de la partie amont du bassin du fleuve (Guinée et Mali) et se produit au cours de la période allant de novembre à mars.

Au moment de la crue d'août 2012, venait de paraître un article sur la crue de 2010, qui était déjà la plus forte « crue rouge » jamais observée depuis 1929 et le début des enregistrements à la station de Niamey (Descroix *et al.*, 2012b). Elle appartient à un nouveau type de crues lié aux changements de régime des cours d'eau et se produisant lors d'années pluviométriques moyennes. On a pu montrer que les changements d'usage des sols en étaient en grande partie responsables. Le risque de crue a de plus fait l'objet de publications récentes, que ce soit sur le Sahel (Tarhule, 2005 ; Di Baldassarre *et al.*, 2010) ou dans les zones soudanaises (Tschakert *et al.*, 2010).

Les scientifiques ont été alertés par l'étendue et la durée des inondations de la mousson 2007, qui ont touché la zone soudanienne, le nord du Togo et du Ghana et le sud du Burkina Faso (Tschakert *et al.*, 2010). On a observé ensuite, le 1^{er} septembre 2009, deux épisodes indépendants mais aussi dramatiques. Le matin, la ville de Ouagadougou a été inondée par une pluie de plus de 250 mm en quelques heures, ce qui représentait un épisode d'un temps de retour de 10 000 ans environ (Karambiri, 2009). Ce même jour, mais l'après-midi, un grain totalement indépendant du premier a provoqué une crue importante de l'oued Agadès, qui a rompu sa digue en amont de la ville éponyme et repris un ancien lit, au cœur de la ville. Là aussi, les dégâts humains et matériels ont été énormes.

La mousson de 2012 est remarquable par le nombre d'inondations relevées en Afrique de l'Ouest, du Sénégal au lac Tchad. Cela démontre que le risque de crue est en augmentation. La crue du Niger moyen en 2012 (Sighomnou *et al.*, 2012) a provoqué des dégâts considérables (*figures 3 et 4*). Les données actuellement disponibles sont insuffisantes pour déterminer le poids de la pluie et de son intensité, ainsi que le rôle éventuel des changements d'occupation des sols. Dakar a également été touchée fin août 2012 par un épisode qui y a provoqué des inondations dues à la seule pluie (pas de cours d'eau en cause), comme à Ouagadougou en 2009. Les 157 mm tombés le 26 août 2012 ont provoqué des inondations dans les quartiers nord récemment lotis et visiblement mal drainés (*figure 5*).

Une crue de plus en plus précoce et de plus en plus prononcée

Nous ne parlerons ici que de la crue locale qui présente un caractère exceptionnel en 2012. Il faut rappeler que l'influence de l'amont sur la crue locale est généralement très limitée, le débit du Niger en amont du confluent du Gorouol étant très faible durant la mousson. Par ailleurs, les prévisions provenant du Haut Bassin indiquent que la crue guinéenne « ne devrait présenter aucun caractère exceptionnel au cours de l'année hydrologique 2012/2013 » (Sighomnou *et al.*, 2012).

Les hydrogrammes moyens des deux décennies sèches (les années 1970 et 1980) montrent que la seconde crue (guinéenne) était alors bien moins

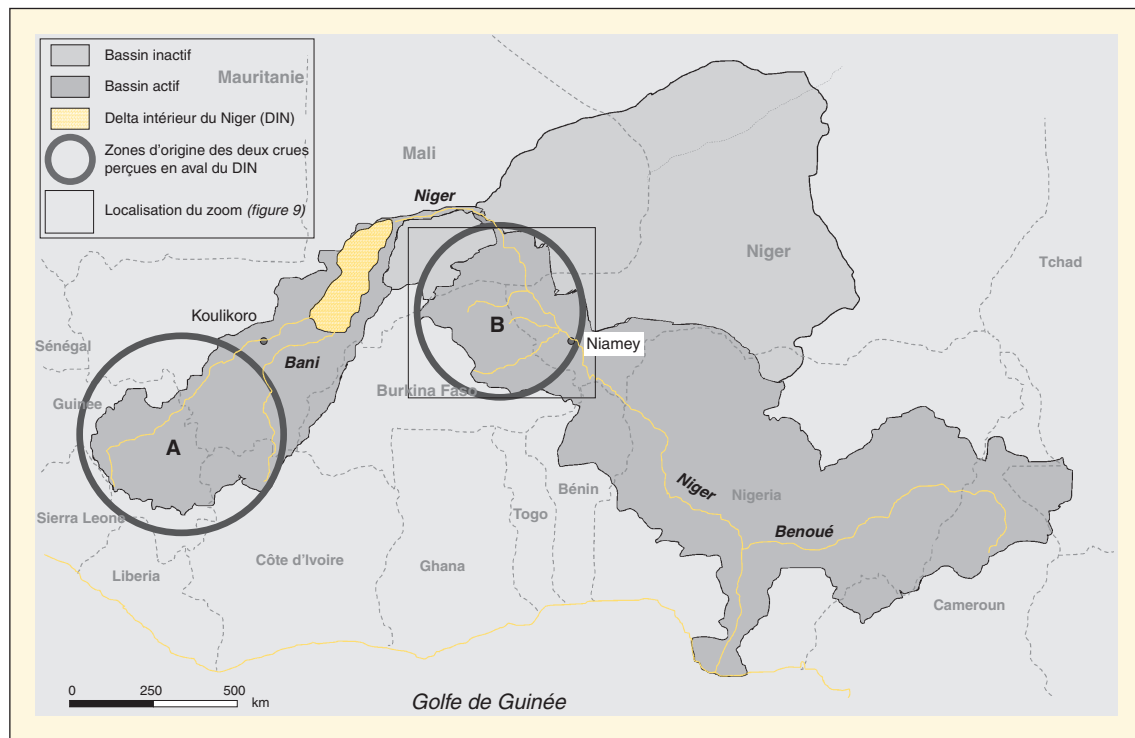


Figure 1. Le bassin du Niger et les zones d'origine des deux crues principales enregistrées en aval du delta intérieur du Niger (DIN). A) Fouta Djallon, origine de la crue « noire » ; B) Bassin du Niger moyen, origine de la crue « rouge ».

importante que durant la période antérieure ; les deux crues (locale et guinéenne) étaient alors reliées sans rupture (figure 6) sur l'hydrogramme décennal. Le pic de la crue guinéenne se produisait alors plutôt mi-décembre, et la décrue arrivait au moins deux mois plus

tôt que durant les décennies humides (1950 à 1968). Durant les deux dernières décennies (1991 à 2010), la crue principale a eu à peu près le même comportement, confirmant la persistance d'un sévère déficit pluviométrique dans l'ouest des zones sahéliennes et

soudaniennes, où se forme l'essentiel des débits.

La décrue reste bien plus rapide que durant les décennies humides. En revanche, la première crue (crue locale ou crue rouge) est, durant cette dernière période, bien plus marquée que durant les périodes antérieures. Elle est en train de devenir une crue distincte et indépendante, plus brutale et plus précoce, surtout dans la dernière décennie (2001 à 2010). Les hydrogrammes annuels (figure 7) pour les crues les plus marquantes montrent une avancée de la crue, plus précoce de 40 jours de nos jours qu'il y a 40 ans, et donnent une idée de la grande variabilité interannuelle, gommée dans les courbes par décennie de la figure 6. Les débits des affluents de rive droite (Gorouol, Dargol et Sirba) ont fortement augmenté depuis le début de la sécheresse (figure 8).

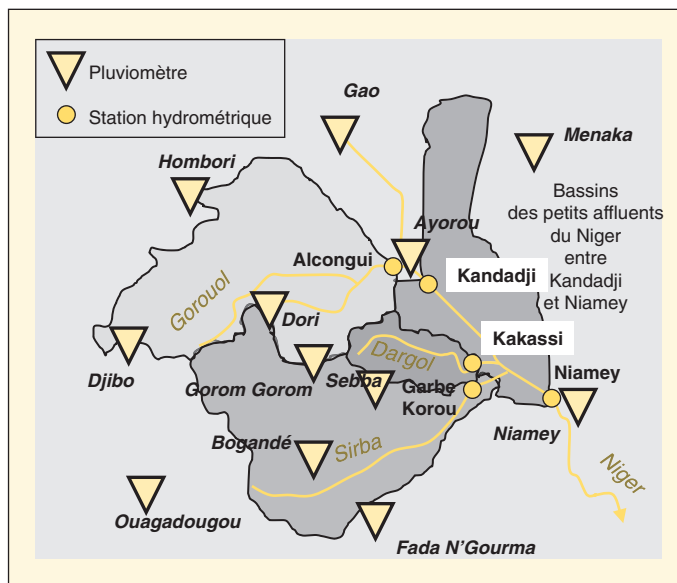


Figure 2. Localisation des stations hydrométriques et des pluviographes utilisés.

Tendances pluviométriques

Évolution interannuelle

La distribution spatiale et temporelle des précipitations en Afrique de l'Ouest, pendant et après la grande sécheresse



Figure 3. Niamey, 18 août 2012, le fleuve sort de son lit et inonde sa rive droite (photo Ibrahim Noma).



Figure 4. Niamey, 18 août 2012, les bords du fleuve sur sa rive droite (photo Ibrahim Noma).

(1968 à 1985) est très variable (Le Barbé *et al.*, 2002). Elle est soumise depuis le début des années 1990 à un gradient est-ouest. En effet, il a été démontré que la pluviométrie réaugmentait depuis le milieu des années 1990, mais uniquement dans la partie centrale et orientale de la sous-région (Ali et Lebel, 2009). Cependant, seule une partie du déficit enregistré après 1968 a été récupérée (figure 9). On note que l'augmentation des pluies après 1995 s'accompagne d'un renforcement de l'irrégularité interannuelle.

Répartition mensuelle

La distribution mensuelle des précipitations n'a pas changé significativement depuis 1950, pour les 12 stations représentatives de la zone d'origine de la crue « rouge » (figures 1 et 2). La figure 10 confirme la relative diminution des précipitations au mois d'août, telle qu'observée par Nicholson (2005) et Ali et Lebel (2009). On observe bien, logiquement, un relatif gonflement des pluies en juin et juillet ; mais la somme des précipitations pour chacun de ces deux mois n'atteint pas celle observée pendant les décennies humides 1950 et 1960. Cela est vérifié individuellement dans chacun des sous-bassins des affluents de la rive droite du fleuve Niger. Cette avancée relative des pluies dans la saison ne peut donc expliquer la précocité actuelle des crues.

Événements extrêmes

Assisterait-on alors à une recrudescence des événements extrêmes, à une augmentation de l'intensité des précipitations ? La densité du réseau pluviométrique sur le bassin moyen rend pour l'heure difficile une estimation robuste de tendances sur les pluies extrêmes. En revanche, l'application d'un modèle statistique régional d'extrême (Panithou *et al.*, 2012) appliqué à l'ensemble du Sahel central et oriental montre que si le nombre des événements les plus intenses n'a pas ou peu changé durant les deux dernières décennies, leur montant précipité moyen a augmenté (figure 11). Le cumul de ce dernier n'atteint pas toutefois celui observé durant les décennies humides.

Une cause immédiate : la pluviométrie de juillet et août 2012

La pluie a été excédentaire en 2012 dans le bassin du Niger moyen ;



Figure 5. Dakar, 27 août 2012 : des quartiers encore en construction mais déjà inondés.

c'est l'année la plus humide depuis le début de la sécheresse en 1968. En revanche, si l'on prend en considération l'ensemble de la période depuis 1951, soit 62 ans, l'année 2012 est la cinquième la plus pluvieuse, la quatrième même pour le seul bassin du Gorouol, qui est celui qui aura connu les plus forts écarts par rapport à la moyenne en 2012. La pluviométrie est donc sensiblement plus élevée qu'en 2010, qui était la 21^e année dans l'ordre des pluviométries décroissantes (tableau 1). Si Fada N'Gourma (en bordure sud du bassin de la Sirba) a reçu plus de 200 mm lors de la troisième décennie d'août 2012, et Ouagadougou 193 mm lors de la dernière décennie de juillet, il est plus rare d'observer, aux latitudes nord-sahéliennes, 227 mm pour le mois de juillet à Hombori au Mali, dont 107 mm tombés durant la seule troisième décennie, ou encore 192 mm pour la deuxième décennie d'août à Tillabéry (Niger) ou encore 150 mm lors de la première décennie d'août (et 322 mm pour le mois complet) à Gorom-Gorom au Sahel burkinabé.

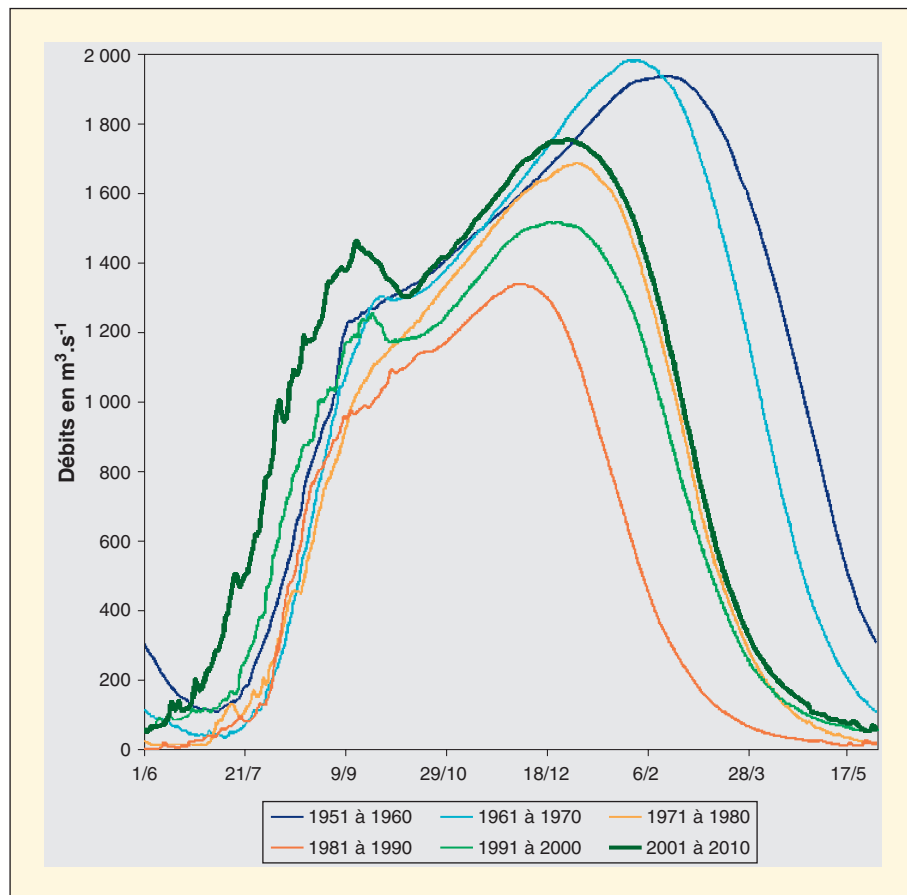


Figure 6. Hydrogrammes moyens du fleuve Niger par décennie de 1951 à 2010.

Une cause profonde de long terme : les changements d'usage des sols, le paradoxe du Sahel

Les données satellitaires apportent des informations irremplaçables sur l'évolution de l'occupation des sols et du couvert végétal. Mais leur interprétation fait l'objet d'un débat en cours. Certaines études fondées sur l'interprétation des indices de végétation (Rasmussen *et al.*, 2001 ; Herrmann *et al.*, 2005 ; Prince *et al.*, 2007 ; Bégué *et al.*, 2011) ou l'évolution de l'albédo (Govaerts et Lattanzio, 2008) ont mis en évidence un reverdissement du Sahel après 1994 ; mais Diello *et al.* (2006) et Mahé *et al.* (2010) ont nettement montré la dégradation des états de surface des sols sur le bassin du Nakambé entre 1972 et 2002 à partir d'images Landsat et d'une approche orientée objet. D'autres études (Hountondji *et al.*, 2004 ; Hein et De Ritter, 2006, entre autres) ont souligné les limitations des indices de végétation pour la détermination des usages des sols avec des images à faible résolution. Ces auteurs préconisent l'utilisation du rapport productivité primaire nette/précipitation (PPN/P) ou *rain use efficiency* (RUE). Des études du couvert végétal faites par photo-interprétation de

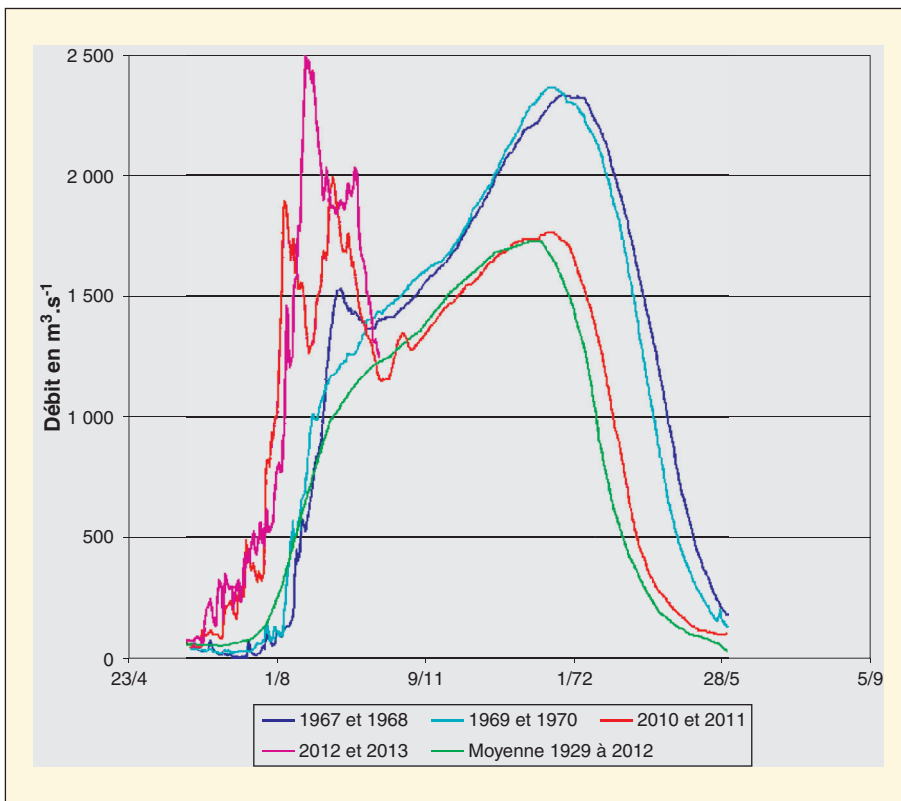


Figure 7. Hydrogrammes annuels des années marquantes et moyenne 1951 à 2010.

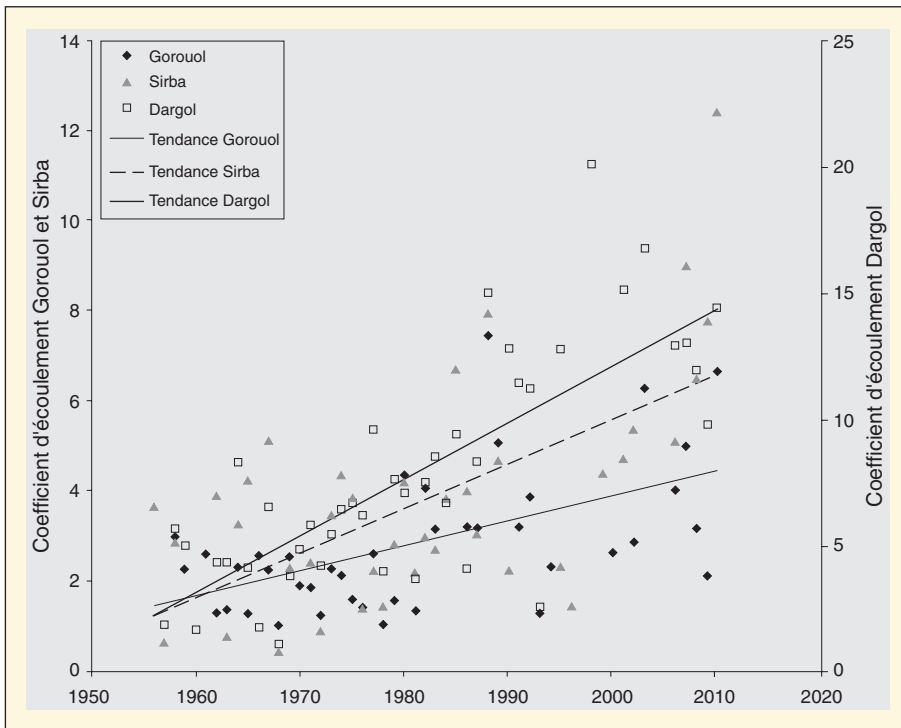


Figure 8. Augmentation des débits des trois affluents de la rive droite du Niger depuis 1950.

photographies aériennes (Leblanc *et al.*, 2008) montrent au contraire une diminution du couvert végétal au sud-ouest du Niger.

Bien que le Sahel soit en cours de reverdissement d'après les études utilisant la *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), ces dernières montrent fréquemment que le Sud-Ouest du Niger et l'Est du Burkina Faso subissent encore une dégradation des terres (voir les cartes incluses dans Prince *et al.*, 1998 et dans Fensholt et Rasmussen, 2011).

Ce que les observations de terrain permettent de constater, c'est une forte progression des zones de sol nu. Celle-ci est en partie liée à la sécheresse elle-même, qui a provoqué une forte mortalité chez les ligneux. Une part croissante des sols nus sont encroûtés. Les « croûtes d'érosion » constituent les formes d'encroûtement les plus évidentes et les plus répandues. Elles sont constituées par une fine et lisse couche de surface riche en particules fines (> 50 µm) qui recouvre souvent une couche de sable bien plus épaisse de 20 à 50 cm, dégradée et indurée par les cycles agricoles (Casenave et Valentin, 1989). Ces croûtes ont une très faible conductivité hydraulique et favorisent fortement le ruissellement. On constate (tableau 2) que la conductivité hydraulique est plus de 15 fois plus faible dans un sol encroûté que dans un sol cultivé en bon état. De ce fait, le coefficient d'écoulement est, à l'inverse, bien plus élevé dans les sols encroûtés. À défaut de pouvoir donner des précisions sur l'évolution à travers tout le Sahel (qui comme on l'a vu, prête à polémique), nous montrons ici (figure 12) l'évolution de la végétation sur la partie aval du bassin du Gorouol (celui-ci a un bassin de 45 000 km²), entre 1979 et 1999 (Amogu *et al.*, 2010) : on constate une nette diminution de la couverture végétale entre ces deux dates. Ces auteurs ont noté la même évolution sur les bassins du Dargol (7 000 km²) et de la Sirba (38 750 km²), les autres affluents sahéliers importants du Niger.

Les surfaces cultivées augmentent très sensiblement d'une année à l'autre dans tout le Sahel. La figure 13 montre la progression des surfaces cultivées au Niger entre 1950 et 2000. Ce pays a l'une des plus fortes croissances démographiques au monde ; les rendements étant plutôt en baisse, cela se traduit par une très forte augmentation des surfaces cultivées. Il en est de même au Burkina Faso (Diello *et al.*, 2006). C'est l'encroûtement d'une partie des

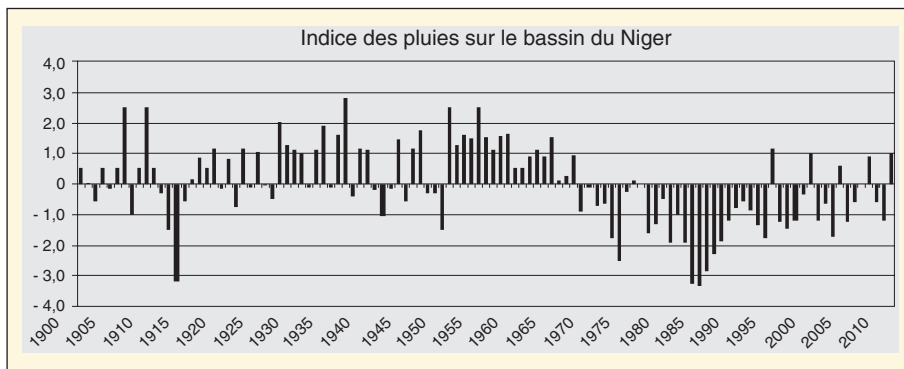


Figure 9. Indice de la pluviométrie sur le bassin moyen du fleuve Niger depuis 1900 (établi sur les données des 12 stations indiquées en figure 2).

sols cultivés par érosion éolienne et hydrique qui accroît les écoulements. L'accroissement des écoulements malgré le déficit des pluies est un processus qui s'observe dans l'essentiel du Sahel, d'où son nom de « paradoxe du Sahel ». D'abord observé sur de petits bassins du Burkina Faso par Albergel (1987), il est confirmé par Mahé et Olivry (1999) dans plusieurs bassins puis par Amani et Nguetora (2002) et Olivry (2002) sur celui du Niger, avant les travaux de Mahé *et al.* (2003) sur les affluents de la

rive droite de celui-ci, puis sur le bassin du Nakambé (Mahé *et al.*, 2010). Mahé *et al.* ont aussi mis en évidence ce comportement paradoxal à l'ouest en Mauritanie (Mahé et Paturel, 2009) puis à l'est (Mahé *et al.*, 2011) dans la zone sahélienne du Nigeria. En zone pastorale nord-sahélienne, Gardelle *et al.* (2010) ont observé une forte croissance des mares, liée à l'augmentation du ruissellement, celle-ci étant due à la non-reconstitution de la végétation après la sécheresse dans les zones où le sol

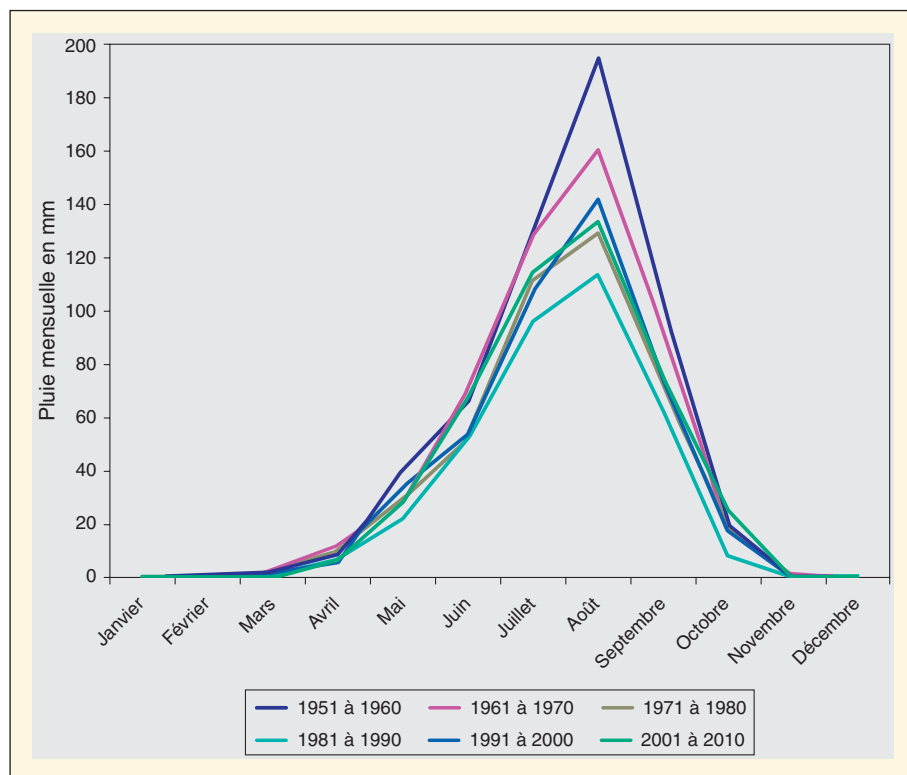


Figure 10. Évolution par décennie des événements dépassant un certain seuil de pluie.

mince a été emporté. Localement dans le degré carré de Niamey, le développement des mares (voir pour l'Ouest du Niger, Bouzou Moussa *et al.*, 2009), principales zones de recharge de la nappe, lié à l'augmentation du ruissellement, entraîne une hausse du niveau des eaux souterraines (Leduc *et al.*, 2001).

On sait depuis les travaux d'Albergel (1987) qu'inversement, en zone soudanienne, les écoulements, plus logiquement, ont diminué avec la sécheresse, et ce à l'échelle des bassins expérimentaux du Burkina. Cela a été confirmé par Olivry (2002) puis Mahé (2009) puis par Descroix *et al.* (2009), et enfin par Amogu *et al.* (2010).

Enfin, la crue de 2010 donne l'occasion à Descroix *et al.* (2012b) de souligner la relation entre l'encroûtement et l'accroissement du risque de crue et d'inondation en Afrique de l'Ouest. Elle montre comment l'urbanisation rapide y accentue l'aléa en décuplant la vulnérabilité des populations concentrées dans des zones qui ne sont pas toujours urbanisables.

Conclusion

Qui de l'homme ou de la nature est responsable de ce regain d'inondations en Afrique soudano-sahélienne ?

Il semble que les précipitations n'aient pas évolué suffisamment pour être seules mises en cause. Cependant, le fait que des événements extrêmes avec des temps de retour très longs (10 000 ans pour celui d'Ouagadougou en 2009) se sont produits ces dernières années pourrait être l'indicateur d'un changement que des travaux en cours tentent de mieux analyser. En revanche, dans les zones cultivables, l'extension des encroûtements superficiels produit une forte réduction de la capacité de rétention en eau des bassins et une augmentation très sensible des coefficients de ruissellement. Ces processus semblent liés à l'extension des cultures et surtout au raccourcissement des jachères. Ils doivent conduire à une prise de conscience des preneurs de décision et à une révision des normes hydrologiques en vigueur.

On peut donc conclure qu'à une tendance à moyen terme, celle de l'accroissement du ruissellement liée à l'encroûtement des sols, s'est ajoutée en 2012 une pluviométrie très excédentaire sur les bassins des affluents de la rive droite, produisant la plus forte crue jamais observée sur le Niger à Niamey depuis 1929. ■

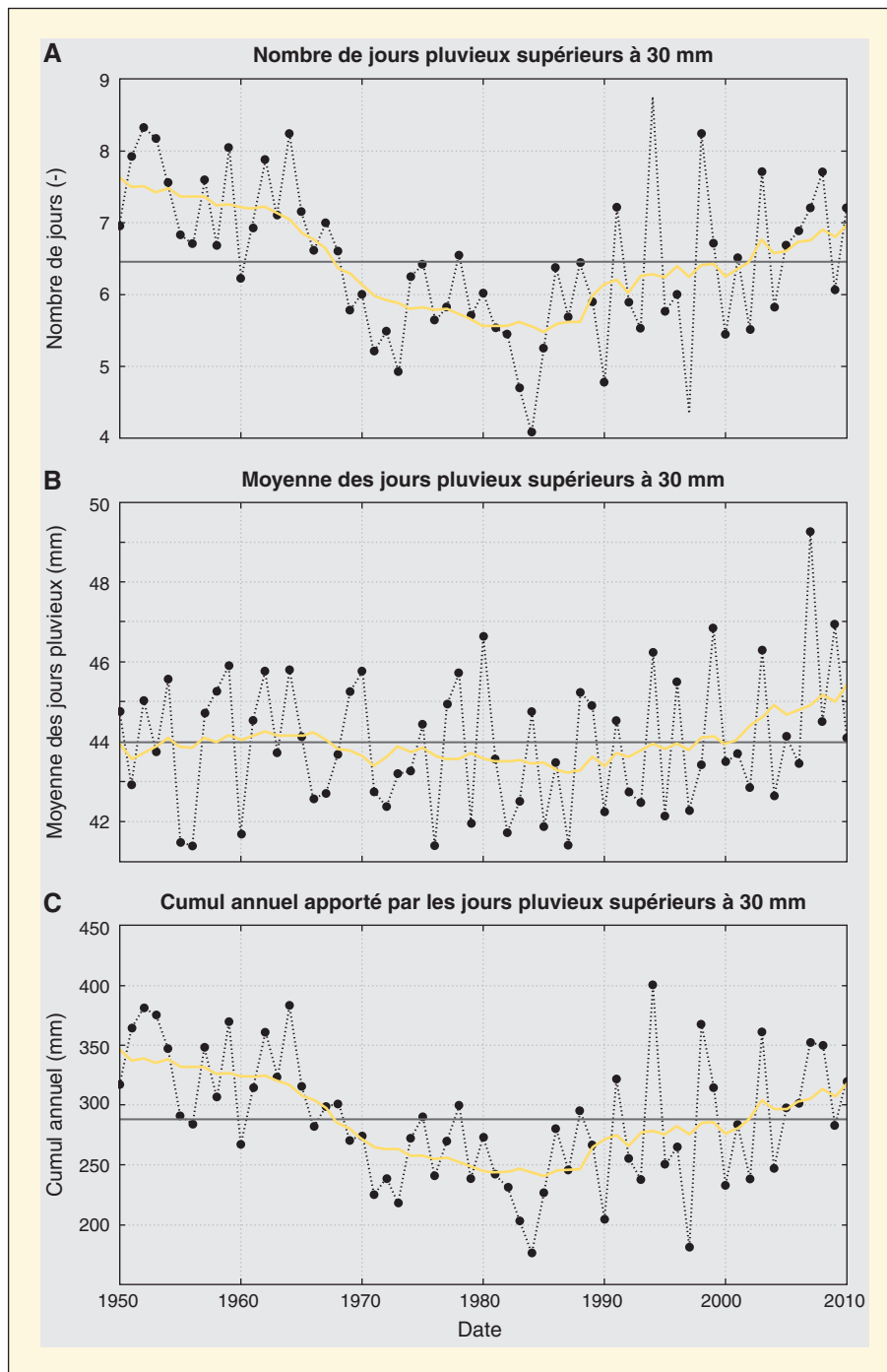


Figure 11. Évolution par décennie des événements dépassant un seuil de 30 mm de pluie tombés en 24 heures dans la région du Sahel central et oriental depuis 1950.
 A) Évolution de l'occurrence. B) Évolution de la quantité moyenne par occurrence. C) Cumul des quantités tombées lors de ces événements.

Tableau 1. La pluviométrie de l'année 2012 dans les bassins du Niger moyen, comparée à 2010 et à la moyenne 1951–2012 (en mm).

1951/2012 P en mm	Moyenne	Médiane	2010	Rang	2012	Rang
Gorouol	434	444	475	19	545	4
Dargol	512	500	465	31	675	5
Sirba	661	650	675	22	778	7
Petits-koris	399	396	400	22	465	9
Total Niger moyen	511	506	533	21	611	5

Tableau 2. Coefficient de ruissellement et conductivité hydraulique sur les principaux états de surface (Descroix *et al.*, 2012a).

États de surface	Coefficient de ruissellement (%)	Conductivité hydraulique à saturation (mm.h ⁻¹)
Surface culturale cultivée en mil	4 ± 1,4	172 ± 79 (20) ^a
Sols structurés sous jachère	10 ± 4	79 ± 41 (20)
Croûte biologique sur jachère ancienne	25 ± 7	18 ± 12 (30)
Croûte d'érosion sous culture et jachère	60 ± 8	10 ± 5 (30)

^a Nombre de répétitions.

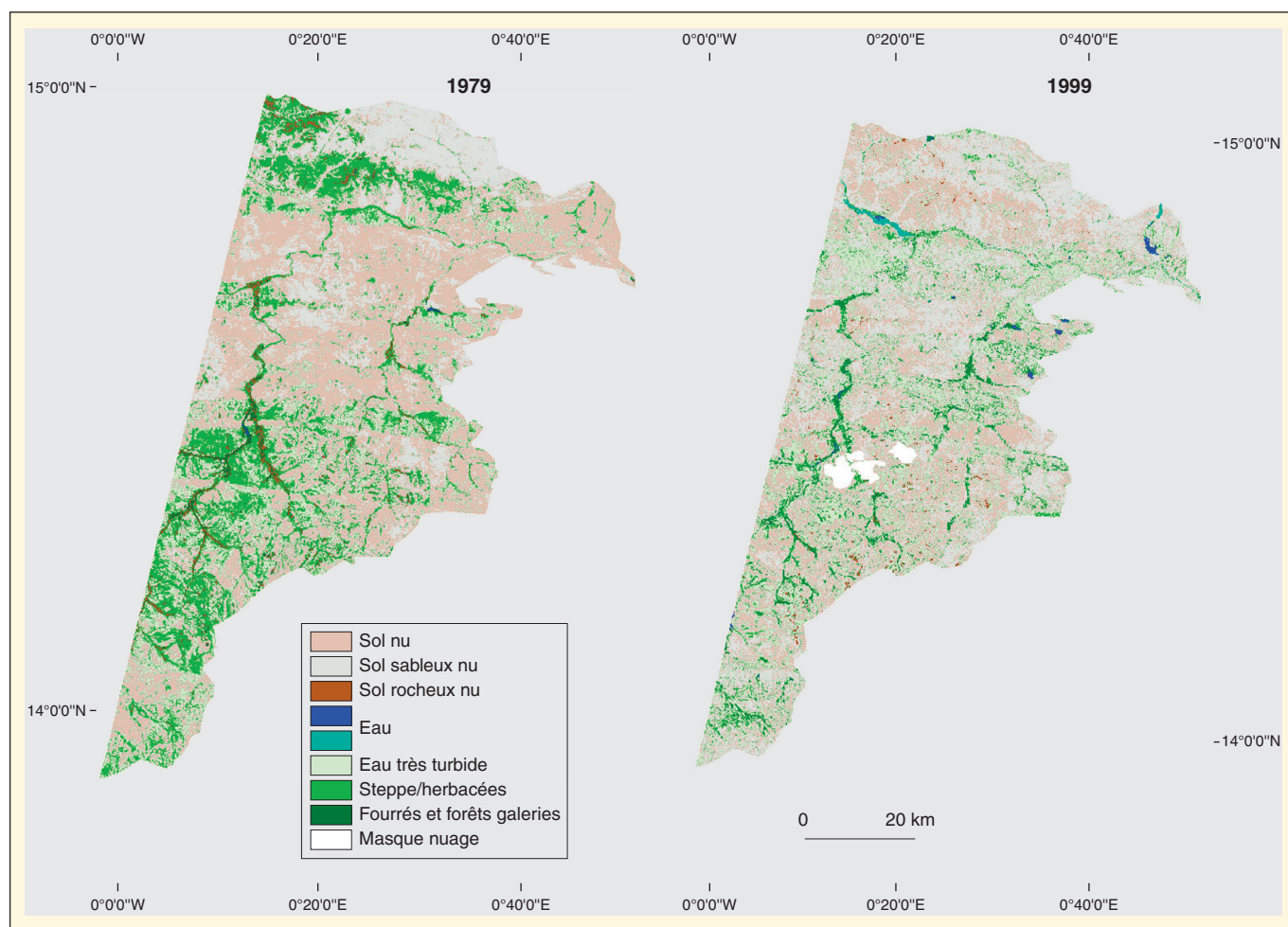


Figure 12. Évolution de 1979 à 1999 de l'occupation des sols dans le nord du bassin du Gorouol (Amogu *et al.*, 2010).

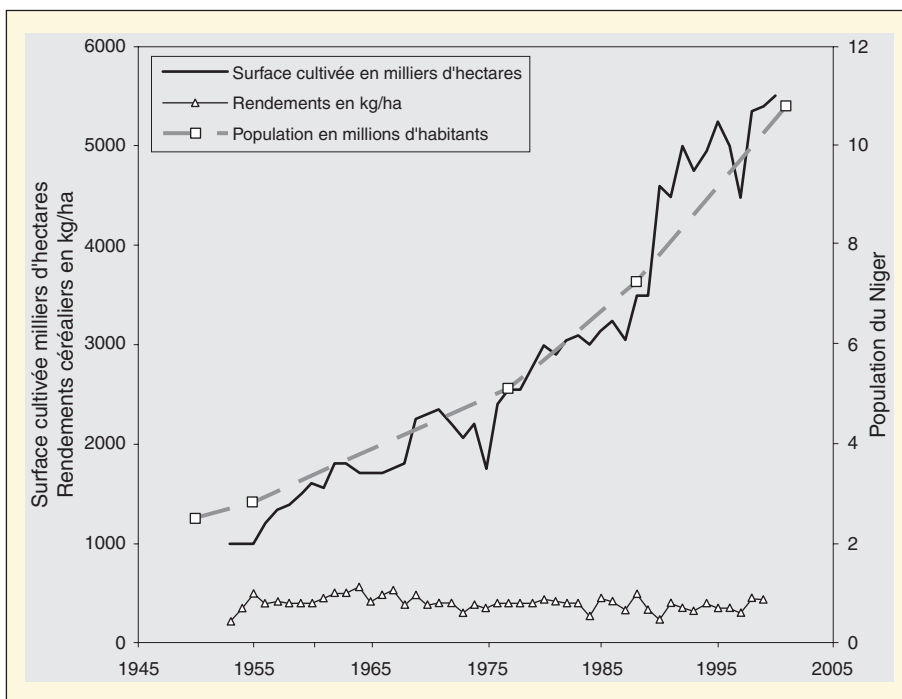


Figure 13. Évolution des surfaces cultivées, de la population et des rendements céréaliers au Niger de 1950 à 2000 (Guengant et Banoïn, 2003).

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/useranon/htm/listStationByGroup.php>), des services hydrologiques nationaux du Mali, du Burkina Faso et du Niger, en particulier Gérard Tiendrebeogo et Lokou Pascal Nakohoun des services hydrologiques burkinabé, et Daouda Abdourahmane et Hassane Adamou de la Direction des ressources en eau 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, 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). Nous remercions Christian Depraetere de son appui en télédétection. Outre l'AFD qui finance la collecte des données hydrométriques de Niger-HYCOS, ce travail a été financé par les programmes ANR ECLIS et ESCAPE, ainsi que par le programme AMMA.

Références

- Albergel J, 1987. Sécheresse, désertification et ressources en eau de surface : application aux petits bassins du Burkina Faso. *The influence of climate change and climatic variability on the hydrologic regime and water resources*, IAHS publication. Wallingford (UK) : IAHS.
- Ali A, Lebel T, 2009. The Sahelian standardized rainfall index revisited. *International Journal of Climatology* 29 : 1705-14. doi: 10.1002/joc.1832
- Amani A, Nguetora M, 2002. Evidence d'une modification du régime hydrologique du fleuve Niger à Niamey. In: Van Lannen H, Demuth S. éd. *FRIEND 2002, Regional hydrology: bridging the gap between research and practice*, Proceedings of the Friend Conference, Cape Town, South Africa, 18-22 March, 2002. IAHS Publ. 274. Wallingford (UK) : IAHS. http://iahs.info/redbooks/a274/iahs_274_449.pdf
- Amogu O, Descroix L, Yéro KS, Le Breton E, Mamadou I, Ali A, et al., 2010. Increasing river flows in the Sahel? *Water* 2 : 170-99.
- Bégué A, Vintrou E, Ruelland D, Cladern M, Dessay N, 2011. Can a 25-year trend in Soudano-Sahelian vegetation dynamics be interpreted in terms of land use change? A remote sensing approach. *Global Environmental Change* 21 : 413-20. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2011.02.002
- Bouzou Moussa I, Faran Maiga O, Karimou Ambouta JM, Sarr B, Descroix L, Moustapha

Adamou M, 2009. Les conséquences géomorphologiques de l'occupation des sols et des changements climatiques dans un bassin versant rural sahélien. *Sécheresse* 20 : 145-52. doi: 10.1684/sec.2009.0163

Casenave A, Valentin C, 1989. *Les états de surface de la zone sahélienne ; influence sur l'infiltration*. Collection Didactiques. Paris : Orstom éditions.

Descroix L, Mahé G, Lebel TG, Favreau G, Galle S, Gautier E, et al., 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, Laurent JP, Vauclin M, Amogu O, Boubkraoui S, Ibrahim B, et al., 2012a. Experimental evidence of deep infiltration under sandy flats and gullies in the Sahel. *Journal of Hydrology* 424-425 : 1-15. doi: org/10.1016/j.jhydrol.2011.11.019

Descroix L, Genthon P, Amogu O, Rajot JL, 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.

Di Baldassarre G, Montanari A, Lins H, Koutsoyiannis D, Brandimarte L, Blöschl G, 2010. Flood fatalities in Africa: from diagnosis to mitigation. *Geophysical Research Letters* 37 : L22402. doi: 10.1029/2010GL045467

Diello P, Paturol JE, Mahé G, Karambiri H, Servat E, 2006. Méthodologie et application d'une démarche de modélisation hydrologique prenant en compte l'évolution des états de surface en milieu sahélien d'Afrique de l'Ouest. In: *Water resource variability: processes, analyses and impacts*. Proc. of the 5th FRIEND World Conference. IAHS Publ. 308. La Havana (Cuba).

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 : 438-51. 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). *Hydrology Earth System Science* 14 : 309-24. doi: 10.5194/hess-14-309-2010

Govaerts YM, Lattanzio A, 2008. Estimation of surface albedo increase during the eighties Sahel drought from Meteosat observations. *Global Planetary Change* 64 : 139-45. doi: 10.1016/j.gloplacha.2008.04.004

Guengant JP, Banoïn M, 2003. *Dynamique des populations, disponibilités en terres et adaptation des régimes fonciers : le Niger, une étude de cas*. Faculté d'Agronomie de l'Université Abdou Moumouni de Niamey, Direction de la Statistique et des Comptes Nationaux (DSCN). Paris : CICRED ; FAO.

Hein L, De Ritter N, 2006. Desertification in the Sahel: a reinterpretation. *Global Change Biology* 12 : 751-8. doi: 10.1111/j.1365-2486.2006.01135.x

- Herrmann SM, Anyamba A, Tucker CJ, 2005. Recent trends in vegetation dynamics in the African Sahel and their relationship to climate. *Global Environmental Change* 15 : 394-404. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2005.08.004
- Hountondji YC, Ozer P, Nicolas J, 2004. Mise en évidence des zones touchées par la désertification par télédétection à basse résolution au Niger. *Cybergéographie : Revue Européenne de Géographie* 291.
- Karambiri H, 2009. *Brève analyse fréquentielle de la pluie du 1^{er} septembre 2009 à Ouagadougou (Burkina Faso)*. Note technique 2iE, 4 p.
- Le Barbé L, Lebel T, Tapsoba D, 2002. Rainfall variability in West Africa during the years 1950 to 1990. *Journal of Climate* 15 : 187-202. doi: 10.1175/1520-0442(2002)015<0187:RVIWAD>2.0.CO;2
- Leblanc M, Favreau G, Massuel S, Tweed S, Loireau M, Cappelaere B, 2008. Land clearance and hydrological change in the Sahel : SW Niger. *Global and Planetary Change* 61 : 135-50. doi: 10.1016/j.gloplacha.2007.08.011
- Leduc C, Favreau G, Shroeter P, 2001. Long-term rise in a Sahelian water-table: the continental terminal in South West Niger. *Journal of Hydrology* 243 : 43-54.
- Mahé G, Olivry JC, 1999. Assessment of freshwater yields to the ocean along the inter-tropical Atlantic coast of Africa. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Series IIA* 328 : 621-6.
- Mahé G, Leduc C, Amani A, Paturel JE, 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, Ahmed S, eds. *Hydrology of the Mediterranean and semi-arid regions*. Proceedings of the International Conference, Montpellier, France, 1-4 avril 2003. IAHS Publication n° 278. Wallingford (UK) : IAHS.
- Mahé G, Diello P, Paturel JE, Barbier B, Karambiri H, Dezetter A, et al., 2010. Baisse des pluies et augmentation des écoulements au Sahel : impact climatique et anthropique sur les écoulements du Nakambe au Burkina Faso. *Sécheresse* 21 : 330-2. doi: 10.1684/sec.2010.0268
- Mahé G, 2009. Surface/groundwater interactions in the Bani and Nakambe rivers, tributaries of the Niger and Volta basins (West Africa). *Hydrology Science Journal* 54 : 704-12.
- Mahé G, Paturel JE, 2009. 1896-2006 Sahelian annual rainfall variability and runoff increase of Sahelian rivers. *Comptes Rendus Geosciences* 341 : 538-46. doi: 10.1016/j.crte.2009.05.002
- Mahé G, Lienou G, Bamba F, Paturel JE, Adeaga O, Descroix L, et al., 2011. Niger river and climate change over 100 years. In: Franks SW, Boegh E, Blyth E, Hannah DM, Yilmaz KK, eds. *Hydro-climatology: variability and change*. Proceedings of symposium J-H02 held during IUGG2011. Melbourne, Australia. IAHS Publication 344. Wallingford (UK) : IAHS.
- Nicholson S, 2005. On the question of the "recovery" of the rains in the West African Sahel. *Journal of Arid Environments* 63 : 615-41. doi: 10.1016/j.jaridenv.2005.03.004
- Olivry JC, 2002. *Synthèse des connaissances hydrologiques et potentiel en ressources en eau du fleuve Niger*. Provisional Report. Washington ; Niamey : World Bank ; Niger Basin Authority.
- Panthou GT, Vischel T, Lebel J, Blanchet G, Quantin, Ali A, 2012. Extreme rainfall in West Africa: a regional modeling. *Water Resources Research* 48, 8 : W08501.
- Prince SD, Brown de Colstoun E, Kravitz L, 1998. Evidence from rain-use efficiencies does not indicate extensive Sahelian desertification. *Global Change Biology* 4 : 359-74. doi: 10.1046/j.1365-2486.1998.00158.x
- Prince SD, Wessels KJ, Tucker CJ, Nicholson SE, 2007. Desertification in the Sahel: a reinterpretation of a reinterpretation. *Global Change Biology* 13 : 1308-13. doi: 10.1111/j.1365-2486.2007.01356.x
- Rasmussen K, Bjarne F, Madsen JE, 2001. Desertification in reverse? Observations from northern Burkina Faso. *Global Environmental Change* 11 : 271-82. doi: 10.1016/S0959-3780(01)00005-X
- Sighomnou D, Bachir T, Alio A, Zomodo L, Iliya A, Olomoda I, et al., 2012. *Crue exceptionnelle et inondations au cours des mois d'août et septembre 2012 dans le Niger Moyen et Inférieur*. Niamey : ABN.
- Tarhule A, 2005. Damaging rainfall and floods: the other Sahel hazards. *Climatic Change* 72 : 355-77. doi: 10.1007/s10584-005-6792-4
- Tschakert P, Sagoe R, Ofori-Darko G, Codjoe SM, 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