HAL
open science

ÉVOLUTION RÉCENTE DE LA PLUVIOMÉTRIE EN AFRIQUE DE L'OUEST À TRAVERS DEUX RÉGIONS : LA SÉNÉGAMBIE ET LE BASSIN DU NIGER MOYEN

Luc Descroix, Aïda Diongue Niang, Gérémy Panthou, Ansoumana Bodian, Youssouph Sané, Honoré Dacosta, Moussa Malam Abdou, Jean-Pierre Vandervaere, Guillaume Quantin, Aéroport Léopold, et al.

To cite this version:

Luc Descroix, Aïda Diongue Niang, Gérémy Panthou, Ansoumana Bodian, Youssouph Sané, et al.. ÉVOLUTION RÉCENTE DE LA PLUVIOMÉTRIE EN AFRIQUE DE L'OUEST À TRAVERS DEUX RÉGIONS : LA SÉNÉGAMBIE ET LE BASSIN DU NIGER MOYEN. Annales de l'Association internationale de climatologie, 2015. ird-02153162

HAL Id: ird-02153162

https://ird.hal.science/ird-02153162

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.

ÉVOLUTION RÉCENTE DE LA PLUVIOMÉTRIE EN AFRIQUE DE L'OUEST À TRAVERS DEUX RÉGIONS : LA SÉNÉGAMBIE ET LE BASSIN DU NIGER MOYEN

Luc DESCROIX [1], Aïda DIONGUE NIANG [2], Gérémy PANTHOU [3], Ansoumana BODIAN [4], Youssouph SANE [2], Honoré DACOSTA [5], Moussa MALAM ABDOU [6], Jean-Pierre VANDERVAERE [3], Guillaume QUANTIN [7]

[1] IRD / MNHN UMR PALOC
IRD, route des Pères Maristes, campus de Hann
BP 1386, 18524, Dakar Hann – Sénégal
luc.descroix@ird.fr

[2] Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie (ANACIM)/MET
Aéroport Léopold Sédar Senghor, BP 8257 Dakar-Yoff, Dakar – Sénégal
aida.diongue.niang@gmail.com ; youssouph.sane@anacim.sn

[3] Université Grenoble Alpes (UGA), LTHE UMR 5564 (UGA-CNRS-IRD-G-INP)
BP 53, 38041, Grenoble cedex 9 – France
geremy.panthou@gmail.com ; jean-pierre.vandervaere@univ-grenoble-alpes.fr

[4] Laboratoire Leïdi « Dynamique des territoires et développement », Université Gaston Berger
BP 234, Saint Louis – Sénégal
ansoumana.bodian@ugb.edu.sn

[5] Département de Géographie, FLSH, Université Cheikh Anta Diop
BP 5005, Dakar – Sénégal
honore.dacosta@ucad.edu.sn

[6] Département de Géographie, FLSH, Université de Zinder,
BP 656, Zinder, Niger
moussa.malamabdou@gmail.com

[7] IRD-LTHE UMR 5564 (UGA-CNRS-IRD-G-INP)
BP 53, 38041, Grenoble cedex 9 – France
guillaume.quantin@univ-grenoble-alpes.fr

Résumé

La mousson ouest-africaine rythme le calendrier agricole de toute l'Afrique de l'Ouest ; celui-ci est de plus en plus court au fur et à mesure que l'on se déplace vers le Nord, comme la durée et l'abondance de la mousson diminuent. Après une période de sécheresse de 1968 à 1995, l'Afrique de l'Ouest connaît plutôt depuis la fin du dernier millénaire un retour à des conditions pluviométriques plus humides ; celles-ci, aux latitudes soudano-sahéliennes, sont similaires, en termes de moyenne et de variabilité interannuelle, à celles qui ont été observées de 1900 à 1950. L'objectif est de montrer en quoi l'évolution pluviométrique récente explique la dynamique hydrologique et agronomique de la région ouest-africaine, en particulier l'occurrence accrue des inondations et le faible regain des rendements agricoles en dépit du retour à une pluviométrie plus favorable. Des méthodes statistiques simples sont utilisées dans deux sous-régions, la Sénégambie et le bassin du Niger Moyen, pour mettre en évidence l'évolution, sur la période 1950-2013, des caractéristiques de la mousson qui ont un intérêt hydrologique et agronomique (cumuls annuels, pluies extrêmes, date de début et de fin et durée de la saison des pluies). On observe que les périodes 1900-1950 et 1995-2015 peuvent être considérées comme des périodes de pluviométrie moyenne, les périodes 1951-1967 et 1968-1995 étant des périodes respectivement humides et sèches. Par ailleurs, on observe une augmentation des jours de pluie de fort cumul bien plus rapide que celle de la pluie elle-même. Enfin, si la saison des pluies est à présent sensiblement plus longue que durant la phase sèche, on observe pourtant ces dernières années dans le Sahel central un retour des « mauvais » hivernages au sens agronomique du terme.

Mots-clés : mousson, durée de la saison des pluies, pluies de fort cumul journalier, Afrique de l'Ouest, saison agronomique.

Abstract

Recent trend on rainfall in West Africa through two regions: Senegambia and the Middle Niger River Basin

The West African Monsoon gives agricultural activities timetable in the whole West Africa; this is shorter when one is going northward, as well in duration as in rainfall mean annual amount. After a long drought (1968-1995), West Africa experiences since the end of the 20th century a coming back to better rainfall conditions; mean annual rainfall amount of sudano-sahelian belt are similar, in average and in interannual variability, to those observed during the 1900-1950 period. The objective of this study is to determine whether the recent rainfall evolution explains the hydrological and agronomical dynamics observed in West Africa, mostly the increased occurrence of floods and the few recovery of crop yields, although rainfall has sensitively increased. Simple statistical methods are used here in two sub-regions, Senegambia and the Middle Niger River Basin, to highlight the 1950-2013 evolution of the monsoon characteristics which have a hydrological or agronomical interest (annual rainfall, extreme rainfall, date of onset and end and duration of the rainy season). Maybe could we consider that 1900-1950 and 1995-2015 periods should be the "normal range of rainfall", the 1951-1967 and 1968-1995 being respectively humid and dry periods. Otherwise, an increase in the number of extreme rainfall events, higher than the increase in rainfall amount, is observed. Finally, although the rainy season is nowadays longer than during the dry period (1968-1995), a recent increase in the occurrence of "bad" agronomical rainy seasons is noticed.

Keywords: monsoon, duration of rainy season, extreme rainfall, West Africa, agronomic monsoon

Introduction et problématique

Après le très long (1968-1995), très étendu (plus de 6 millions de km² très touchés) et très prononcé (de 10 à 40 % de diminution des précipitations suivant les lieux) épisode sec qu'a connu l'Afrique de l'Ouest, on assiste à une indéniable reprise de la pluviométrie (Ali et Lebel, 2009 ; Bodian, 2014). Ainsi, la figure 1 montre pour l'ensemble du bassin du Niger à Niamey, qui occupe une grosse moitié centrale de la bande soudano-sahélienne, l'évolution de l'indice standardisé des précipitations tel que défini par Balme *et al*. (2006). Celui-ci s'exprime ainsi (sous forme d'indice adimensionnel) :

$$ISP = (P_i - P_{moy})/\sigma,$$

où P_i = *Pluie de l'année i ;* P_{moy} = *pluie moyenne de la série ;* σ = *écart-type de la série.*

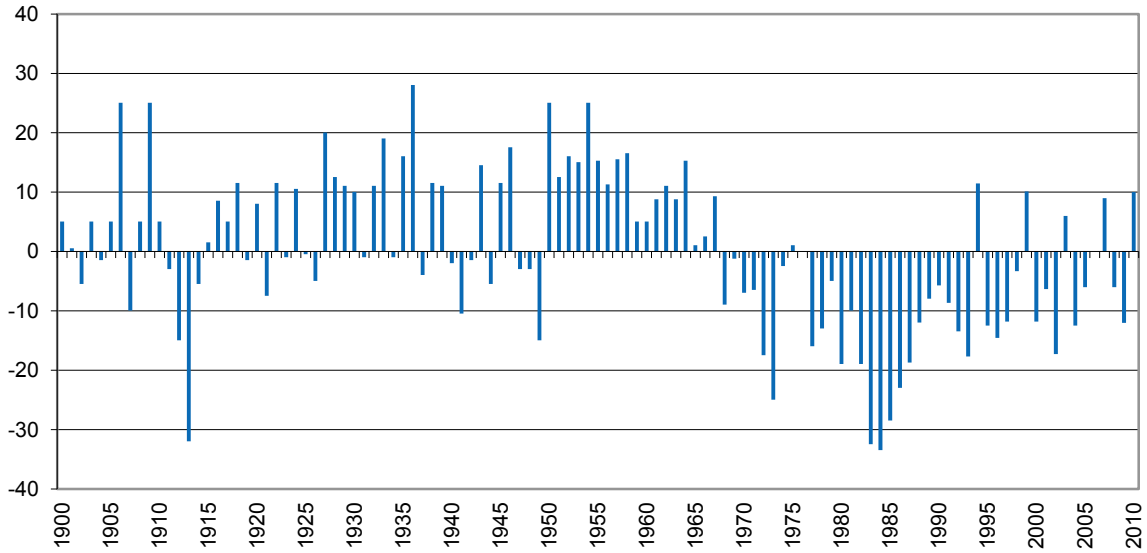

Figure 1 : Evolution de l'indice standardisé des précipitations (ISP) sur le bassin du Niger à Niamey de 1900 à 2012. *Evolution of the Standard Precipitation Index (SPI) of the Niger River Basin at the Niamey station, from 1900 to 2012; SPI is calculated as: SPI = (Pi –Pmean)/σ, with Pi = Precipitation value for year i; Pmean = mean rainfall of the series; σ = standard deviation of the series; adimensional index.*

Cependant, dans tout le Sahel et la zone soudanienne, on entend encore des acteurs locaux ne percevant pas de retour à des niveaux de cumuls pluviométriques meilleurs. On entend ainsi très souvent des agriculteurs, des techniciens agricoles, des agronomes, des responsables politiques, des chefs de village, évoquer la sécheresse ou le déficit pluviométrique persistent pour expliquer les mauvais rendements ou la mauvaise situation économique, la déforestation ou la dégradation environnementale. Ce discours est même parfois repris par les chercheurs, alors que cela fait pratiquement vingt ans que l'ensemble de la sous-région connaît un retour des totaux pluviométriques annuels à des valeurs moyennes : celui-ci est avéré dès 1993 dans le bassin du Niger Moyen (Descroix *et al*., 2013) et dès 1998 au Sénégal (Bodian, 2014) où cette reprise est plus franche dans les zones soudaniennes, les postes sahéliens ne connaissant de reprise que durant la décennie 2001-2010. De fait, bien plus souvent, on entend les agriculteurs sahéliens répéter que les pluies sont certes un peu meilleures qu'auparavant, mais qu'on est encore loin des conditions d'avant la sécheresse. Il est probable que les personnes susceptibles de se souvenir des conditions prévalant avant 1968 sont encore nombreuses, qui considèrent comme « normales » ces conditions-là ; par contre, les personnes se souvenant de la situation d'avant les années humides 1951-1968 sont celles qui ont aujourd'hui plus de 75, voire 80 ans ; des personnes de cet âge-là sont en très petit nombre dans les villages de la bande soudano-sahélienne. Or c'est probablement plutôt ce niveau-là de pluviométrie qu'il faut attendre comme moyenne sur le long terme, et intégrer le fait que les deux décennies d'avant la sécheresse (en fait, les années 1951-1967) ont été très excédentaires, et ne reflétaient pas une tendance durable ; il est même probable que des activités et cultures de type soudanien se sont étendues dans le sud des espaces sahéliens durant ces années-là, se trouvant alors très fragilisées dès que la pluviométrie s'est effondrée après 1967.

L'extension vers le nord du bassin arachidier sénégalais à la fin des années 1990 (Fall, 2014), lorsque les isohyètes sont remontés vers le nord, tendrait à montrer que l'agriculteur sahélien s'adapte vite et sait profiter des opportunités climatiques, même si dans ce cas, cette extension s'est faite au détriment des pâturages des populations nomades du Ferlo et alors que la filière arachidière était en démantèlement pour cause de coupes dans les subventions après l'adoption, au début des années 1990, des Plans d'Ajustement Structurels (PAS).

D'un point de vue hydrologique, en dehors de la diminution de la capacité de rétention en eau des sols, qu'on ne traitera pas ici, c'est le total pluviométrique de l'année et le nombre d'évènements de fort cumul, susceptibles d'entraîner de forts coefficients de ruissellement, qui sont les variables explicatives les plus déterminantes (Olivry, 2002 ; Mahé *et al*., 2011 et 2013 ; Descroix *et al*., 2012 ; Panthou *et al*., 2013 et 2014 ; Vischel *et al.*, 2015).

Tant pour l'agriculture que pour l'hydrologie, la structure de la saison des pluies en terme d'événements pluvieux est souvent plus critique que le simple cumul annuel (Balme *et al*., 2006). Au niveau agronomique et agro-climatique, les variables les plus importantes sont les dates de début et fin de la saison des pluies (Balme *et al*., 2005 ; Balme *et al.*, 2006) ainsi que la durée de celle-ci. « *La connaissance de la date de démarrage de la saison des pluies ne renseigne en rien sur le cumul pluviométrique à venir ; en revanche, elle permet de prévoir la longueur de la saison des pluies, la fin de celle-ci étant moins variable* » (Balme *et al*., 2005). La saison des pluies est de plus en plus courte et tardive en allant vers le Nord et vers l'Atlantique (Marteau *et al*., 2009) ; si l'on se réfère aux critères déterminés par Sivakumar (1988), il est ainsi assez aisé de déterminer les saisons dont la répartition et les valeurs de pluie conduisent à de bonnes ou mauvaises conditions agronomiques ; l'apparition de *dry spells* est aussi mise en exergue (Janicot et Sultan, 2001, Marteau *et al*., 2011). La date de début « agronomique » de la mousson est, quant à elle, très liée au « saut de mousson », rapide déplacement vers le nord de la Zone de Convergence Inter-Tropicale qu'on observe fin juin en général (Sultan et Janicot, 2000) ; au niveau agronomique, la date idéale de semis pour

le mil est très proche de celle de ce « saut de mousson » (Sultan *et al*., 2005). « *Concernant le lien entre démarrage agronomique et « saut » de mousson, on pourrait imaginer une stratégie simple de semis lors du « saut » de mousson* » (Balme *et al*., 2005). On ne s'étendra pas, dans cette étude, sur le rôle des températures et du réchauffement global dans l'évolution des rendements et de la production agricoles mais il est certain que ce rôle est majeur (Sultan, 2012). De fait, les projections issues de modèles climatiques prévoient toutes des diminutions de rendements culturaux (de l'ordre de 11 à 18 %) en Afrique de l'Ouest principalement du fait du réchauffement (Roudier *et al*., 2011), de l'accroissement de la transpiration et la baisse de la teneur en eau des sols (Léauthaud *et al*., 2015) ; ces derniers auteurs concluent sur l'intérêt de mieux prendre en compte les évènements pluvieux extrêmes.

Quoiqu'il en soit, le lien entre la date et la durée de la mousson et les rendements agricoles est très fort, et permet à Balme *et al*. (2005) de conclure : *« En termes d'applications agronomiques, la possibilité de prévoir la longueur de la saison des pluies peut aider les agriculteurs dans le choix des variétés à semer pour minimiser les risques, par exemple en choisissant un mil à cycle plus court si la saison a démarré tardivement* ».

Le but de cet article est de faire une actualisation de l'évolution de variables pluviométriques d'intérêt hydrologique et agronomique dans deux régions d'Afrique de l'Ouest, la Sénégambie et le bassin du Niger Moyen. Ces variables sont :

- la pluviométrie annuelle, ainsi que le nombre de jours de pluie par an et donc la précipitation moyenne par jour de pluie ;
- les évènements pluvieux de fort cumul en 24 heures ;
- les tendances et ruptures de stationnarité dans les séries de données de ces deux variables (pluviométrie annuelle, pluie importante et pluie maximum en 24 heures) ;
- la date de début et de fin de la mousson « agronomique », ainsi que sa durée ;
- pour finir, un récapitulatif de la « qualité agronomique » de la mousson de chaque année entre 1951 et 2013.

1. Matériel et Méthodes

Cette analyse et mise à jour des variables pluviométriques sera effectuée pour deux régions de taille similaire (environ 200 000 km²), la Sénégambie et le bassin du Niger moyen (figure 2).

Dans chacune de ces « fenêtres », les données d'une douzaine de stations pluviométriques ont été utilisées ; elles ont été fournies ou achetées auprès des Directions Nationales de la Météorologie (DMN) du Sénégal, du Burkina Faso, du Mali et du Niger. Le nombre de stations (une douzaine par région) est le nombre qui nous a paru le minimum pour avoir une bonne représentativité de chacune de ces régions ; il s'agit de stations ayant les séries ininterrompues depuis 1950 en pluviométrie journalière. Les stations ne comportent donc aucune lacune indiquée pour la période 1951-2013. Cette étude se concentre sur ces deux seules fenêtres pour une raison de coût. Si les données du Sénégal sont fournies par les auteurs, il a fallu acquérir les données du Niger Moyen auprès de trois DMN. 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 météorologiques vendent leurs données, et ce, pour un prix relativement élevé (Mahé et Gioda, 2009). Par ailleurs, la fenêtre Niger Moyen est la mieux connue en terme de risques hydrologiques (Descroix *et al*., 2012) ; et les deux régions (Sénégambie et Niger Moyen) sont les mieux documentées en matière de conséquences agronomiques des changements climatiques (Sultan *et al*., 2015).

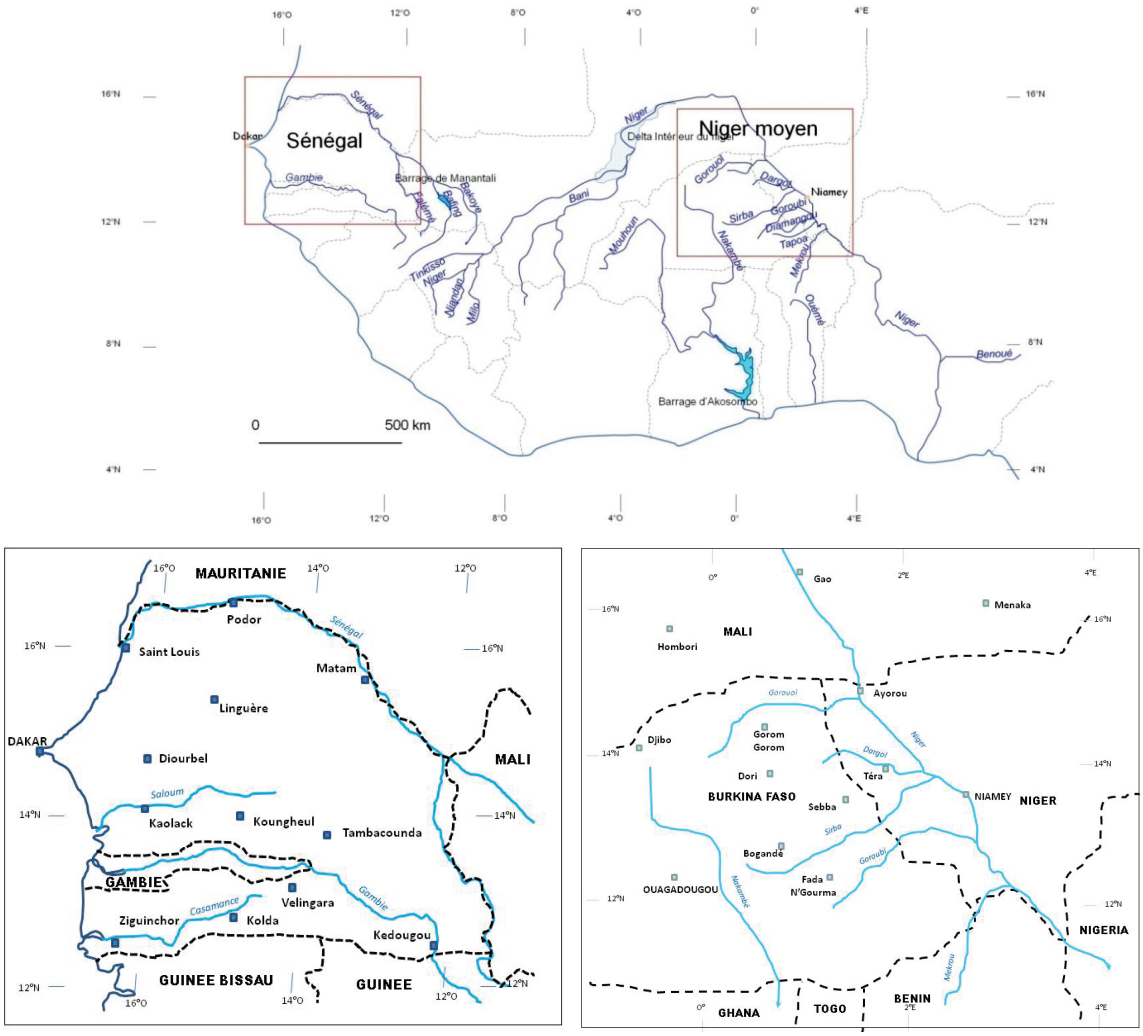

Figure 2 : Localisation (en haut) des deux sous-régions (Sénégambie et bassin du Niger Moyen) où la pluviométrie est analysée, ainsi que des 12 postes pluviométriques utilisés respectivement dans cette étude pour la Sénégambie (en bas à gauche) et pour le bassin du Niger Moyen (en bas à droite). *Location of the two areas (Senegambia and Middle Niger River Basin) analyzed in rainfall, and location of the rain gauges used for the analyze in both areas: Senegambia (left) and Mid Niger Basin (right).*

L'indice standardisé des précipitations (décrit plus haut et défini d'après Balme *et al*., 2006) est utilisé en partie 4 afin de pouvoir comparer des séries différentes ; il permet aussi de synthétiser l'information et de visualiser l'évolution des séries sur une longue période. Utilisé pour chacune des deux sous-régions étudiées, il est alors spatialisé, comme les cumuls de pluie et le nombre de jours de pluie, par la méthode des polygones de Thiessen.

Les séries chronologiques sont traitées à l'aide du logiciel Khronostat ® (Boyer, 2002) ; ce dernier rassemble des méthodes basées sur l'utilisation de tests statistiques d'homogénéité afin de détecter ruptures et tendances. En particulier, il permet d'appliquer la procédure de segmentation de Hubert (Hubert *et al*., 1989), ainsi que les tests de Buishand et Pettitt (version modifiée du test de Mann-Whitney) ; ceux-ci ont été décrits par Lubès-Niel *et al.* (1998) ; le test de Buishand est un test d'homogénéité pour lequel l'hypothèse nulle est qu'une série temporelle est homogène entre deux temps donnés ; le test de Pettitt permet de vérifier la stationnarité de la série pluviométrique.

Les dates de début et de fin de mousson sont déterminées d'après les critères agronomiques de Sivakumar (1988). Leur spatialisation par région s'est également faite par la méthode des polygones de Thiessen.

2. Evolution des pluies annuelles moyennes

Les indices standardisés des précipitations (Balme *et al*., 2005) permettent de comparer les deux régions concernées (figure 3). Dans les deux cas, on observe la phase humide des décennies 1950-1970, puis la longue période sèche qui lui a succédé, avec ensuite une lente remontée. Toutefois, les deux régions se distinguent par plusieurs différences : la décennie 1960 est plus sèche que la précédente au Sénégal, ce qui n'est pas le cas du Sahel intérieur. De plus, et cela est remarqué par Ali et Lebel (2009), la remontée se manifeste plus tôt au Sahel Intérieur (après 1993, figure 3) que sur le littoral (après 1999). Cette remontée est confirmée par Panthou *et al*. (2014), ainsi que par Sanogo *et al*. (2015) et Dong et Sutton (2015). Sanogo *et al* (2015) signalent qu'elle est significative dans la bande soudano-sahélienne, mais pas pour les stations proches du Golfe de Guinée ; cela est probablement en lien avec le fait que la diminution des pluies avait été d'autant plus forte en se dirigeant vers le Nord (Dacosta *et al*., 2002).

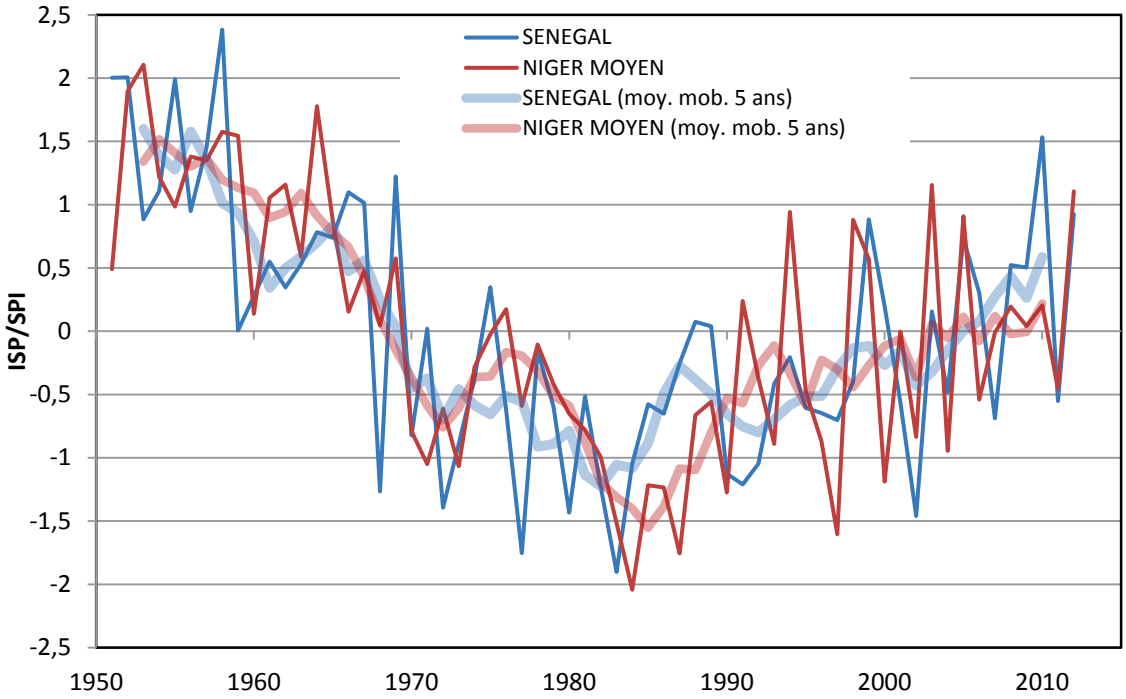

Figure 3 : Evolution de 1951 à 2013 de l'indice pluviométrique (ISP : Indice Standardisé des Précipitations) et de sa moyenne mobile sur 5 ans pour la Sénégambie et le bassin du Niger Moyen. *1951-2013 period trends of the SPI (Standard Precipitation Index) and its 5-years mobile average (Standard Precipitation Index) for Senegambia and the Middle Niger River Basin.*

L'analyse montre que la même dynamique d'ensemble de la moyenne mobile sur cinq ans des précipitations annuelles est valable au Sénégal et dans le bassin du Niger Moyen (figure 3). Toutefois, ces toutes dernières années, la reprise des pluies semble « s'essouffler » dans le Niger Moyen, alors qu'elle se poursuit en Sénégambie (figures 3 et 4). Dans les deux régions, l'évolution est globalement la même quelle que soit la latitude, comme le montre la figure 4 où les données des deux sous-régions ont été découpées en trois sous-espaces (Nord, Centre et Sud) pour illustrer le gradient pluviométrique latitudinal.

La diminution (1970-1990) (Dacosta *et al*., 2002) puis la remontée (après 1995) des précipitations apparaissent plus marquées sur la zone littorale que sur la zone interne du Sahel. Dans le cas de la station de Dakar (aéroport de Yoff), la baisse de la pluviométrie après 1968 est bien plus marquée qu'ailleurs (figure 5), la remontée étant par contre moins

prononcée ; comme on observe les mêmes tendances à Saint-Louis (Dacosta *et al*., 2002) (et de manière moindre, à Louga), on peut émettre l'hypothèse d'une aridification du climat plus marquée aux abords de l'Océan Atlantique, ce qui est également souligné par Fall *et al*, (2006).

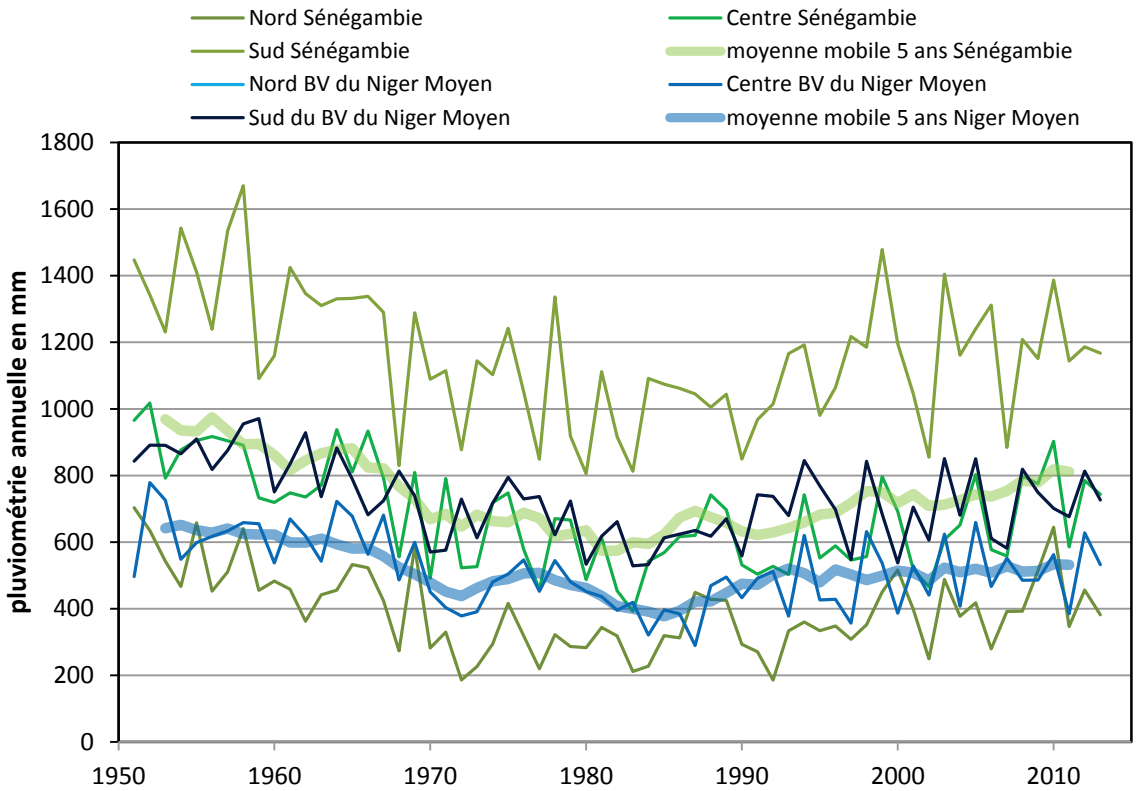

Figure 4 : Evolution de la pluviométrie annuelle moyenne en Sénégambie et dans le Bassin du Niger Moyen de 1951 à 2013. *Mean annual rainfall evolution in Senegambia and the Middle Niger River Basin from 1951 to 2013.*

On a cru pendant quelques années que la remontée des précipitations ne concernait pas la partie ouest du Sahel (Lebel et Ali, 2009), mais celle-ci y est bien arrivée, avec 5 ou 6 ans de retard sur le Sahel intérieur (voir plus bas). La diminution des précipitations a été observée dans toute l'Afrique de l'Ouest (Camberlin *et al*., 2002), y compris dans les zones côtières du Golfe de Guinée (Moron, 1994), où les deux saisons des pluies ont pu être concernées (Janicot et Fontaine, 1997) ; au Sahel, c'est surtout le nombre d'évènements pluvieux qui a diminué, plus que le volume précipité par évènement (Le Barbé et Lebel, 1997).

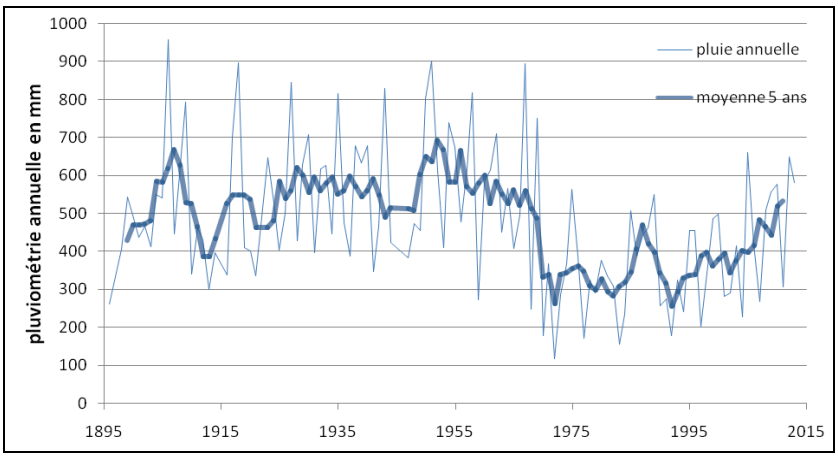

Figure 5 : Evolution de la pluviométrie annuelle à Dakar de 1895 à 2013, avec la présence d'une rupture nette de stationnarité après 1968. *Annual rainfall evolution at Dakar station from 1895 to 2013: a remarkable break occurred after 1968.*

Deux éléments sont souvent cités ces dernières années pour expliquer respectivement l'augmentation de la fréquence des inondations et la baisse des rendements agricoles en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne : une augmentation de l'intensité des précipitations (Descroix *et al*., 2013 ; Panthou *et al*., 2014) et une diminution de la durée de la saison des pluies, ce qui a été observé depuis quelques années durant les sécheresses (Diop *et al*., 1996; Balme *et al*., 2005).

Avant une analyse plus précise des jours pluvieux à fort cumul, nous analysons déjà la hauteur moyenne tombée par jour de pluie, en divisant la précipitation annuelle moyenne par décennie par le nombre de jours pluvieux de l'année. Dans les deux fenêtres régionales, on observe une évolution similaire de la pluviométrie, qui diminue fortement pendant les décennies 1970 et 80 pour remonter lentement ensuite ; le nombre d'évènements pluvieux (supérieurs à 0,5 mm par jour) suit à peu près la même évolution, de manière un peu plus marquée dans le Moyen Niger qu'en Sénégambie (figure 6).

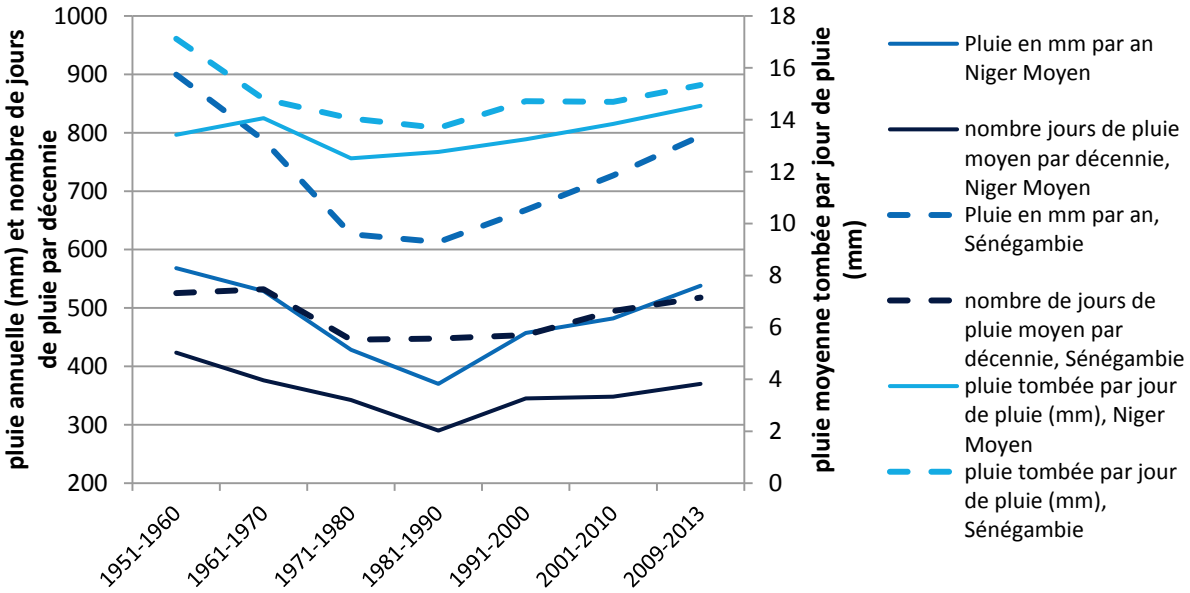

Figure 6 : Evolution décennale de la pluie, du nombre de jours de pluie et de la hauteur moyenne tombée par jour de pluie au Sénégal et dans le Bassin du Niger Moyen (calculés sur la période 1951-2013) ; la dernière période prise en compte est de 5 ans (2009-2013). *Decennial evolution of rainfall, yearly number of rainy days, and mean daily rainfall per rainy day in Senegambia and in the Middle Niger River Basin; the last period is a 5-years one 2009-2013.*

3. Evolution des pluies de fort cumul journalier

Les séries statistiques constituées par la valeur maximale de la pluie en 24 h (partie droite du tableau 1) sont à la fois bien plus souvent aléatoires que celles constituées par le total de la pluviométrie annuelle, et elles comportent bien moins de ruptures temporelles. Par ailleurs, les segmentations opérées par la procédure de Hubert (Hubert *et al*., 1989 ; Paturel *et al*., 1996 ; Boyer, 2002) correspondent, pour une grande proportion des stations, au début, assez brutal, de la grande période sèche 1968-1995 (21 cas sur 28 signalés en gras dans le tableau 1) ; inversement, dans les séries des valeurs maximales annuelles de pluie en 24 h, elles ne correspondent que dans 3 cas sur 28 au début de cette sécheresse ; pour cette variable, les ruptures chronologiques identifiées correspondent aux évènements vraiment extrêmes (*i.e.* 230 mm en 1932 à Dakar, ou 261 mm en 2009 à Ouagadougou). On entrevoit probablement là une limite de la méthode de segmentation. La série des maxima journaliers par année pour la station de Dakar ne montre en effet pas d'autre rupture que celle-là ; une diminution relative

de la valeur des maxima annuels est perceptible entre 1968 et 1995 mais elle n'est pas significative (figure 7). Cela provient d'un effet d'échantillonnage, très fort dans ce type de série (Panthou *et al*., 2013). Le seul évènement notoire est celui de 1932 (215 mm en 24 h) ; le deuxième plus fort cumul en 24 h est celui observé le 26 août 2012 (Descroix *et al*., 2015), soit près de 161 mm ; sept autres évènements de valeur semblable (plus de 144 mm) sont observés entre 1927 et 1996.

STATION	PERIODE	TENDANCES ET RUPTURES DE LA PLUVIOMETRIE						TENDANCES ET RUPTURES DES MONTANTS PLUVIO MAX EN 24 H						
SENEGAL		aléatoire	ruptures	segment 1	segment 2	segment 3	segment 4	aléatoire	rupture	segment 1	segment 2	segment 3	segment 4	segment 5
ST LOUIS	1856-2013	N	O	1856-1927	1929-1950	1951-1958	1959-2013	O	N	1856-2013				
DAKAR	1896-2013	N	O	**1896-1969**	**1970-2013**			O	N	1896-1931	1932-1932	1933-2013		
ST LOUIS	1951-2013	N	O	1951-1955	**1956-1969**	**1970-2013**		O	O	1951-1958	1959-2013			
DAKAR	1951-2013	N	O	**1951-1969**	**1970-2013**			O	N	1951-1961	**1962-1964**	**1965-2013**		
DIOURBEL	1951-2013	N	O	1951-1958	**1959-1972**	**1973-2013**		N	O	1951-2013				
KAOLACK	1951-2013	N	O	1951-1958	**1959-1971**	**1972-1998**	1999-2013	O	N	1951-2013				
KEDOUGOU	1951-2013	N	O	1951-1953	1954	1955-2013		O	N	1951-2013				
KOLDA	1951-2013	N	O	**1951-1964**	**1965-2005**	2006	2007-2013	N	O	**1951-1971**	**1972-2013**			
KOUNGHEUL	1951-2013	N	O	**1951-1966**	**1967-2002**	2003-2013		O	N	1951-1959	1960-2013			
LINGUERE	1951-2013	O	O	1951-1961	1962-2008	2009-2013		O	N	1951-2013				
MATAM	1951-2013	N	O	**1951-1966**	**1967-1998**	1999-2013		O	N	1951-2013				
PODOR	1951-2013	O	O	1951-1954	1955	1956-2013		O	O	**1951-1964**	**1965**	1966-2013		
TAMBACOUNDA	1951-2013	N	O	**1951-1966**	**1967-2013**			O	N	1951-2013				
VELINGARA C	1951-2013	N	O	**1951-1967**	**1968-2013**			O	N	1951-2013				
ZIGUINCHOR	1951-2013	O	O	**1951-1967**	**1968-2007**	2008-2013		O	N	1951-1998	1999	2000-2009	2010-2013	
SENEGAL	1951-2013	N	O	1951-1958	**1959-1969**	**1970-1998**	1999-2013							
NIGER MOYEN		aléatoire	ruptures	segment 1	segment 2	segment 3	segment 4	aléatoire	rupture	segment 1	segment 2	segment 3	segment 4	segment 5
BOGANDE	1951-2013	O	O	**1951-1968**	**1969-1993**	1994-2013		O	N	1951-2013				
GOROM GOROM	1951-2013	O	O	**1951-1969**	**1970-2000**	2001-2013		N	N	1951-2004	2005-2006	2007-2013		
DORI	1951-2013	N	O	**1951-1966**	**1967-2013**			O	N	1951-2013				
FADA N GOURMA	1951-2013	N	O	**1951-1964**	**1965-2013**			O	N	1951-1959	1960-2013			
OUAGA AEROPORT	1951-2013	N	O	1951-1976	1977-2013			O	N	1951-2008	2009	2010-2013		
NIAMEY	1951-2013	N	O	**1951-1969**	**1970-2013**			O	N	1951	1952	1953-2013		
GAO	1951-2013	N	O	1951-1959	1960-2013			N	O	1951-1952	1953-1954	1955-1974	1975	1976-2013
MENAKA	1951-2013	N	O	**1951-1967**	**1968-1997**	1998-2013		O	N	1951-2013				
SEBBA	1951-2013	N	O	**1951-1967**	**1968-2013**			N	O	1951-1979	1980	1981-2013		
DJIBO	1951-2013	N	O	**1951-1965**	**1966-1981**	1982-1993	1994-2013	N	O	1951-1981	1982-2005	2006	2007-2013	
HOMBORI	1951-2013	N	O	1951-1958	1959-1981	1982-1990	1991-2013	N	N	1951-2013				
AYOROU	1951-2013	O	O	**1951-1966**	**1967-1997**	1998-2013		O	N	1951-2013				
MOY NIGER MOYEN	1951-2013	N	O	**1951-1965**	**1966-1980**	1981-1990	1991-2013							

Tableau 1 : Tendances et ruptures repérées dans les séries pluviométriques, pluviométrie annuelle et maximum en 24 h, sur la période 1951-2013 (et aussi respectivement depuis 1856 et 1896 pour Saint-Louis et Dakar). Le test de corrélation sur le rang détermine si une série est aléatoire ou non ; les tests de Buishand et de Pettitt déterminent l'existence de ruptures dans une série. La procédure de Hubert (Hubert *et al.*, 1989) permet de segmenter une série statistique en sous-séries plus homogènes ; les périodes signalées en gras (doublons) indiquent les ruptures concordant avec le début de la période sèche (1968-1995). O = Oui, N = Non signifie que la série est aléatoire ou non ; qu'elle comporte une rupture ou non ; les stations Saint-Louis et Dakar, qui ont les deux plus longues séries d'observations en Afrique de l'Ouest, sont traitées sur la période 1951-2013 afin qu'elles soient comparables aux autres séries, et aussi sur la série entière pour montrer les différences éventuelles sur le long terme.

Trends and breaks observed in the rainfall series (annual rainfall and maximum rainfall in 24h) for the 1951-2013 period (also 1858-2013 and 1896-2013 series for Saint Louis and Dakar respectively). Rank correlation test determines whether a series is random or not; Buishand and Pettitt tests determine the presence of breaks in a series. Hubert process (Hubert et al., 1989) allows obtaining a segmentation of a statistical series into more homogeneous sub series; series in bold indicate breaks matching with the beginning of the dry period (1968-1995). O = Oui (Yes), N = Non (No) means whether the series is random or not; whether it contains a break or not; for Saint Louis and Dakar stations, which are the longer observation stations in whole West Africa, the period 1951-2013 is analyzed to allow comparison with the other series, and the entire series is also analyzed to show potential differences in the long term.

On s'intéresse à présent et arbitrairement aux jours de pluie caractérisés par des montants de plus de 60, 80 et 100 mm en 24 h. Nous avons classé ces jours par décennie afin d'avoir un nombre significatif d'éléments dans la population des jours de pluie. Pour arriver aux années récentes, nous avons rajouté la période de 5 ans 2009-2013 ; l'évolution de ces 6 décennies et demie est assez similaire dans les deux régions (Sénégambie et Bassin du Niger Moyen), que ce soit en terme de nombre de jours de pluie ou de cumul précipité (figures 8a et 8b). La seule différence notoire est qu'en Sénégambie, le nombre de jours de pluie de fort cumul ainsi que les pluies observées ces jours-là ont augmenté durant la décennie 1991-2000 pour diminuer

ensuite durant la décennie suivante, mais réaugmenter nettement lors de la période 2009-2013.

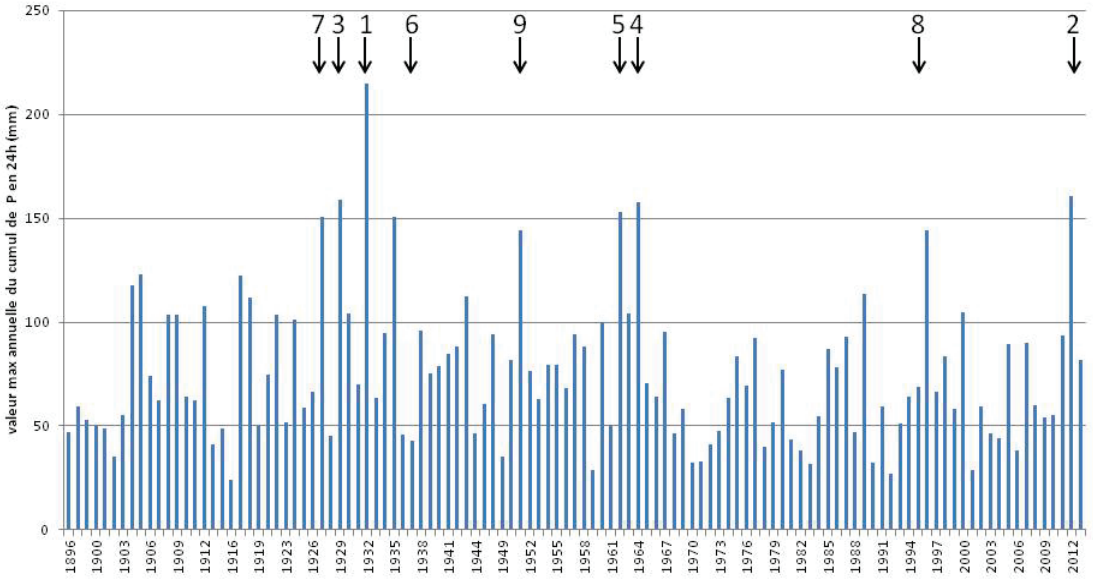

Figure 7 : Maximum annuel (en mm) de précipitation tombée en 24 h à la station de Dakar (1896-2013). Sont indiquées, avec leur numéro d'ordre, les 9 valeurs supérieures à 140 mm en 24 h. *Yearly maximum value of precipitation in 24h at Dakar station (1898-2013). Numbers indicate the order of the nine higher values (more than 140 mm in 24h).*

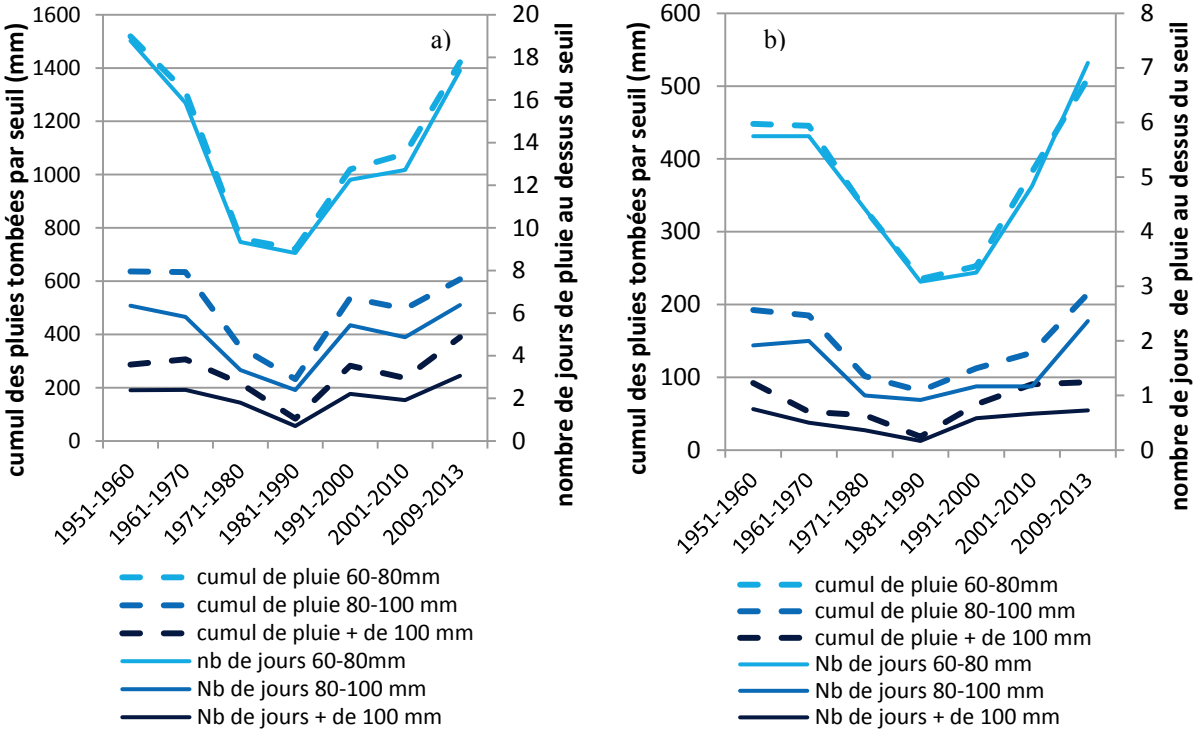

Figure 8 : Evolution des précipitations de fort cumul en 24 heures en Sénégambie (a) et dans le bassin du Niger Moyen (b) : nombre de jours de précipitations supérieures à 60, 80 et 100 mm en moyenne annuelle et cumul de pluie apporté par ces jours de pluie intense (valeur absolue par décennie, arbitrairement multipliée par deux pour la période de cinq ans 2009-2013). *Evolution of high daily precipitation events in Senegambia (a) and in the Middle Niger River Basin (b): number of days with rainfall higher than 60, 80 and 100 mm in 24h (annual mean), and cumulated rainfall for these intense rainy days (total per decade, X 2 for the 2009-2013 5-years period).*

On observe aussi une différence dans la répartition des cumuls des évènements journaliers concernés. En Sénégambie, le nombre de jours de pluie de plus de 80 et 100 mm/24 h, ainsi que les cumuls pluviométriques correspondants (figures 8 a et 8b) ont atteint voire dépassé, uniquement pour la dernière période de 5 ans (2009-2013), les valeurs maximales observées avant la sécheresse. Alors que dans le Moyen Bassin du Niger, ce sont les pluies de plus de 60 mm/jour qui ont dépassé en nombre comme en cumul, les valeurs observées durant cette dernière décennie. Panthou *et al.* (2014) observent de même une augmentation à la fois du nombre de jours de précipitations élevées (qu'ils nomment "extrêmes") et du total de précipitation observée pour ces jours-là. Ils rejoignent en cela les observations faites sur les causes climatiques des nombreuses inondations urbaines ces dernières années en Afrique de l'Ouest (recensées dans Descroix *et al*., 2015) mais qui ont aussi touché les zones rurales (Paeth *et al*., 2010) ; ces auteurs démontrent l'existence d'une cause "édaphique" (les sols de plus en plus encroûtés et imperméabilisés) à ce surcroît d'inondations, mais aussi d'une "intensification" des pluies, révélée par un accroissement du nombre des évènements les plus abondants. Ceci était déjà observé à une échelle plus continentale par New *et al.* (2006).

4. Evolution de la durée et de l'efficacité agronomique d'une saison des pluies

Une grande pratique du terrain nous permet de constater que les paysans sahéliens se plaignent souvent d'une plus grande irrégularité intra-saisonnière des précipitations. Cette irrégularité a été confirmée par les travaux de Balme *et al.* (2005 et 2006), Sultan *et al.* (2000 et 2005), et Marteau *et al.* (2009 et 2011).

Dans cette partie, les analyses portent sur les démarrages et fins de saison des pluies d'un point de vue climatique (*i.e.* le premier évènement notoire, ici arbitrairement la première pluie de plus de 10 mm - et pour la fin, le dernier épisode de 10 mm). D'un point de vue agronomique, nous avons adopté ici le mode de détermination proposé par Sivakumar (1988), tel que repris par Balme *et al*. (2005). Le début de l'hivernage est donc considéré comme la première précipitation ou ensemble d'évènements produisant plus de 20 mm en moins de trois jours et non suivi par une phase sèche de plus de 7 jours pendant le mois suivant. C'est cette configuration qui manque souvent pour une "bonne" mousson au niveau agronomique, et on observe fréquemment des séquences sèches de 15-20 jours dans le premier mois ; de même, la fin agronomique est le dernier évènement de plus de 10 mm non précédé par un épisode sec de plus de 20 jours (Sivakumar, 1988).

Il est admis, depuis quelques années, que les années 1950-1967 ont été particulièrement humides en Afrique de l'Ouest (Nicholson, 2005 et 2013). Cela s'est clairement traduit aussi par des hivernages plus longs tant en Sénégambie (figure 9a) qu'au Sahel central (figure 9b pour le Niger Moyen). Pendant la sécheresse, l'hivernage « agronomique » a été bien plus court qu'auparavant, avec une durée moyenne de 70 jours en Sénégambie (figure 9a), ce qui semble dû essentiellement à un démarrage tardif des pluies, après le 200ème jour (soit fin juillet) au lieu de début juillet auparavant. Depuis, le début de l'hivernage redevient un peu plus précoce.

Pour la fenêtre du Sahel intérieur (figure 9b), on observe la même diminution de la durée de la mousson agronomique. Il y a une remontée après la première phase de sécheresse du début des années 1970, et une seconde diminution brutale au début des années 1980, la durée s'abaissant à moins de 60 jours contre 70 jours lors de la période humide précédente. Là aussi, c'est le démarrage tardif des pluies qui explique l'essentiel de ce raccourcissement, car se produisant alors mi-juillet (jour 195) au lieu de début juillet (jour 185). Par contre, la remontée, très rapide aussi, de la durée de l'hivernage après les phases sèches, semble

interrompue au début des années 2000, la durée se stabilisant vers une durée inférieure à 65 jours.

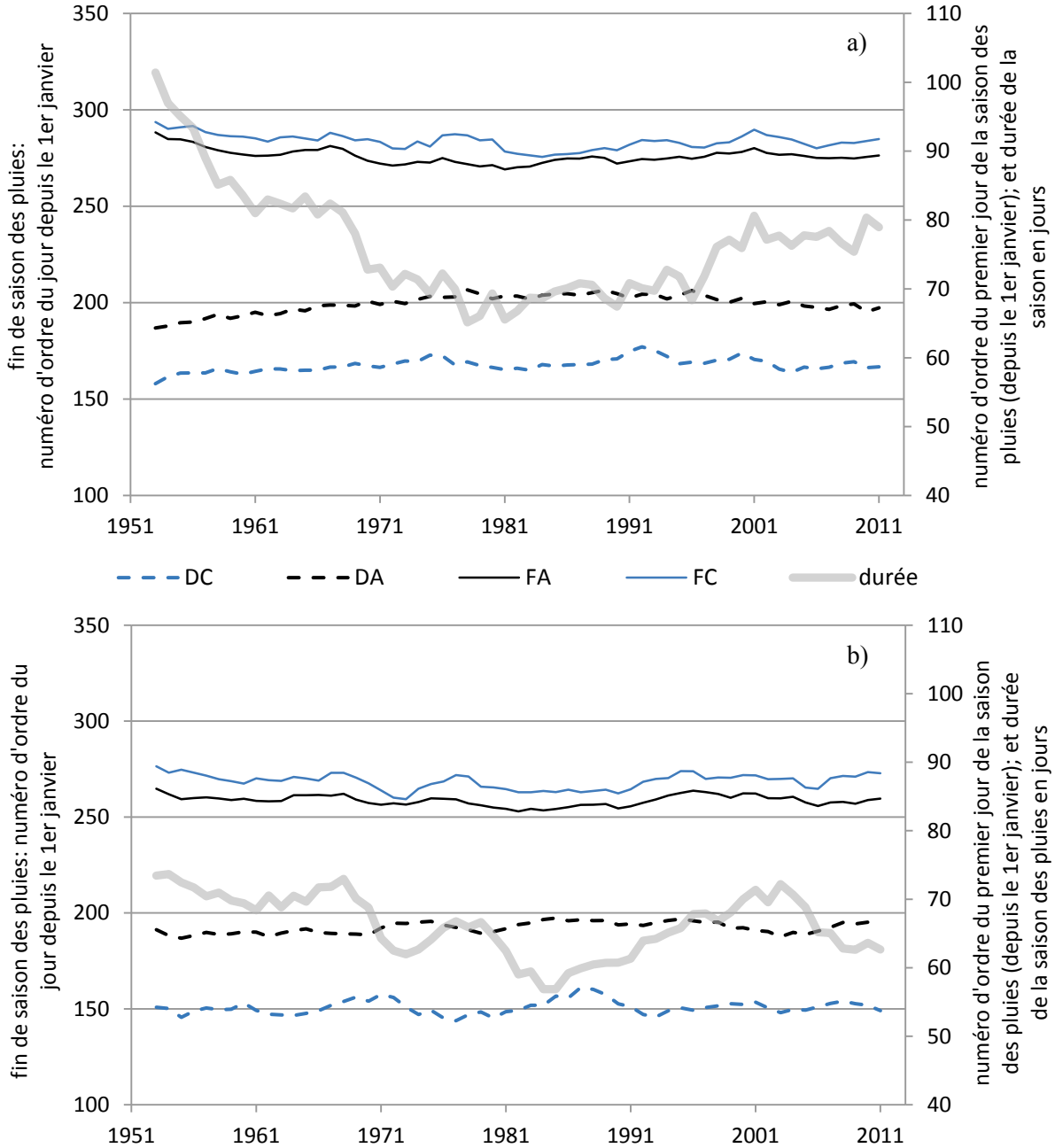

Figure 9 : Date de début et de fin climatique et agronomique, ainsi que la durée de la saison des pluies entre 1951 et 2013 : a) en Sénégambie ; b) dans le bassin du Niger Moyen (DC = début climatique ; DA = début agronomique ; FA = fin agronomique ; FC = fin climatique). *Date of climatic and agronomic beginning, end and duration of rainy season from 1951 to 2013. a) in Senegambia; b) in the Middle Niger River Basin; (DC: climatic beginning ; DA: agronomic onset; FA : agronomic end; FC: climatic end).*

Un ouvrage récent, paru en novembre 2015, est consacré à l'impact des changements climatiques et environnementaux sur les sociétés rurales en Afrique de l'Ouest (Sultan *et al.*, 2015). Dans cet ouvrage, on retiendra ici principalement que Sultan *et al.* (2015) rejoignent Roudier *et al.* (2011) pour montrer l'impact des changements climatiques sur les rendements céréaliers présents et futurs ; pour ces derniers, ils prévoient un impact plus fort du réchauffement et d'un démarrage tardif des pluies, attendus dans quelques décennies, dans l'Ouest du Sahel (le Sénégal en particulier) qu'au centre de celui-ci (Niger et Burkina Faso).

A l'inverse, de manière plus positive (car ne faisant pas de projections sur le futur ?), Muller *et al*. (2015) constatent un regain récent et spectaculaire de la culture du mil sanio dans les paysages du Sine (Ouest du Sénégal) ; il s'agit d'une espèce à cycle long, qui se révèle un excellent marqueur de la remontée pluviométrique observée depuis une quinzaine d'années au Sénégal (contre vingt ans au Sahel central). Ce surplus de pluie, observé surtout en fin d'hivernage, permet le retour d'une céréale qui avait presque disparu après les grandes sécheresses des années 1970 et 1980.

Au moment de ces grandes sécheresses (le déficit a perduré, comme on l'a vu, de 1968 à 1995), on a donc bien assisté, en plus d'une baisse de la pluviométrie, à une diminution de la durée de la saison pluvieuse « agronomique », dans les deux régions et dans les deux cas, principalement liée à un démarrage tardif de la saison (Sultan *et al*., 2013).

Reste à déterminer si ces hivernages, devenus plus longs ces toutes dernières années ont connu une bonne répartition des pluies durant la saison, tant il est vrai que même le mil, qui est la céréale la mieux adaptée au contexte sahélien semi-aride, a besoin d'une bonne pluie au minimum chaque semaine. Le tableau 2 est instructif à ce sujet puisqu'il répertorie les années durant lesquelles la saison agroclimatique ne s'est jamais déclarée suivant les critères de Sivakumar (1988) cités ci-dessus. On constate logiquement que ces critères sahéliens deviennent peu restrictifs pour les stations les plus méridionales, au climat soudanien, puisque des stations comme Kolda et Kedougou au Sénégal, ou bien Fada et Ouagadougou au Burkina Faso, n'ont connu aucune saison « ratée » depuis 1951.

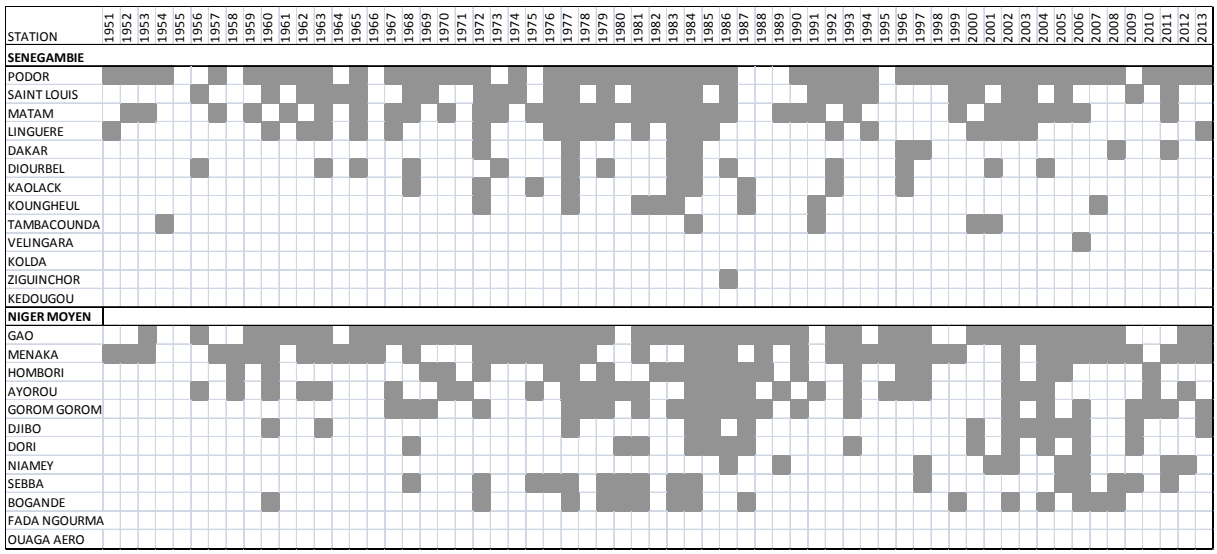

Tableau 2. Fréquence des moussons « ratées » (au sens de la normalité de la saisonnalité agroclimatique) ne s'étant pas produites suivant les critères de Sivakumar (1988) sur la période 1951-2013 : aucun évènement de plus de 20 mm ne s'est produit, qui n'ait pas été suivi pas au moins un épisode sec durant le premier mois qui l'a suivi ; les cases grisées correspondent aux saisons « ratées » au niveau agronomique. Dans les deux fenêtres géographiques, les stations sont classées du Nord au Sud. *Frequency of « false » monsoon occurrences, when Sivakumar (1988) criteria did not apply from 1951 to 2013: no rainfall event of more than 20 mm in 3 consecutive days, which were not followed by at least one dry period during the following first month; grey squares are "false" rainy seasons at the agronomic level. Within each one of the two areas, stations are classified from North to South.*

Par ailleurs, on constate que :

- dans les deux "fenêtres", le nombre de saisons ratées diminue logiquement vers le sud ;
- dans les deux cas également, on distingue bien l'épisode sec de 1968-1995, avec des années particulièrement sèches partout comme 1972, 1977 ou 1983-1984 ;

- par contre, pour la fenêtre interne du Sahel, après une phase de répit durant les années 1990, on observe une augmentation très sensible des années sans mousson agronomique organisée durant les années 2000, sans que celles-ci aient connu de baisse des précipitations ; cet élément indique donc bien que la répartition temporelle des pluies a été modifiée durant la saison et confirme que la pluviométrie annuelle totale n'est pas suffisante pour obtenir une bonne récolte.

Ceci peut être une explication à l'exacerbation en cours du « paradoxe hydrologique du Sahel » avec l'augmentation sensible des coefficients d'écoulement des bassins (Descroix *et al.*, 2012 ; Descroix *et al.,* 2015). Par ailleurs, le récent ouvrage de synthèse, cité plus haut (Sultan *et al*., 2015), offre un panorama des changements climatiques tels qu'ils ont été observés depuis un siècle en Afrique de l'Ouest, ainsi que des prévisions issues de plusieurs modèles. Il permet de comprendre les impacts que la longueur de la mousson ou son simple retard, ou encore l'évolution des précipitations extrêmes, peuvent avoir sur les rendements agricoles, donc sur le bien-être des sociétés rurales et la sécurité alimentaire.

Enfin, le fait que le retour des pluies, globalement très positif pour les sociétés rurales, ne soit pas toujours perçu ou reconnu, pourrait être lié aux dégradations subies par les sols et la végétation durant la phase de sécheresse, tant au Niger ou au Burkina (Descroix *et al*., 2012), qu'au Mali (Kergoat *et al.,* 2015). En effet, la végétation a parfois été irrémédiablement détruite, les sols très indurés ou encroûtés. Cela s'est traduit par une très forte réduction de la capacité de rétention en eau des sols, ce qui provoque, depuis quelques années, un accroissement notoire des inondations. Ces sols qui n'absorbent plus d'eau, ayant perdu structure et nutriments pour ce faire, sont peut-être à l'origine du défaut de perception fréquemment observé de l'amélioration pluviométrique. L'eau ruisselle au lieu de profiter aux sols et à la végétation ; on peut résumer la situation en disant qu'à une sécheresse climatique a souvent succédé une sécheresse édaphique.

Les paysans ont pourtant souvent été les premiers à se rendre compte de ce qu'ils perçoivent comme une amélioration ; cependant, les rendements ont certes augmenté, mais moins que ce que l'augmentation des pluies laisserait prévoir, du fait de l'augmentation déjà sensible des températures (Roudier *et al.*, 2011 ; Sultan *et al*., 2015) ; cela a été assez rapide dans le Sahel où les sols sont très pauvres et où le quasi seul « intrant » est l'eau de pluie. Parfois, vers 2005, les paysans ont aussi pu percevoir que leurs pratiques agricoles mêmes « produisaient » du ruissellement, et spontanément se remirent à pratiquer les méthodes ancestrales, issues des savoirs locaux, de l'agro-foresterie. Il s'agit en particulier de ce qu'on appelle pompeusement la RNA (Régénération Naturelle Assistée), c'est-à-dire le fait de laisser des arbres (en particulier des légumineuses) pousser dans les champs, afin de limiter l'érosion éolienne et hydrique, et de faciliter la fixation de l'azote qui manque cruellement aux sols sableux du Sahel (Larwanou *et al*., 2006 ; Reij *et al*., 2009) mais aussi plus simplement, d'un grand nombre d'initiatives surgies d'un village ou d'une association pour reverdir le Sahel (Luxereau et Roussel, 1997).

La recrudescence des inondations (Sighomnou *et al*., 2013 ; Descroix *et al.*, 2015) est presque "normale" du fait que les sols sont dégradés par les années de déficit et parfois, par la surexploitation, et aussi parce que les pluies ont augmenté. Elles ont repris des valeurs plus proches de celles qu'on observait au début du 20ème siècle, mais cela n'est pas toujours gage d'une bonne répartition durant la saison. Et si les pluies augmentent plus tôt au Sahel intérieur qu'en Sénégambie, il semble que le nombre de "moussons ratées" soient à nouveau en augmentation ces dernières années, sans qu'on ne note pour autant de réduction des cumuls annuels précipités.

Conclusion

La pluviométrie des deux sous-espaces ouest-africains étudiés ici a recommencé à augmenter au milieu ou à la fin de la décennie 1991-2000, suivant les stations analysées. Mais elle n'a nulle part atteint les valeurs annuelles des décennies 1950-70, qui étaient elles-mêmes excédentaires par rapport à la moyenne à long terme (1900-2015, voir figure 1). Elle s'est accompagnée d'une augmentation de la hauteur précipitée moyenne par jour de pluie, mais surtout, d'une augmentation plus prononcée de l'occurrence des jours de pluie de fort cumul (pluies "extrêmes"), et cela dans les deux sous-régions étudiées ici (la Sénégambie et le bassin du fleuve Niger Moyen).

Une analyse des séries chronologiques révèle l'importance de la grande période sèche (1968 à 1993 au Sahel central, 1968 à 1999 en Sénégambie), dont le début est dans toutes les stations ou presque, une date de rupture stationnelle dans la série. La fin de la sécheresse est moins nette et moins marquée, et de ce fait moins souvent marquée par une rupture C'est beaucoup plus rarement le cas pour les séries du maximum de pluie en 24 h. Enfin, les dates de début de la saison des pluies sont redevenues bien plus précoces avec le retour des pluies, dès la fin des années 1990 ; les dates de fin de mousson ont moins évolué. Cependant, on note une nette augmentation de la durée de la mousson. Mais alors que l'augmentation des pluies s'est plus fait attendre à l'Ouest (Sénégambie) qu'au Sahel central (Niger Moyen), elle y semble plus prononcée, plus franche et plus durable alors qu'elle semble marquer le pas à l'intérieur du Sahel. C'est peut-être une des explications au fait que les "mauvaises" moussons en termes agronomiques ont recommencé à devenir plus nombreuses ces dernières années dans le bassin du Niger Moyen.

Quoiqu'il en soit, le retour des pluies n'est peut-être pas aussi bénéfique en termes de ressources en eau et en termes de rendements culturaux. En effet, il a exacerbé le "paradoxe hydrologique du Sahel", à savoir l'augmentation des écoulements observée depuis le début de la sécheresse en 1968, et n'a pas entraîné pour l'heure de très forte hausse de rendements agricoles. Une explication commune à ces deux processus tient à la dégradation des sols et de la végétation qui s'est opérée durant ces années de sécheresse, limitant considérablement la capacité de rétention en eau des sols, des champs, des terroirs et des bassins versants. La majeure partie de l'espace sahélien connaissant un ruissellement majoritairement hortonien, une hausse des intensités de pluie infra-journalières accentue encore les écoulements et le risque d'inondation.

Ceci explique peut-être pourquoi tant d'acteurs (agriculteurs, éleveurs, bûcherons, autres acteurs du monde rural), n'ont toujours pas réellement perçu le retour du Sahel à une pluviométrie plus élevée.

Remerciements : Les Directions Météorologiques Nationales du Sénégal (ANACIM), du Burkina Faso, du Mali et du Niger ont fourni les données pluviométriques journalières, qu'elles en soient grandement remerciées ici. Nous avons bénéficié du FSP PARRAF grâce au projet RHYVA qui a appuyé ce travail. Enfin, celui-ci a été partiellement financé par les programmes ANR ECLIS (ANR-08-VULN-003-01) et ESCAPE (ANR-10-CEPL-005). Enfin, un grand merci aux deux réviseurs du premier manuscrit qui nous ont permis de bien l'améliorer grâce à leurs remarques constructives.

Références bibliographiques

ALI A., LEBEL T., 2009 : The Sahelian standardized rainfall index revisited. *Int. J. Climatol.*, 29, 1705-1714.

BALME M., GALLE S. & LEBEL T., 2005 : Démarrage de la saison des pluies au Sahel : variabilité aux échelles hydrologique et agronomique, analyse à partir des données EPSAT-Niger. *Sécheresse,* 16 (1), 15-22.

BALME M., LEBEL T., AMANI A., 2006 : Années sèches et années humides au Sahel : *quo vadimus* ? *Hydrological Sciences – Journal–des Sciences Hydrologiques,* 51 (2),254-271.

BODIAN A., 2014 : Caractérisation de la variabilité temporelle récente des précipitations annuelles au Sénégal (Afrique de l'Ouest). *Physio-Géo* [En ligne], Volume 8 : 297-312 | 2014, DOI : 10.4000/physio-geo.4243.

BOYER J-F., 2002 : Khronostat, logiciel d'analyse statistique de séries chronologiques. Orstom, 1998, IRD 2002, HSM, Montpellier.

CAMBERLIN P., BELTRANDO G., FONTAINE B., RICHARD Y., 2002 : Pluviométrie et crises climatiques en Afrique tropicale : changements durables ou fluctuations interannuelles ? *Historiens et Géographes*, 379, 263-273.

DACOSTA H., KONATE Y.K., MALOU R., 2002 : La variabilité spatio-temporelle des précipitations au Sénégal depuis un siècle. Friend 2002 - Regional hydrology: Bringing the Gap between Reseach and Pratice, Cape Town, South Africa, Publ. IAHS. N° 274, 499-506.

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., DIONGUE-NIANG A., DACOSTA H., PANTHOU G., QUANTIN G., DIEDHIOU A., 2013 : Evolution des pluies extrêmes et recrudescence des crues au Sahel. *Climatologie*, 10, 37-49.

DESCROIX L., MAHE G., OLIVRY J-C., ALBERGEL J., TANIMOUN B., AMADOU I., COULIBALY B., BOUZOU MOUSSA I., FARAN MAIGA O., MALAM ABDOU M., SOULEY YERO K., MAMADOU I., VANDERVAERE J-P., GAUTIER E., DIONGUE-NIANG A., DACOSTA H., DIEDHIOU A., 2015 : Facteurs anthropiques et environnementaux de la recrudescence des inondations au Sahel. In Sultan, B., Lalou, R., Sanni, M.A., Oumarou, A. et Soumaré, M.A. (Eds), « *Les sociétés rurales face aux changements climatiques et environnementaux en Afrique de l'Ouest* », Ed. IRD, 153-170.

DIOP M., HOUNDENOU C., RICHARD Y., 1996 : Variabilité des dates de début et de fin de l'hivernage au Sénégal (1950-1991). *Publ. Assoc. Intern. de Climato.,* 9, 430-436.

DONG B.-W. et SUTTON R., 2015 : Dominant role of greenhouse gas forcing in the recovery of Sahel rainfall. *Nature Climate Change*, DOI:10.1038/nclimate2664.

FALL A., 2014 : *Le Ferlo sénégalais : Approche géographique de la vulnérabilité des anthroposystèmes sahéliens*. Thèse de doctorat, Université Paris 13, 380 p.

FALL S., NIYOGI D., SEMAZZI F.H.M., 2006 : Analysis of mean climate conditions in Senegal (1971-1998). *Earth Interactions*, 10 (5), 1-40.

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.

JANICOT S. et FONTAINE B., 1997 : Evolution saisonnière des corrélations entre précipitations en Afrique guinéenne et températures de surface de la mer (1945-1994). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, série IIa*, 324, 785-792.

JANICOT S. et SULTAN B., 2001 : Intra-seasonal modulation of convection in the West African Monsoon. *Geophysical Research Letters*, 28 (3), 523-526.

KERGOAT L., GRIPPA M., HIERNAUX P., RAMAROHETRA J., GARDELLE J., DARDEL C., GANGNERON F., GAL L., DESCROIX L., 2015 : Évolutions paradoxales des mares en Sahel non cultivé. Diagnostic, causes et conséquences. In Sultan, B., Lalou, R., Sanni, M.A., Oumarou, A. et Soumaré, M.A. (Eds), « *Les sociétés rurales face aux changements climatiques et environnementaux en Afrique de l'Ouest* », Ed. IRD, 193-207.

LARWANOU M., ABDOULAYE M., REIJ C., 2006 : *Etude de la régénération naturelle assistée dans la région de Zinder (Niger).* International Resources Group, USAID: Washington, DC, USA.

LÉAUTHAUD C., DEMARTY J., CAPPELAERE B., GRIPPA M., KERGOAT L., VELLUET C., GUICHARD F., MOUGIN E., CHELBI S. et SULTAN B., 2015 : Revisiting historical climatic signals to better explore the future : prospects of water cycle changes in Central Sahel. *Proc. IAHS,* 371, 195-201. Doi : 10.5194/piahs-371-195-2015.

LE BARBE L., et LEBEL T., 1997 : Rainfall climatology of the HAPEX Sahel region during the years 1950-1990. *J. of Hydrology*, 188-189, 43-73.

LEBEL T. et ALI A., 2009 : Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990–2007). *J. of Hydrology,* 375, 52-64.

LUBES-NIEL H., MASSON J-M., PATUREL J-E. et SERVAT E., 1998 : Variabilité climatique et statistiques. Etude par simulation de la puissance et de la robustesse de quelques tests utilisés pour vérifier l'homogénéité de chroniques. *Revue des sciences de l'eau*, 3, 383-408.

LUXEREAU A. et ROUSSEL B., 1997 : *Changements écologiques et sociaux au Niger ?* Etudes africaines, L'Harmattan, 239 p.

MAHÉ G. et GIODA A., 2009 : *Les données climatiques devraient devenir publiques*. Le Monde.fr 21/12/09.

MAHÉ G., LIENOU G., BAMBA F., PATUREL 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*. In: Hydroclimatology variability and change, Proceedings of symposium held during IUGG 2011, Melbourne, Australia; IAHS pub. 344, 131-137.

MAHÉ G., LIENOU G., DESCROIX L., BAMBA L., PATUREL J-E., LARAQUE A., MEDDI M., HABAIEB M., ADEAGA O., DIEULIN C., CHAHNEZ KOTTI F. et KHOMSI K., 2013 : The rivers of Africa: witness of climate change and human impact on the environment. *Hydrol. Process.*, 27, 2105-2114 (2013) DOI: 10.1002/hyp.9813.

MARTEAU R., MORON V. et PHILIPPON N., 2009 : Spatial coherence of monsoon onset over Western and Central Sahel (1950-2000). *Journal of Climate*, 5, 1313-1324.

MARTEAU R., SULTAN B., MORON V., ALHASSANE A., BARON C. et TRAORÉ S.B., 2011 : The onset of the rainy season and farmers' sowing strategy for pearl millet cultivation in Southwest Niger. *Agric. Forest Meteorol.*, 151, 10, 1356-1369, doi:10.1016/j.agrformet.2011.05.018.

MORON V., 1994 : Guinean and sahelian rainfall anomaly índices at anual and monthly scales (1933-1990). *Int. J. Climatol.*, 14, 325-341.

MULLER B., LALOU R., KOUAKOU P., SOUMARE M.A., BOURGOIN J., DOREGO S., SINE B., 2015 : Le retour du mil sanio dans le Sine ; une adaptation raisonnée à l'évolution climatique. In Sultan, B., Lalou, R., Sanni, M.A., Oumarou, A. et Soumaré, M.A. (Eds), « *Les sociétés rurales face aux changements climatiques et environnementaux en Afrique de l'Ouest* », Ed. IRD, 377-401.

NEW M., HEWITSON B., STEPHENSON D.B., TSIGA A., KRUGER A., MANHIQUE A., GOMEZ B., COELHO C.A., MASISI D.N., KULULANGA E., 2006 : Evidence of trends in daily climate extremes over southern and West Africa. *J. Geophys. Res.,* 111, D14102.

NICHOLSON S.E., 2005 : On the question of the ''recovery'' of the rains in the West African Sahel. *Journal of Arid Environments*, 63, 615–641. doi:10.1016/j.jaridenv.2005.03.004.

NICHOLSON S.E., 2013 : The West African Sahel: A review of recent studies on the rainfall regime and its interannual variability. Hindawi Publishing Corporation ISRN Meteorology, Vol. 2013, Article ID 453521, 32 pages, http://dx.doi.org/10.1155/2013/453521.

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.

PAETH H., FINK A. H., POHLE S., KEIS F., MÄCHEL H. et SAMIMI C., 2010 : Meteorological characteristics and potential causes of the 2007 flood in sub-Saharan Africa. *Int. J. Climatol.*, 31, 1908-1926, doi:10.1002/ joc.2199.

PANTHOU G., VISCHEL T., LEBEL T., QUANTIN G., FAVRE PUGIN A-C., BLANCHET J. et ALI A., 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, 15, 8222-8237. DOI: 10.1002/jgrd.50340.

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.

PATUREL J-E., SERVAT E., KOUAMÉ B., BOYER J-F., LUBES-NIEL H., MASSON J-M., 1996 : Procédures d'identification de « ruptures » dans des séries chronologiques – modification du régime pluviométrique en Afrique de l'Ouest non-sahélienne. *IASH Publ.,* 238, 99-110.

REIJ C., TAPPAN G. et SMALE M., 2009 : *Agroenvironmental Transformation in the Sahel, Another Kind of "Green Revolution".* IFPRI Discussion Paper 00914, 2020 vision initiative; IFPRI Pub, Washington, USA.

ROUDIER P., SULTAN B., QUIRION P. et BERG A., 2011 : The impact of future climate change on West Africa crop yields: What does the recent literature say ? *Global Environment Change,* 21, 1073-1083.

SANOGO S., FINK A.H., OMOTOSHO J.A., BA A., REDL R. et ERMERT V., 2015 : Spatio-temporal characteristics of the recent rainfall recovery inWest Africa. *Int. J. Climatol.* DOI: 10.1002/joc.4309.

SIGHOMNOU D., DESCROIX L., GENTHON P., MAHÉ G., BOUZOU MOUSSA I., GAUTIER E., MAMADOU I., VANDERVAERE J.-P., TANIMOUN B., COULIBALY B., RAJOT J.-L., MALAM ISSA O., MALAM ABDOU M., DESSAY N., DELAITRE E., FARAN MAIGA O., DIEDHIOU A., PANTHOU G., VISCHEL T., YACOUBA H., KARAMBIRI H., PATUREL J.E., DIELLO P., MOUGIN 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.

SIVAKUMAR M.V.K., 1988 : Predicting rainy season potential from the onset of rains in southern Sahelian and Sudanian climatic zones of West Africa. *Agric. For. Meteorol.,* 42, 295-305.

SULTAN B. et JANICOT S., 2000 : Abrupt shift of the ITCZ over West Africa and intra-seasonal variability. *Geophysical Research Letters*, 27 (20), 3353-3356.

SULTAN B., BARON C., DINGKUHN M., SARR B. et JANICOT S., 2005 : Agricultural impacts of large-scale variability of the West African Monsoon. *Agricultural and Forest Meteorology*, 128, 95-110.

SULTAN B., 2012 : Global warming threatens agricultural productivity in Africa and South Asia. *Environ. Res. Lett*., 7, 041001.

SULTAN B., ROUDIER P., QUIRION P., ALHASSANE A., MULLER B., DINGKUHN M., CIAIS P., GUIMBERTEAU M., TRAORE S. et BARON C. 2013 : Assessing climate change impacts on sorghum and millet yields in the Sudanian and Sahelian savannas of West Africa. *Environ. Res. Lett*., 8, 014040 (9 pp), doi:10.1088/1748-9326/8/1/014040.

SULTAN B., LALOU R., SANNI M.A., OUMAROU A. et SOUMARE M.A. (Eds), 2015 : *Les sociétés rurales face aux changements climatiques et environnementaux en Afrique de l'Ouest.* Ed. IRD, Paris, 465 p.

SULTAN B., ROUDIER P., TRAORE S., 2015 : Les impacts des changements climatiques sur les rendements agricoles en Afrique de l'Ouest. In Sultan, B., Lalou, R., Sanni, M.A., Oumarou, A. et Soumaré, M.A. (Eds), « *Les sociétés rurales face aux changements climatiques et environnementaux en Afrique de l'Ouest* », Ed. IRD, 209-224.

VISCHEL T., LEBEL T., PANTHOU G., QUANTIN G., ROSSI A., MARTINET M., 2015 : Le retour d'une période humide au Sahel ? Observations et perspectives. In Sultan, B., Lalou, R., Sanni, M.A., Oumarou, A., Soumaré, M.A. (Eds), "*Les sociétés rurales face aux changements climatiques et environnementaux en Afrique de l'Ouest*", Ed. IRD, 43-60.