

Évolution des risques agroclimatiques associés aux tendances récentes du régime pluviométrique en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne

Agali Alhassane
Seyni Salack
Mohamed Ly
Issaka Lona
Seydou B Traoré
Benoît Sarr

Centre régional Agrhymet
BP 11011
Boulevard de l'Université
Niamey
Niger

<a.alhassane@agrhyment.ne>
<s.salack@agrhyment.ne>
<abutawakalt@gmail.com>
<m.ly@agrhyment.ne>
<i.lona@agrhyment.ne>
<s.traore@agrhyment.ne>
<b.sarr@agrhyment.ne>

Résumé

Dans le contexte actuel de changement climatique, la veille agro-hydro-météorologique des régions semi-arides doit être améliorée et renforcée. L'objectif de ce travail est d'utiliser des données observées en station pour identifier l'évolution spatio-temporelle des risques agroclimatiques associés aux grandes tendances du régime pluviométrique dans la bande soudano-sahélienne élargie aux parties nord de certains pays côtiers de l'Afrique de l'Ouest (Bénin, Togo, Nigeria). Les résultats montrent que sur la période 1950-2010, l'évolution du régime pluviométrique est en trois phases quasi identiques sur les cumuls (Cum), l'intensité du cumul sur trois jours consécutifs (Px3), et les longueurs de saison culturale (LSC) par rapport à la normale 1961-1990. A savoir : i) une période d'excédents de Cum et Px3 avec des LSC plus importantes (1950-1969) ; ii) une période de déficits de Cum et Px3 avec des LSC plus courtes (1970-1990) ; et iii) la période récente dont les Cum, Px3 et LSC sont très variables (1991-2010). Cependant, les dates de démarrage des saisons montrent une tendance quasi stationnaire, de 1970 à 2010. Les risques agroclimatiques de resemis, de stress post-floraison et d'occurrence de faux départs et de fins précoces des saisons des pluies sont liés aux périodes de sécheresse historique, en particulier pendant les deux dernières décennies. L'occurrence des faux départs et des fins précoces de la saison des pluies rend la distribution des événements pluvieux peu profitable à la croissance des cultures. En effet, cette distribution est bien corrélée aux déficits pluviométriques observés dans la région. Ces résultats statistiquement significatifs permettent de poser deux hypothèses majeures dans le contexte du changement du régime des pluies : i) les risques agroclimatiques de la période 1991-2010 sont restés similaires à ceux de la période de sécheresse historique 1970-1990 ; ii) les années humides sont associées à des vagues d'événements de faux départs observés de manière précoce dans la première décennie de juin ou avant. A chaque fois que des faux départs (fins précoces) sont observés au-delà de la première décennie de juin (avant fin septembre), le cumul de cette saison sera très probablement inférieur aux normales 1961-1990 et 1981-2010. Ces hypothèses peuvent servir d'éléments de renforcement des techniques utilisées dans la prévision saisonnière de la pluie et la veille agroclimatique dans la région.

Mots clés : Afrique de l'Ouest, climat soudano-sahélien, évolution spatio-temporelle, régime pluviométrique, risques agroclimatiques.

Pour citer cet article : Alhassane A, Salack S, Ly M, Lona I, Traoré SB, Sarr B, 2013. Évolution des risques agroclimatiques associés aux tendances récentes du régime pluviométrique en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne. *Sécheresse* 24 : 282-93. doi : 10.1684/sec.2013.0400

Tirés à part : S. Salack

Abstract

Evolution of agro-climatic risks related to the recent trends of the rainfall regime over the Sudano-Sahelian region of West Africa

In the present context of climate change, agro-hydro-meteorological monitoring needs to be improved and strengthened. The objective of this study is to use station data to assess the space-time evolution of some agro-climatic risks related to the main trends observed in the rainfall regime of the Sudano-Sahelian region extending to the Northern parts of some humid countries (Benin, Togo and Nigeria) of West Africa. Over the 1950-2010 period, the rainfall regime evolved in three different phases, with respect to the 1961-1990 averages, which are quasi-identical on annual total rainfall (Cum), the cumulated rainfall over three consecutive days (Px3), and the length of the cropping seasons (LSC) : i) a period of above normal Cum and Px3 with longer LSC (1950-1969) ; ii) a period of Cum and Px3 deficits with shorter LSC (1970-1990) ; and iii) the recent period in which Cum, Px3 et LSC are much variable (1991-2010). However, onset dates of the cropping season show a quasi-stationary trend from 1970 to 2010. The agro-climatic risks of re-sowing seeds, post-flowering water stress and the occurrence of false starts/early cessation of the cropping period are commonly shared by the recent two decades and the historical drought periods. The occurrence of false starts/early cessations reduces the usefulness of the rainy season to farmers and is correlated to annual rainfall deficits. Beyond the statistical significance of their characteristics, these results lead to two major hypotheses : i) the agro-climatic risks of the recent 1991-2010 period are still the same as those in the historical drought period of 1970-1990 ; ii) the humid years are embedded with events of false starts in the first ten days of June or earlier. Whenever these false start (early cessation) events occur after the first ten days of June (before end-of-September), the season is likely to have below normal rainfall with respect to the 1961-1990 and 1981-2010 averages. These hypotheses can be used to strengthen the techniques of seasonal rainfall forecast and agro-climatic projections in the region.

Key words: agroclimatic risks, rainfall regime, space-time evolution, Sudano-Sahelian climate, West Africa.

Le secteur agricole est le plus affecté par les tendances et la variabilité climatiques dans les pays en développement de l'Afrique de l'Ouest. Dans ces régions, l'agriculture vivrière pluviale occupe une place capitale dans les économies nationales. En effet, les populations de ces pays sont majoritairement rurales et exploitent des systèmes de production (agriculture, élevage) dont les performances sont étroitement soumises au climat (Bazzaz et Sombroek, 1996). Cette vulnérabilité structurelle au climat s'est particulièrement amplifiée au Sahel à la fin du xx^e siècle, suite à une réduction des précipitations concomitante à une augmentation de la population (Sultan, 2012). Au cours des années 1970 et 1980, la zone a connu une forte diminution des précipitations. Une rupture nette des séries pluviométriques est observée à partir des années 1968 jusqu'au début des années 1990 (Nicholson, 2001 ; Le Barbé *et al.*, 2002 ; Bell et Lamb, 2006). Au Sahel, les précipitations annuelles ont subi en moyenne une diminution de 20 à 40 % entre 1931-1960 et 1968-1990 contre 15 % dans les régions des forêts

tropicales humides. Pour le cas des zones soudano-sahéliennes, cette tendance s'est traduite par un glissement des isohyètes de l'ordre de 150 à 200 km vers le sud (Diouf *et al.*, 2000). Ces déficits pluviométriques ont pour corollaires la variabilité des caractéristiques de la saison agricole, dont les dates de début et de fin ainsi que l'occurrence des séquences sèches (Traoré *et al.*, 2000). Cependant, depuis le milieu des années 1990, on assiste à un retour à de meilleures conditions pluviométriques au Sahel, avec toutefois une variabilité interannuelle et intra-saisonnière accrue des précipitations, notamment sur les parties centrales et est (Lebel et Ali, 2009). Les mêmes tendances ont été observées par Salack *et al.* (2011) sur le Sénégal et par Lodoum *et al.* (2009) sur le Burkina Faso. Cette variabilité accrue des pluies tend à rendre de plus en plus difficile la planification agricole. Toutefois, ce retour apparent des conditions humides coïncide avec l'accélération du réchauffement climatique dans le monde (IPCC, 2007). Ces conditions favorables sont le plus souvent associées à des pluies intenses et de plus en plus

fréquentes occasionnant des inondations et de nombreux dégâts en Afrique de l'Ouest (Sene et Ozer, 2002 ; Sarr, 2011). Les sécheresses des années 1970 et 1980 et les fortes pluies récurrentes des années 2000 qui ont frappé la zone, constituent quelques-uns des événements extrêmes qui seraient amplifiés par les changements climatiques (IPCC, 2012). Ces changements ont d'ores et déjà des impacts évidents sur les secteurs de l'agriculture et de l'élevage. Par exemple, la diminution des cumuls pluviométriques peut expliquer 35 à 45 % de baisse des rendements des cultures au Sahel (Sivakumar, 1992 ; Sultan *et al.*, 2005). Par ailleurs, si des mesures d'adaptation ne sont pas prises, des baisses de rendement des cultures céréalières sont attendues en Afrique subsaharienne, à l'horizon 2050 (ECOWAS-SWAC/OECD, FAO et CILSS, 2008). Dans les décennies à venir, les hypothèses de changement du régime pluviométrique pourraient avoir un effet négatif global sur la production du mil, maïs et sorgho (Sultan, 2012 ; Berg *et al.*, 2013), avec des possibilités d'atteindre des seuils critiques

d'insécurité alimentaire dans de nombreuses régions de l'Afrique de l'Ouest (Roudier *et al.*, 2011 ; Sultan *et al.*, 2012).

Les changements du régime pluviométrique de la sous-région ouest-africaine sont depuis longtemps sujets de débat (L'Hôte *et al.*, 2002 ; Ozer *et al.*, 2003 ; Chappell et Agnew, 2004 ; Dai *et al.*, 2004), car les méthodes d'analyses ne sont pas toutes adéquates et les résultats sont loin d'être unanimes. Ainsi, lorsque L'Hôte *et al.* (2002) se basent sur l'utilisation des indices standardisés des précipitations (SPI), ils trouvent que la sécheresse est encore en cours au Sahel, alors qu'en passant par le test de point de rupture de Pettitt, Ozer *et al.* (2003) indiquent que cette même sécheresse s'est arrêtée au début des années 1990. Au vu de ces débats, il est fortement nécessaire de définir des bases consistantes d'analyse permettant d'obtenir un consensus sur la direction et le degré de ces changements (Salack *et al.*, 2011). Bell et Lamb (2006) ont spécifiquement utilisé le test de comparaison des moyennes de Student pour juger du niveau de la significativité des différences de pluviométrie entre les décennies de la période 1968-1987. Ils ont considéré que les déficits constatés relèvent de l'ordre du changement climatique, du moment où ils sont statistiquement significatifs. Camberlin et Diop (2003) ont proposé une analyse en composantes principales (ACP) appliquée aux données de pluie journalières du Sénégal. Cette méthode a permis d'identifier la variabilité spatio-temporelle des dates de début et de fin de saison et de constater qu'elles devenaient de plus en plus tardives depuis le début des années 1970. Ces résultats ne ciblent cependant pas des applications agronomiques et ne tiennent pas compte des faux départs et des fins précoces des saisons souvent observés dans la région (Salack *et al.*, 2012a ; Salack *et al.*, 2013). Par ailleurs, l'indice standardisé des précipitations (SPI) est jugé variable selon les périodes de la série, la position géographique et le nombre de sites pluviométriques utilisés pour le calculer (Ali *et al.*, 2008). En lieu et place du SPI classique, Ali et Lebel (2009) ont proposé un SPI « régionalisé ». Il s'agit du SPI classique interpolé par *krigage* ordinaire. Cependant, le SPI n'est pas intégré directement dans les études d'impacts du climat sur l'agriculture et les interpolations géostatistiques génèrent des erreurs d'approximations dont les amplitudes sont sensibles aux nombres de points d'observations disponibles. C'est pour cela qu'Ozer *et al.* (2003) et Salack *et al.*

(2011) ont, parmi d'autres, suggéré l'utilisation de tests statistiques directement sur les données pour évaluer le niveau de significativité de la variabilité et des tendances des caractéristiques saisonnières et intrasaisonnières du régime pluviométrique, qui peuvent influencer le développement et la croissance des cultures.

Il est important d'améliorer et mettre à jour la veille agroclimatique de la zone soudano-sahélienne avec des applications agro-météorologiques qui tiennent compte non seulement du caractère régional, local des paramètres clés de la saison des pluies, mais aussi des niveaux de significativité statistiques des changements observés et de leurs impacts sur l'agriculture. L'objectif principal de cette étude est d'utiliser des données observées en station pour identifier l'évolution des risques agroclimatiques associées aux grandes tendances du régime pluviométrique dans la bande soudano-sahélienne élargie aux parties nord de certains pays côtiers humides de l'Afrique de l'Ouest (Bénin, Togo, Nigeria). Nous utilisons des analyses en composantes principales (ACP) combinées à des tests statistiques pour identifier l'évolution (tendances et variabilité) des composantes de la saison des pluies expliquant la variabilité et les changements récents de la production agricole locale. Les données, les méthodes de contrôle de qualité, de comblement de données manquantes, l'identification des facteurs de risques et les bases analytiques de ce travail sont exposées ci-après. Les résultats sur les grandes tendances spatio-temporelles du régime pluviométrique, l'évolution des risques agroclimatiques saisonniers, intrasaisonniers et leurs implications éventuelles sont ensuite discutés. Les conclusions obtenues et les perspectives de ces résultats sont présentées en dernière partie.

Données et méthode

Données

La zone d'étude couvre les pays de la bande sahélienne et le Nord des pays côtiers (Bénin, Nigeria, Togo) à régime pluviométrique unimodal. La base de données est constituée de données de pluies journalières (1950-2010) de 112 stations synoptiques et postes pluviométriques bien répartis sur la zone d'étude. Ces données proviennent du système de gestion des bases de données régionales du Centre régional Agrhymet (CRA), collectées dans le cadre du projet

Global Climate Change Alliance (GCCA) du CILSS/CEDEAO et coordonné par le CRA.

Le contrôle de qualité et la mise en forme de la base des données journalières sont réalisés à l'aide de méthodes conventionnelles utilisées dans la détection des extrêmes climatiques (Ly *et al.*, 2013). Il s'agit essentiellement de détecter les valeurs manquantes, les traces de pluie marquées par des « * » ou « TR » et les valeurs erronées de pluies (pluies négatives). Les séries journalières complètes ont ensuite subi des contrôles de qualité statistique décrivant l'homogénéité des données des séries temporelles, afin de détecter les variations dues au changement d'emplacement des sites, aux changements d'instruments de mesure ou à l'automatisation des relevés (Vincent *et al.*, 2011). Tous les paramètres agroclimatiques ont été calculés à partir des données journalières complètes de la série la plus longue possible trouvée pour la station. Après le calcul des indices agroclimatiques (tableau 1), les valeurs annuelles (mensuelles) manquantes pour ces indices ont été comblées pour une station donnée sur la base d'une régression multiple établie entre les valeurs existantes de cette station et celles de 2 à 5 stations les plus proches. Il faut noter que dans le modèle de régression multiple on n'intègre pas les valeurs qui ont déjà été comblées auparavant. Cette approche de comblement de données manquante permet de conserver l'homogénéité spatio-temporelle entre les stations sur une aire très limitée. Elle est appliquée uniquement aux cas où les paramètres agroclimatiques annuels (mensuels) manquants à la station ne dépassent pas 5 % et ne sont pas manquants sur des années ou mois consécutifs dans la série 1950-2010. Toutes les stations dont les données ne respectaient pas ces critères et présentaient des données douteuses ont été écartées des analyses.

Estimation des indicateurs de risques agroclimatiques

Pour analyser les grandes tendances de la pluviométrie et des caractéristiques de la saison des pluies, les différents indices suivants ont été définis et calculés (tableau 1).

- Date de démarrage et de fin et longueur de la saison culturale

La date de démarrage est déterminée en considérant la date à partir du 1^{er} mai où un cumul pluviométrique de 20 mm est obtenu en un à trois jours consécutifs,

Tableau 1. Définitions des indices agroclimatiques.

Indices	Définition	Unités
Cum	Cumul pluviométrique annuel	mm
Px3	Pluies maximales cumulées en 3 jours consécutifs	mm
DDS	Date de démarrage de la saison culturale	Jours juliens
DFS	Date de fin de la saison culturale	Jours juliens
LCS	Longueur de la saison culturale	Jours
SQS _{sem}	Séquence sèche la plus longue dans les 30 jours après le semis	Jours
SQS _{rep}	Séquence sèche la plus longue pendant la phase critique de reproduction des cultures de 90 jours (à partir de 50 jours environ après le semis)	Jours
FoD	Dates de faux départ de saison des pluies : date à partir de laquelle une séquence sèche supérieure ou égale à 15 jours est observée après le démarrage de la saison culturale	Jours juliens (JJ)
FoF	Date de fin précoce de saison : date à partir du 1 ^{er} août après laquelle une séquence sèche de 8 à 14 jours est observée	Jours juliens (JJ)

sans qu'il soit suivi d'une séquence sèche de plus de 20 jours dans les trente jours qui suivent. Ce critère de date de démarrage de saison culturale (DDS) est une légère modification apportée au critère de Sivakumar (1988).

La détermination de la date de fin de saison (DFS) incorpore un critère de bilan hydrique. Ainsi, on définit une DFS comme la date après le 1^{er} septembre à laquelle la consommation en eau de la plante épuise la réserve hydrique du sol jusqu'au seuil de 0,05 mm (Stern *et al.*, 2006). Pour cela, nous avons considéré la réserve utile (RU) qui correspond aux sols des différentes stations, basée sur la carte de la FAO (1978).

La longueur de la saison (LSC) est la différence entre la date de fin (DFS) et la date de début de la saison (DDS) des pluies.

- Séquences sèches, faux départs et fins précoces de la saison culturale

La séquence sèche s'obtient en comptant le nombre de jours consécutifs sans pluies qui se trouvent entre deux jours pluvieux (un jour est pluvieux lorsque son cumul est supérieur ou égal à 1 mm). Ce sont des épisodes de sécheresses intrasaisonnières appelés aussi *pauses pluviométriques* (Sivakumar, 1992 ; Salack, 2013). Les séquences sèches qui déterminent les risques potentiels de resemis sont les pauses pluviométriques les plus longues observées sur les 30 jours après les semis. Pour identifier ces risques dans une saison, nous avons

extrait la séquence sèche maximale dans les 30 jours après la DDS (SQS_{sem}) (tableau 1). Bien qu'en début de saison des pluies (mai à juillet selon un gradient sud-nord et est-ouest), l'occurrence des pauses pluviométriques de 8 à 14 jours soit un événement assez fréquent dans certaines parties de la région (Salack *et al.*, 2012), l'observation de SQS_{sem} n'est pas une chose souhaitée par les paysans. En effet, même si les jeunes plants de mil présentent une certaine capacité d'adaptation à de telles poches de sécheresse intrasaisonnière (Winkel *et Do*, 1992), il n'en est pas de même pour le maïs, le sorgho ou certaines légumineuses (niébé, arachides, etc.). L'alimentation hydrique des cultures pendant la phase épiaison-maturité (ou phase reproductive) est l'un des principaux facteurs conditionnant leur rendement final, en particulier dans la zone sahélienne. Les pauses pluviométriques sont des facteurs indiquant la non-disponibilité de la ressource en eau. À cet effet, les séquences sèches en période reproductive sont extraites 50 jours après la DDS correspondant au paramètre agroclimatique SQS_{rep} (tableau 1). En général, cette période correspond, à la phase critique de reproduction chez les cultures non photopériodiques ayant une durée de cycle d'environ 90 jours. Dans le cadre de la veille climatique en Afrique de l'Ouest, notamment la prévision saisonnière des précipitations, la saison des pluies est qualifiée de déficitaire, normale ou excédentaire lorsque le cumul pluviométrique attendu

est respectivement inférieur, égal ou supérieur au cumul moyen de la période de référence (Agrhymet, 2013). Cependant, la distribution intrasaisonnière des événements pluvieux ne peut être connue que par un suivi agro-hydro-météorologique de la campagne agricole. La question qui se pose à ce niveau est de savoir si l'occurrence des faux départs et des fins précoces des saisons a un lien avec l'attribut du cumul saisonnier (déficitaire, normal ou excédentaire). On sait par exemple que le début de la saison des pluies est généralement précédé d'une succession d'averses intermittentes séparées par des séquences sèches prolongées pouvant aller jusqu'à deux semaines ou plus (Sivakumar, 1992). Ce sont là des événements de faux départs (FoD) de la saison des pluies (Salack *et al.*, 2012) dont les conséquences sont néfastes aux cultures en milieu paysan (Winkel *et Do*, 1992). La fin précoce (FoF) est définie comme l'occurrence d'une pause pluviométrique d'une semaine ou plus observée sur un rayon d'au moins 70 km autour d'un pluviomètre et observée dans la période août-septembre (Salack *et al.*, 2013). Les séquences sèches relatives aux faux départs sont celles dont la durée est supérieure ou égale à 15 jours, observées en mai-juin-juillet selon la zone, tandis que les fins précoces sont caractérisées par des séquences sèches de 8 à 14 jours observées entre août et septembre. Ce sont des pauses pluviométriques extrêmes dans les catégories respectives de SQS_{sem} et SQS_{rep}. Les caractéristiques spatio-temporelles des FoD et FoF sont détaillées par Salack *et al.* (2013). Les dates d'occurrence des FoD et FoF ont été extraites par année et par station et mises en relation statistique avec le signal climatologique régional du cumul saisonnier pour identifier des liens éventuels.

Analyses statistiques d'intercomparaisons

En vue de faire ressortir les grands traits de changement et de variabilité dans l'évolution de la pluviométrie et de ses composantes intrasaisonnières à forts impacts agricoles, les périodes de référence suivante ont été considérées dans les analyses statistiques d'intercomparaisons :

- 1950-2010 : période long terme commune au nombre maximal de stations ;
- 1950-1969 : période humide sur toute la bande soudano-sahélienne de l'Afrique de l'Ouest (Bell *et Lamb*, 2006 ; Lebel *et Ali*, 2009) ;

- 1961-1990 : normale climatologique de l'Organisation météorologique mondiale (OMM), utilisée dans les études sur la variabilité et le changement climatique (Sarr *et al.*, 2006 ; Ben Mohamed, 2010 ; Berg *et al.*, 2013, Ly *et al.*, 2013) ;

- 1970-1990 : période de sécheresse historique (Dai *et al.*, 2004 ; Bell et Lamb, 2006) ;

- 1991-2010 : période de retour vers des conditions pluviométriques meilleures après les sécheresses de la période 1970-1990 (Lebel et Ali, 2009 ; Salack *et al.*, 2011).

Pour analyser les indices agroclimatiques (tableau 1), nous employons des approches statistiques combinées en trois étapes :

1. Toutes les valeurs des cumuls annuels (Cum), les cumuls en trois jours consécutifs (Px3), les dates de démarrage (DDS) et les longueurs de la saison culturale (LSC) sont normalisées par rapport à la période 1961-1990 suivant la méthode de l'indice anomalies standardisées (Katz et Glantz, 1986 ; Moron *et al.*, 2006) ;

2. Une analyse en composantes principales (ACP) est appliquée sur les indices normalisés de Cum, Px3, DDS et LSC en mode « spatiale » : les stations sont considérées comme des variables et les années comme des observations. La première composante principale (PC1) qui explique le maximum de variance détermine le signal climatologique commun à toutes les stations et la distribution spatiale des poids montre la corrélation de la PC1 avec toutes les stations (Camberlin et Diop, 2003) ;

3. Pour comparer les périodes de référence citées plus haut entre elles, nous appliquons le schéma statistique Student-Fisher (SFS). Le SFS est une combinaison des tests de variance, de tendance et une estimation de la différence relative de deux échantillons distincts (Salack, 2013). Il est appliqué en plusieurs étapes : i) on compare les variances de deux séries de données avec le *F*-test (*F* est le rapport de variances des deux échantillons) ; ii) si les des deux séries sont homogènes au seuil de 5 %, on compare les moyennes des deux séries avec le *t*-test *homoscédastique* ; iii) lorsque la différence des tendances est significative au seuil de 5 %, on calcule la différence relative (en pourcentage) entre les deux séries ; iv) si au point (i) les variances des deux séries ne sont pas homogènes (c'est-à-dire les variances sont différentes au seuil de 5 %) alors on compare les moyennes des deux séries avec le *t*-test *hétéroscédastique*. Lorsque

la différence des tendances est significative au seuil de 5 %, on retourne au point (iii).

Le but visé par le SFS est de comparer deux échantillons en tenant compte de l'état interne des variances, afin que la variabilité dans les séries temporelles soit prise en compte dans l'estimation des tendances. C'est un schéma statistique de comparaison dont la stabilité a été vérifiée (Salack *et al.*, 2011). Il permet d'identifier le pourcentage du changement d'une variable climatique, la direction du changement (positive ou négative) et le niveau de significativité statistique de ce changement par rapport à une situation de référence. Selon Salack *et al.* (2011), s'il est appliqué de manière séquentielle, le SFS permet également de connaître l'année de début du changement et sa persistance (ou non-persistance) sur une période choisie. Dans nos analyses, le SFS est appliqué sur la PC1 des indices agroclimatiques régionalisés par ACP, sur les valeurs moyennes régionales et sur les valeurs aux stations individuelles (échelle locale).

Résultats et discussion

Les grandes tendances spatio-temporelles du régime pluviométrique

Les composantes du régime pluviométrique les plus importantes dans le domaine des applications agronomiques sont la répartition des événements pluvieux (pauses pluviométriques), les cumuls saisonniers (Cum), les cumuls en trois jours consécutifs (Px3), les dates de démarrage et les longueurs des saisons culturales. La *figure 1* montre les résultats des ACP de certaines de ces caractéristiques sur la zone soudano-sahélienne de l'Afrique de l'Ouest. Le panel des cartes montre la distribution spatio-temporelle des poids de la première composante principale (PC1) du Cum, Px3, DDS et LSC. Les valeurs positives (négatives) de la PC1 sur le panel de courbes de la *figure 1* dénotent les situations d'excédents (déficits) pour le Cum et le Px3. Pour les dates DDS, une PC1 positive (négative) veut dire un début de saison culturale précoce (tardif). Pour le cas des longueurs de saison, LSC, une PC1 positive (négative) correspond à une durée de saison plus longue (courte) par rapport à la moyenne de la période de référence 1961-1990. Il faut noter que 46,6 % de la variance de

Cum et 37,6 % de celle de LSC sont expliquées par la PC1 et cela au seuil de significativité de 99 % selon le test de χ^2 . En revanche, seulement 12 et 7 % de la variance de ces mêmes caractéristiques sont expliquées par la PC2. Quant aux pourcentages des variances de DDS et Px3 expliquées par les PC1, ils ne sont pas statistiquement significatifs au seuil de 99 %, mais le deviennent seulement quand on baisse le seuil à 90 %. Cela montre que les dates de début de saison culturale, basées sur le critère d'un seuil de cumul pluviométrique et les intensités des cumuls journaliers, sont très aléatoirement réparties sur la région. Cette conclusion est également partagée par Moron *et al.* (2006) et Marteau (2011) qui ont montré qu'au Sénégal en particulier et en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne en général, il n'y a pas de cohérence spatiale marquée sur l'intensité de la pluie et les dates de début des saisons agricoles. Les valeurs des poids par station sont rarement inférieures à 0,3 (*figure 1*). Cela montre que la PC1 explique une part importante des variations des caractéristiques étudiées sur toutes les stations de la région. Aucune zone ne dégage une homogénéité particulière sur l'évolution de ces paramètres.

En d'autres termes, la variabilité temporelle de ces caractéristiques du régime pluviométrique, telle qu'elle apparaît sur le panel des courbes sur la partie à droite de la *figure 1*, est commune à toute la région. Cette évolution est quasi identique sur le Cum, LSC et Px3. Au vu de l'allure de la courbe des PC1 sur ces trois composantes du régime pluviométrique, cette évolution peut être répartie en trois sous-périodes relativement différentes : i) la période 1950-1969 dans laquelle les cumuls pluviométriques et l'intensité des cumuls journaliers sur trois jours consécutifs (Cum et Px3) sont excédentaires, les dates de début de saison sont précoces et les saisons sont assez longues. Ce constat est fait également par plusieurs auteurs ayant travaillé sur la zone sahélo-soudanienne (Le Barbé *et al.*, 2002 ; Dai *et al.*, 2004 ; Bell et Lamb, 2006 ; Lebel et Ali, 2009) ; ii) la période 1970-1990 sur laquelle les cumuls et les intensités des pluies sont déficitaires. Les longueurs des saisons sont plus courtes et les dates de début des saisons sont devenues tardives par rapport à la moyenne 1961-1990 ; iii) la période 1991-2010 qui est caractérisée par des déficits de Cum et Px3, assez proches de la normale, et comportant quelques années excédentaires. Dans cette période, les longueurs des saisons présentent les mêmes

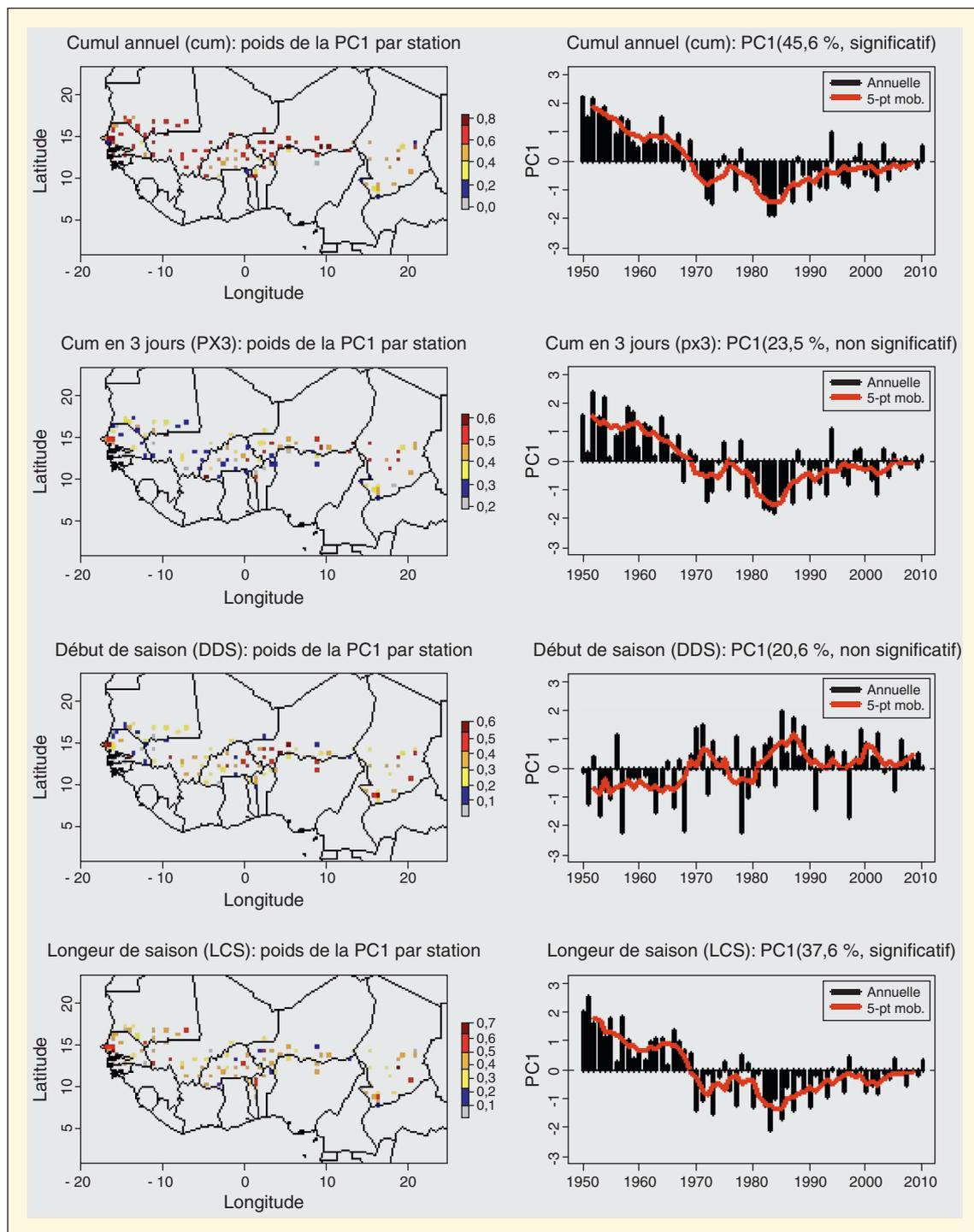


Figure 1. Variabilité spatio-temporelle de quatre composantes du régime pluviométrique en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne.

caractéristiques. Ces résultats renforcent l'impression que l'on est dans un « retour apparent » vers des conditions normales de pluviométrie (Nicholson, 2005 ; Bell et Lamb, 2006 ; Lodoun *et al.*, 2009 ; Salack *et al.*, 2011). Toutefois, les dates de début de saison restent relativement tardives, avec seulement quelques

années à début normal ou précoce, comme dans la période précédente, 1970-1990. Le tableau 2 montre le pourcentage de différences et son niveau de significativité statistique, tant sur la variabilité que sur la tendance, suite aux tests des variances et des moyennes sortis du SFS sur les valeurs

régionales. La différence entre les paires de périodes est significative, lorsque la valeur de p du SFS est inférieure à 0,05. Les pourcentages de différences sont plus élevés en valeur absolue, entre la période de sécheresse (1970-1990) et la période humide (1950-1969). Cependant, ces différences sont réduites

Tableau 2. Paramètres du test de significativité du schéma statistique Student-Fisher (SFS) au seuil de 5 %, obtenus sur les caractéristiques du régime pluviométrique.

Variable	Comparaison	Test des variances (<i>p</i>)	Test des moyennes (<i>p</i>)	Pourcentage relatif (%)
Cumul annuel (Cum, mm)	1970-1990 versus 1950-1969	0,000*	0,000*	- 28,1*
	1970-1990 versus 1991-2010	0,026*	0,000*	- 9,0*
	1991-2010 versus 1961-1990	0,867	0,135	+ 2,2
Cumul en 3 jours (Px3, mm)	1970-1990 versus 1950-1969	0,000*	0,000*	- 23,0*
	1970-1990 versus 1991-2010	0,000*	0,000*	- 10,2*
	1991-2010 versus 1961-1990	0,000*	0,000*	+ 4,1*
Longueur de saison (LSC, jours)	1970-1990 versus 1950-1969	0,440	0,000*	- 16,2*
	1970-1990 versus 1991-2010	0,905	0,000*	- 5,0*
	1991-2010 versus 1961-1990	0,678	0,464	+ 0,1

* Statistiquement significatif au seuil de 5 %.

lorsqu'on compare les périodes de sécheresse aux deux dernières décennies (1991-2010). L'analyse comparative des paramètres de la saison des pluies dans ces différentes périodes montre que la variabilité de la période P3 est plus importante sur les cumuls et l'intensité des cumuls sur trois jours consécutifs. Cette variabilité accrue sous-entend que la qualité agronomique de la saison des pluies est plus aléatoire d'une année à l'autre sur la région. Localement, cela se traduit par une incertitude grandissante quant à l'utilité des événements de pluie pour la production agricole. Les grandes hypothèses d'événements d'inondations se concrétisent et les phénomènes d'engorgement ne sont plus à exclure, hormis les retards dans l'installation des saisons des pluies ou l'avortement des semis dû à l'occurrence de pauses pluviométriques extrêmes en début ou en milieu de saison (Salack, 2013).

Évolution des risques agroclimatiques intrasaisonniers

• Risques de resemis et de stress hydrique post-floraison

On définit les risques de resemis dans la région, lorsqu'il y a occurrence de séquence sèche d'une durée relativement longue après les semis. L'indice agroclimatique correspondant à ce paramètre de la pluviométrie locale est SQS_{sem} . La figure 2A est une intercomparaison de la densité de probabilité des longueurs de SQS_{sem} de deux périodes avec la référence 1961-1990. Elle présente un étalement (à droite) vers les valeurs de SQS_{sem}

supérieures à la moyenne pour la période 1991-2010. Selon Salack *et al.* (2012a), lorsque la durée de la pause pluviométrique qui succède à un événement pluvieux en début de saison est plus longue que deux semaines consécutives, alors elle a une forte tendance à traduire une fausse alerte de début de saison (faux départ). Cette situation est de plus en plus fréquente dans la zone d'étude. En passant d'une période à l'autre, la durée moyenne de SQS_{sem} n'a pas connu de changement statistiquement significatif, au seuil de 5 %. Néanmoins, la variabilité est plus importante (voir les résultats des tests de variances et de moyennes de la figure 2). Ces résultats renforcent l'hypothèse selon laquelle les risques de resemis sont beaucoup plus probables dans les périodes récentes.

Pour des variétés non photopériodiques, ayant une durée moyenne de cycle de 90 jours, le début de la période épiaison-floraison est estimé à 50 jours après semis. L'indice de séquence sèche pendant la phase de la reproduction (SQS_{rep}) permet d'identifier les risques d'occurrence des poches de sécheresse intrasaisonniers pendant cette phase critique. La figure 2B montre l'évolution comparative de la densité de probabilité empirique de SQS_{rep} sur la période 1950-2010. La durée moyenne de SQS_{rep} observée en 1950-1960 (P1) est de 7 jours (± 5), alors qu'elle est de 9 jours (± 7) en 1961-1990 (période de référence) et de 9 jours (± 6) en 1991-2010 (P3). Ces différences de moyennes sont statistiquement significatives entre la période P1 et la période de référence P3, alors qu'il n'y a pas de

différence entre la période de référence et la P3. Il ressort de ces résultats que les risques de stress hydriques augmentent avec l'accroissement de la durée des séquences sèches, en phase reproductive des cultures pluviales, notamment les céréales (mil, sorgho, maïs, etc.).

• Relations entre occurrence des faux départs (fins précoces) et qualité des saisons

Existe-t-il un lien entre l'occurrence des faux départs/fins précoces des événements pluvieux et la qualité (déficitaire, normale ou excédentaire) de la saison culturale ? Pour répondre à cette question, nous choisissons une analyse en composite empirique qui met en relation la composante régionale du signal climatologique de Cum (PC1) avec les valeurs intrinsèques des dates d'occurrences des pauses pluviométriques ≥ 15 jours observées après la première pluie, à partir du 1^{er} mai (FoD) et les dates d'occurrences des pauses pluviométriques de 8-14 jours observées entre août et septembre dans les stations. Les FoD et FoF relèvent de la sous-classe des séquences sèches extrêmes des catégories de SQS_{sem} et SQS_{rep} définies plus haut comme l'ont montré Salack *et al.* (2013). Ainsi, la PC1 extraite des données normalisées du Cum des stations du Sénégal, Mali, Burkina Faso et Niger explique 51,1 % de variance. La classification du cumul aux stations individuelles est basée sur les valeurs de la PC1. Ces valeurs permettent de dire qu'une année est humide lorsque la PC1 est > 0 ; mais, lorsque la PC1 est < 0 , l'année est considérée comme sèche. Le composite

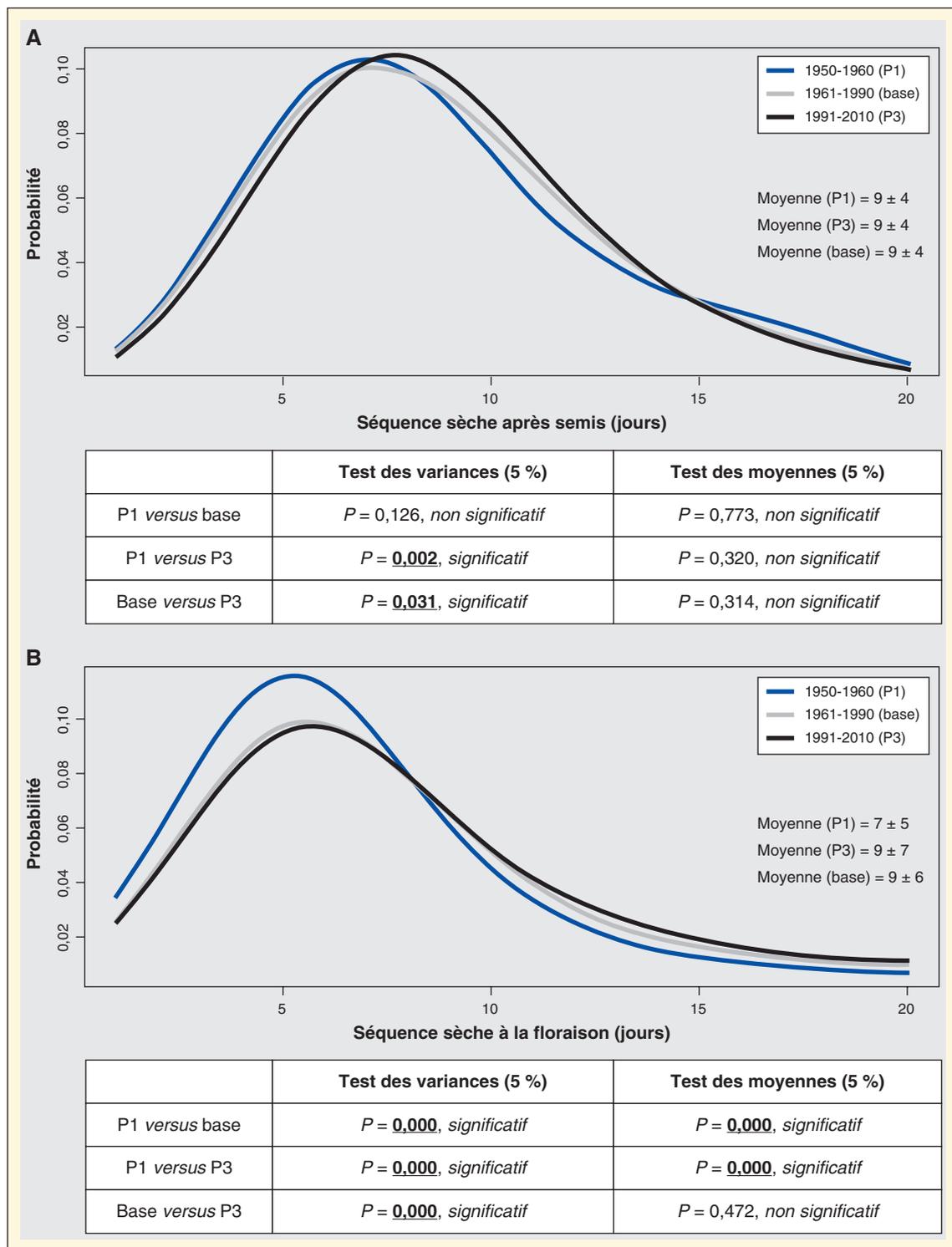


Figure 2. Densité de probabilité empirique et inférences statistiques sur les variances et les moyennes des longueurs des séquences sèches. A) après semis ; B) pendant la floraison.

de toutes les années humides et sèches du réseau de ces quatre pays est illustré par le premier panel de la *figure 3* pour les dates de faux départs (*figure 3A*) et les fins précoces (*figure 3B*) des saisons.

Il apparaît que les années humides présentent des événements de faux départs relativement précoces par rapport aux années sèches. En revanche, les événements de fins précoces de

saison adviennent un peu plus tard dans les années humides que dans les années sèches. Si l'on compare les trois périodes caractérisant l'évolution du régime pluviométrique de la sous-région

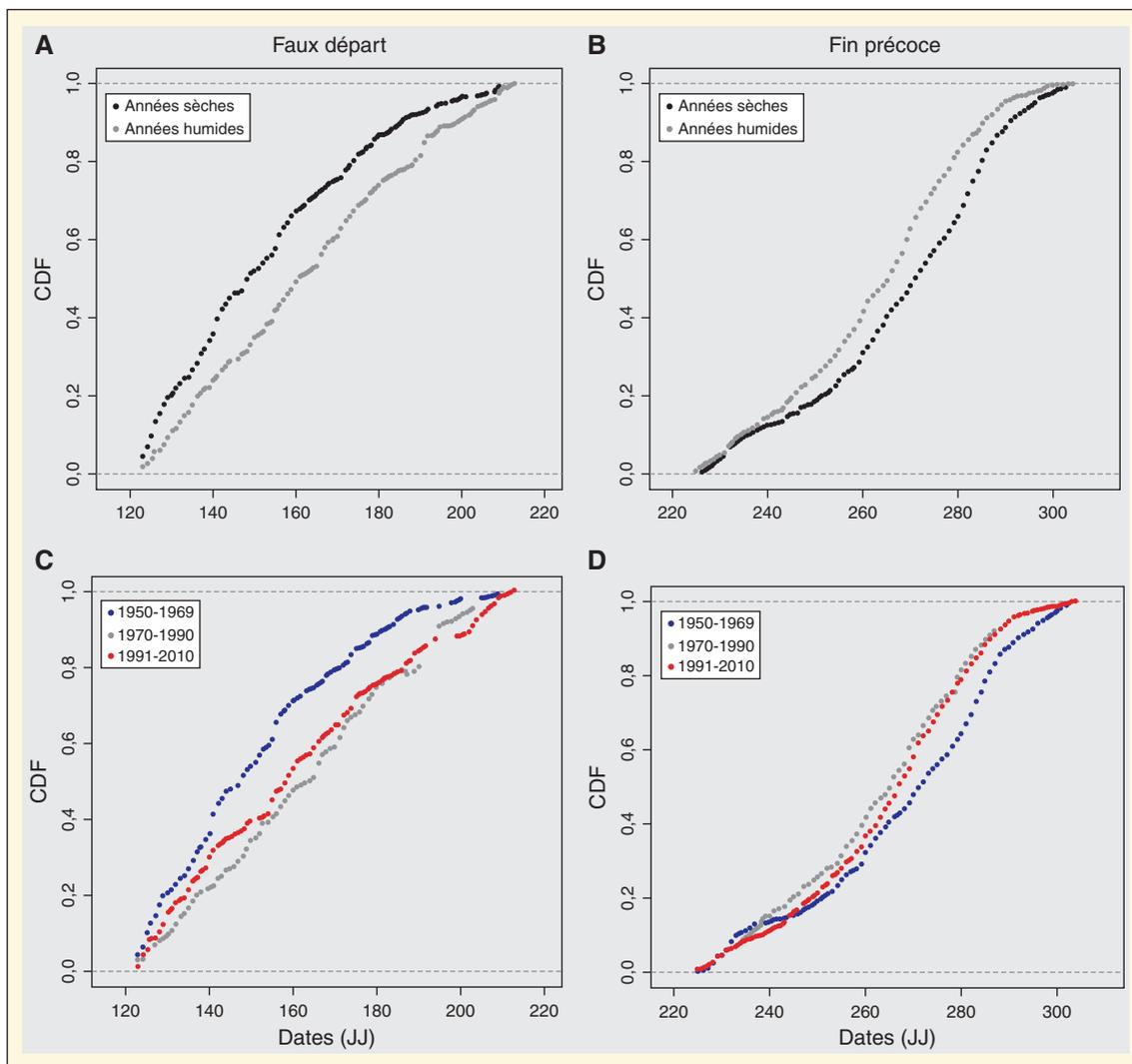


Figure 3. Fréquence au non-dépassement des dates d'occurrence de faux départs et fin précoces de saison des pluies en Afrique soudano-sahélienne.

A) composite des dates de faux départs des années sèches et humides ; B) composite des dates de fin précoce des années sèches et humides ; C) et D) comparaison des sous-périodes dites humides (1950-1969), sèches (1970-1990) et retour vers des conditions normales (1991-2010). JJ : jours juliens.

(figure 3C, 3D), on constate effectivement que la période d'excédents pluviométriques, 1950-1969, connaît des débuts de saisons plus intermittents, avec une succession précoce d'événements de FoD. La date médiane de ces événements est le 27 mai. Quant aux dates de FoF, elles sont observées plus tard dans le calendrier culturel. Sur cette période humide, la date médiane d'occurrence de FoF est le 28 septembre. Pour la période de sécheresses historiques (1970-1990) et les dernières décennies qualifiées de période de « retour apparent » (Nicholson, 2005 ; Lebel et Ali, 2009 ; Lodoun et al., 2009 ; Salack et al., 2011), les dates FoD sont observées plus tard dans le calendrier culturel. La date médiane pour ces

années est comprise entre le 7 et le 12 juin. Les dates de FoF sont plus précoces dans le calendrier culturel et la date médiane commune aux deux périodes est le 22 septembre. Au-delà des caractéristiques statistiquement différentes, ces résultats posent l'hypothèse que les risques agroclimatiques de la période de retour vers des conditions normales de pluviométrie (1991-2010) sont restés similaires à ceux de la période de sécheresses historiques (1979-1990). La date d'occurrence des FoD au troisième quartile de l'échantillon des années humides correspond au 10 juin (163 jours juliens [JJ]) tandis que la date d'occurrence des FoF au troisième quartile de l'échantillon des années sèches est le 30 septembre (274 JJ).

Ces résultats sont comparables à ceux de Salack et al. (2012a) qui ont observé les périodes de faux départs (fins précoces) entre le 7 juin et le 27 juillet (18 et 28 septembre) au Sénégal et au Niger sur la période 1950-2010. Ces dates au troisième quartile sont utilisées pour diagnostiquer la relation entre la distribution de la pluie et la qualité du cumul saisonnier.

• Effets du « septième mois » du milieu paysan

À l'échelle des stations individuelles, nous compilons l'indice d'anomalies standardisées (SPI) relativement aux normales 1961-1990 et 1981-2010 de la série 1950-2010. Les SPI de toutes

les années de la station sont classés selon que les FoD (FoF) sont observées avant ou après la date du 10 juin (30 septembre). Pour chaque classe d'années, nous calculons la moyenne spatiale du SPI sur toute la région selon la formule du SPI proposée par Katz et Glantz (1986) et Moron *et al.* (2006). La *figure 4* présente la qualité du cumul pluviométrique selon les dates d'occurrence des FoD (FoF) après et/ou avant les dates au troisième quartile. On remarque que les saisons où les faux départs sont observés avant le 10 juin ou bien où les fins précoces sont observées après le 30 septembre ont des anomalies moyennes régionales positives. Cela veut dire que les cumuls pluviométriques de ces saisons sont au-dessus des normales 1961-1990 (*figure 4A*) et 1981-2010 (*figure 4B*). Lorsque les dates d'occurrence des FoD (FoF) sont observées après le 10 juin (avant le 30 septembre), on remarque

une prédominance des anomalies négatives, ce qui implique que les cumuls saisonniers sont en dessous des normales climatologiques 1961-1990 (*figure 4A*) et 1981-2010 (*figure 4B*). Généralement, les paysans de la sous-région récoltent en octobre. La saison suivante, ils s'approprient à semer au moins sept mois après la dernière pluie de la saison précédente quelle que soit la date à laquelle une pluie efficace tombe. C'est le fameux septième mois très populaire et utilisé en milieu paysan des pays sahéliens. Ce septième mois correspond vaguement à la période des premières pluies qui tombent entre la fin avril et le début du mois de juin. Cette période est caractérisée par un déficit en humidité dans les basses couches atmosphériques (Janicot *et al.*, 2011) qui est souvent interrompu par des épisodes d'incursion de flux de mousson. Ces flux d'humidité causent des événements pluvio-orageux intermittents

sur 3 à 5 jours (Couvreur *et al.*, 2010), incitant les cultivateurs à semer, surtout lorsqu'ils sont relativement intenses. A la suite de ces événements, il y a souvent des pauses pluviométriques très longues qui peuvent causer la dessiccation des jeunes plants (Salack *et al.*, 2012a). Dans le cas des zones sablonneuses, les paysans s'adonnent aux semis à sec du mil dans l'attente d'une pluie suffisante pour faire germer les graines. Malheureusement, parfois les pluies qui arrivent après ce semis à sec sont d'une quantité insuffisante pour réussir convenablement la germination et, les graines finissent par pourrir. Face à ces genres d'échec et de perte de semences, il est important que les caractéristiques de la saison soient suffisamment étudiées et surveillées.

Ainsi, grâce aux résultats de la *figure 4* (A, B) on peut comprendre que les années humides sont associées à des vagues d'événements de faux départs observés de manière précoce dans la première décennie de juin ou plus tôt. Alors que si des faux départs sont observés au-delà de la première décennie de juin, le cumul de cette saison est fort probablement déficitaire vis-à-vis de la normale 1961-1990 (1981-2010). Sur la période 1950-2010, une année où l'on a observé des FoD après la première décennie de juin et des FoF avant le 30 septembre a une potentialité agricole moindre et son cumul final est déficitaire par rapport aux normales 1961-1990/1981-2010. Le *tableau 3* dresse la liste des années humides ayant enregistré des FoD (FoF) précoces (tardifs) et les années ayant enregistré des FoD tardifs et des FoF précoces par rapport au 10 juin (30 septembre). Bien qu'empiriques, ces résultats posent une question importante susceptible d'améliorer la prévision saisonnière à travers la prise en compte de la distribution intrasaisonnière des événements pluvieux. Cette question consiste à analyser les caractéristiques dynamiques communes aux années répertoriées dans le *tableau 3*.

Conclusion et perspectives

La pluviométrie de la bande soudano-sahélienne a un régime monomodal qui a connu une évolution multidécennale variée. Sa variabilité spatiale est quasi uniforme tandis que son évolution temporelle montre des tendances interdécennales relativement différentes. L'application des analyses multivariées (ACP) et des tests statistiques d'intercomparaison

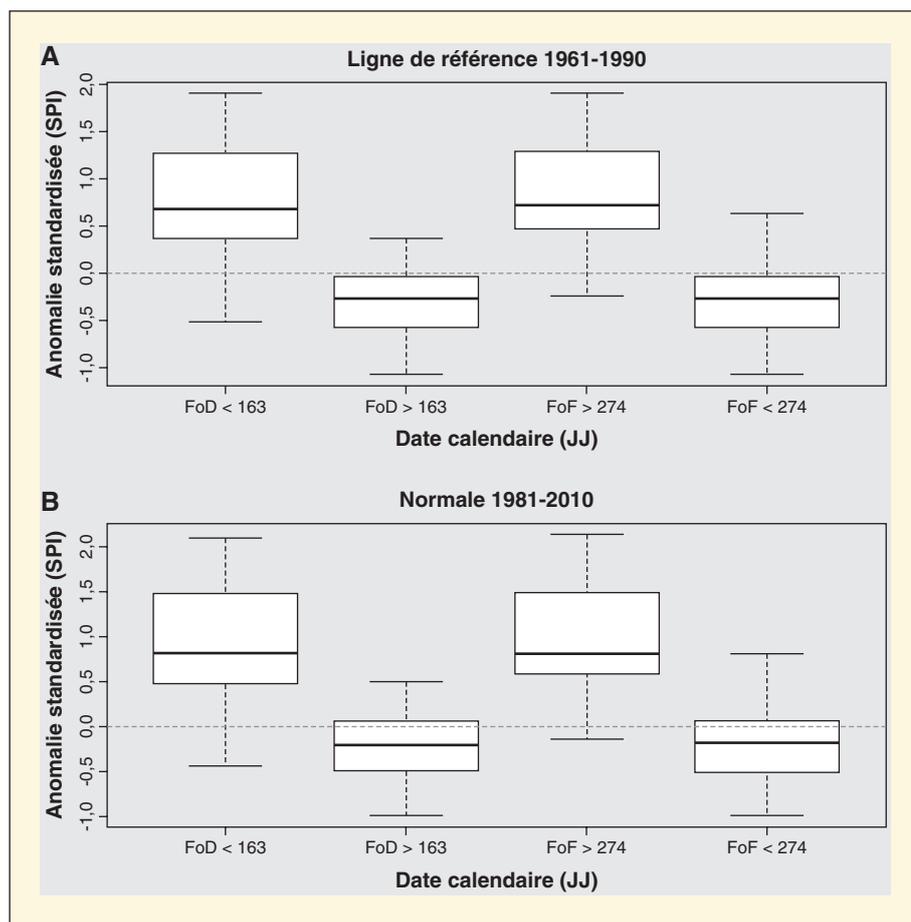


Figure 4. Anomalies du cumul interannuel versus dates d'occurrences de faux départ/fin précoce des saisons des pluies. A) moyenne des anomalies standardisées relativement à la normale 1961-1990 ; B) moyenne des anomalies standardisées relativement à la normale 1981-2010. FoD : faux départ ; FoF : fin précoce ; JJ : jours juliens.

Tableau 3. Liste des années ayant enregistré l'occurrence de faux départs (FoD) et fins précoces (FoF) de saison, entre 1950 et 2010 en zone soudano-sahélienne d'Afrique de l'Ouest.

Paramètre (date)	Année
FoD (avant le 16 ³ JJ) & FoF (après le 27 ⁴ JJ)	1950, 1951, 1952, 1953, 1954, 1955, 1956, 1957, 1958, 1959, 1960, 1961, 1962, 1963, 1964, 1965, 1966, 1967, 1969, 1978, 1988, 1994, 1998, 1999, 2003, 2005, 2008, 2010
FoD (après le 16 ³ JJ) & FoF (avant le 27 ⁴ JJ)	1968, 1970, 1971, 1972, 1973, 1974, 1975, 1976, 1977, 1979, 1980, 1981, 1982, 1983, 1984, 1985, 1986, 1987, 1989, 1990, 1991, 1992, 1993, 1995, 1996, 1997, 2000, 2001, 2002, 2004, 2006, 2007, 2009

JJ : jour julien.

(schéma statistique de Student-Fisher, SFS), aux caractéristiques interannuelles (cumuls annuels), saisonnières (dates de démarrage et fin des saisons culturales) et intrasaisonnières (intensité du cumul sur trois jours consécutifs), montrent que ces différentes phases d'évolution temporelles sont statistiquement significatives. Ainsi, les tendances interdécennales quasi identiques des cumuls annuels, intensité du cumul sur trois jours consécutifs et longueurs de saison ont trois phases communes pour la grande majorité des stations de la région, alors que les dates de démarrage des saisons ont deux phases. Dans la période 1950-1969, les cumuls pluviométriques et l'intensité des cumuls pluviométriques sur trois jours consécutifs sont excédentaires, les dates de début de saison sont précoces et les saisons sont assez longues. Pendant la période 1970-1990, les cumuls annuels et l'intensité des cumuls sur trois jours consécutifs sont déficitaires. Cette période a en outre connu des longueurs de saisons plus courtes que la moyenne de la normale 1961-1990 et des dates de démarrage des saisons tardives. Dans les deux dernières décennies (1991-2010), les déficits sur les cumuls annuels et l'intensité du cumul sur trois jours consécutifs sont proches de la normale. Toutefois, cette période a la particularité d'être caractérisée par des alternances d'années excédentaires et déficitaires. Les longueurs des saisons présentent le même caractère. Ces caractères donnent l'impression qu'on est dans un « retour apparent » vers des conditions humides, bien que les dates de démarrage des saisons restent relativement tardives comme dans la période précédente (1970-1990) et très variables d'une année à l'autre. Donc les risques agroclimatiques de resemis restent les mêmes sur toute la période 1970-2010. La variabilité plus importante des composantes pluviométriques à forts

impacts sur l'agriculture (DDS, DFS, SQS) rend aléatoire la qualité agronomique de la saison des pluies, d'une année à l'autre sur la région. Localement, cela se traduit par une incertitude grandissante de la bonne distribution des événements de pluie pour la production agricole. Ainsi, les risques de resemis sont beaucoup plus fréquents dans les périodes récentes et les risques de stress hydriques augmentent avec la persistance des séquences sèches, en particulier pendant la phase critique de reproduction des cultures pluviales. Les faux départs et les fins précoces des saisons culturales sont de plus en plus récurrents. Ces paramètres constituent la catégorie des séquences sèches extrêmes enregistrées pendant les phases d'installation et de retraite de la mousson ouest-africaine. Au troisième quartile, la fréquence au non-dépassement des faux départs (fins précoces) des saisons culturales est le 10 juin (30 septembre). La date du 10 juin correspond à la limite supérieure de la période post-récolte du « septième mois » pendant laquelle les paysans n'hésitent pas à semer si une pluie suffisante est enregistrée (Lona, 2010). Une classification de la qualité des années sur la base de l'occurrence de ces événements a révélé que les années humides enregistrent des événements de faux départs observés précocement avant ou pendant la première décennie de juin. Quant aux années sèches, elles ont tendances à enregistrer des événements de faux départ (fins précoces) après la première décennie de juin (avant la fin septembre). Ces résultats montrent que la planification agricole est de plus en plus difficile dans ce contexte de changements observés dans le régime pluviométrique. Toutes les stratégies d'adaptation à la variabilité et aux changements climatiques, dans le domaine hydro-agricole (ajustement des calendriers culturaux, adaptation variétale, maîtrise et gestion

de l'eau agricole, etc.) devraient tenir compte des modes de la variabilité de pluies et de ses caractéristiques. Il est donc important de renforcer l'utilisation de l'information climatique et agrométéorologique par les décideurs et producteurs de la sous-région. Par ailleurs, au besoin d'améliorer la prévision de la distribution des événements pluvieux intrasaisonnières, la dynamique atmosphérique et l'état de surface des océans des années ayant enregistré l'occurrence de faux départs (fin précoces) de saisons doivent être étudiés en détail. ■

Remerciements

Ce travail a été réalisé avec l'appui financier de l'Union européenne dans le cadre du projet *Alliance Mondiale contre le Changement climatique (AMCC/GCCA)*. Nous remercions les directions et Agences nationales de la météorologie du Bénin, du Burkina Faso, de la Gambie, du Mali, du Niger, du Nigeria, du Sénégal, du Tchad et du Togo pour la mise à disposition des données de pluviométrie journalière.

Références

- Agrhymet, 2013. *Bulletin spécial sur la mise à jour des prévisions des caractéristiques agro-hydro-climatiques de la campagne d'hivernage 2013 en Afrique de l'Ouest, au Tchad et au Cameroun*. Bulletin Spécial (N° 03). Niamey : Centre régional Agrhymet.
- Ali A, Lebel T, 2009. The Sahelian standardized rainfall index revisited. *International Journal of Climatology* 29 : 1705-14. doi: 10.1002/joc.1832.
- Ali A, Lebel T, Amani A, 2008. Signification et usage de l'indice pluviométrique au Sahel. *Sécheresse* 19 : 227-35. doi: 10.1684/sec.2008.0148.
- Bazzaz F, Sombroek W, 1996. *Changement du climat et production agricole*. Rome : FAO ; Polytechnica.
- Berg A, de Noblet-Ducoudré N, Sultan B, Lengaigne M, Guimberteau M, 2013. Projections of climate change impacts on potential C4 crop productivity over tropical regions. *Agricultural and Forest Meteorology* 170 : 89-102.
- Bell MA, Lamb PJ, 2006. Integration of weather system variability to multidecadal regional climate change : the West African Sudan-Sahel Zone, 1951-98. *Journal of Climate* 19 : 5343-65.
- Ben Mohamed A, 2010. Climate change risks in Sahelian Africa. *Regional of Environmental Change* 11 : 109-17. doi: 10.1007/s10113-010-0172-y.
- Camberlin P, Diop M, 2003. Application of daily rainfall principal component analysis to the

- assessment of the rainy season characteristics in Senegal. *Climate Research* 23 : 159-69.
- Chappell A, Agnew CT, 2004. Modelling climate change in West African Sahel rainfall (1931-90) as an artifact of changing station locations. *International Journal of Climatology* 24 : 547-54.
- Couvreur F, Guichard F, Bock O, Campistron B, Lafore JP, Redelsperger JL, 2010. Synoptic variability of the monsoon flux over West Africa prior to the onset. *Quarterly Journal of The Royal Meteorological Society* 136(s1):159-73. doi: 10.1002/qj.473.
- Dai A, Lamb JP, Trenberth VE, Hulme M, Jones PD, Xie P, 2004. Comment the recent Sahel drought is real. *International Journal of Climatology* 24 : 1323-31.
- Diouf M, Nonguierma A, Abou A, Royer A, Somé B, 2000. Lutte contre la sécheresse au Sahel : acquis et perspective au Centre Régional Agrhy-met. *Sécheresse* 11 : 257-66.
- ECOWAS-SWAC/OECD ; FAO ; CILSS, 2008. *Climate and Climate Change. The Atlas on Regional Integration in West Africa*. Environment Series. January 2008. Available at : www.atlas-westafrica.org.
- FAO, 1978. *Report on the agro-ecological zones project. Vol 1 : Results for Africa*. World Soil Resources Report 48/1. Rome : FAO.
- IPCC, 2012. *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field CB, Barros V, Stocker TF, Qin D, Dokken DJ, Ebi KL, et al., eds.]. Cambridge (UK) ; New York : Cambridge University Press.
- IPCC, 2007. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Parry ML, Canziani OF, Palutikof JP, van der Linden PJ, Hanson CE, eds. Cambridge (UK) : Cambridge University Press.
- Janicot S, Caniaux G, Chauvin F, de Coetlogon G, Fontaine B, et al., 2011. Intraseasonal variability of the West African monsoon. *Atmospheric Science Letters* 12 : 58-66. doi: 10.1002/asl.280.
- Katz RW, Glantz MH, 1986. Anatomy of a rainfall index. *Monthly Weather Review* 114 : 764-71.
- L'Hôte Y, Mahé G, Somé B, Triboulet JP, 2002. Analysis of Sahelian rainfall index from 1896 to 2000 ; the drought continues. *Journal of Hydrological Science* 47 : 563-72.
- Le Barbé L, Lebel T, Tapsoba D, 2002. Rainfall Variability in West Africa during the Years 1950-1990. *Journal of Climate* 15 : 187-202.
- Lebel T, Ali A, 2009. Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990-2007). *Journal of Hydrology* 375 : 52-64. doi: 10.1016/j.jhydrol.2008.11.030.
- Lodoun T, Giannini A, Traore PS, Some L, Sanon M, Vaksman M, et al., 2009. Changes in seasonal descriptors of precipitation in Burkina Faso associated with late 20th century drought and recovery in West Africa. *Environmental Development* 5 : 96-108.
- Lona I, 2010. *Changement climatique et développement agricole dans la commune rurale de Diagourou (région de Tillabéry) : de l'observation à l'analyse des données*. Mémoire de DEA, université Abdou Moumouni, Niamey, Niger.
- Ly M, Traoré S, Agali A, Sarr B, 2013. Evolution of Some Observed Climate Extremes in the West African Sahel. *Weather and Climate Extremes* 1 : 19-25.
- Marteau R, 2011. *Cohérence spatiale et prévisibilité potentielle des descripteurs intrasaisonniers de la saison des pluies en Afrique soudano-sahélienne : application à la culture du mil dans la région de Niamey*. Thèse de doctorat, université de Bourgogne.
- Moron V, Robertson AW, Ward MN, 2006. Seasonal Predictability and spatial coherence of rainfall characteristics in the tropical setting of Senegal. *Monthly Weather Review* 134 : 3248-62.
- Nicholson SE, 2001. Climatic and environmental change in Africa during the last two centuries. *Climate Research* 17 : 123-44.
- Nicholson SE, 2005. On the question of the "recovery" of the rains in the West African Sahel. *Journal of Arid Environment* 63 : 615-41.
- Ozer P, Ercicum M, Demarée G, Vandiepen-beeck M, 2003. The Sahelian drought may have ended during the 1990s. *Journal of Hydrologic Science* 48 : 489-92.
- Roudier P, Sultan B, Quirion P, Baron C, Alhassane A, Traore SB, Muller B, 2011. An ex-ante evaluation of the use of seasonal climate forecasts for millet growers in SW Niger. *International Journal of Climatology* 32 : 759-71. doi: 10.1002/joc.2308.
- Salack S, Muller B, Gaye AT, 2011. Rain-based factors of high agricultural impacts over Senegal. Part I. Integration of local to sub-regional trends and variability. *Theoretical and Applied Climatology* 106 : 1-22. doi: 10.1007/s00704-011-0414-z.
- Salack S, Muller B, Gaye AT, Hourdin F, Cisse N, 2012. Analyses multi-échelles des pauses pluviométriques au Niger et au Sénégal. *Sécheresse* 23 : 3-13. doi: 10.1684/sec.2012.0335.
- Salack S, 2013. *Analyse des pauses pluviométriques et évaluation des incertitudes de la pluie des modèles régionaux de climat à l'aide d'un modèle de culture*. Thèse de doctorat, université Cheikh Anta Diop de Dakar, Sénégal.
- Salack S, Giannini A, Diakhaté M, Gaye AT, Muller B, 2013. Oceanic influence on the subseasonal to interannual timing and frequency of extreme dry spells over the West African Sahel. *Climate Dynamics*. doi : 10.1007/s00382-013-r1673-4.
- Sarr B, 2011. Present and future climate change in West Africa : a crucial input for agricultural research prioritization for the region. *Atmospheric Sciences* 13 : 108-12.
- Sarr B, Traoré SB, Salack S, 2006. *Evaluation de l'incidence des changements climatiques sur les rendements des cultures céréalières en Afrique soudano sahélienne*. Niamey : Centre Régional Agrhy-met ; CILSS.
- Sene S, Ozer P, 2002. Évolution pluviométrique et relation inondations-événements pluvieux au Sénégal. *Bulletin de la Société Géographique de Liège* 42 : 27-33.
- Sivakumar MVK, 1988. Predicting rainy season potential from the onset of rains in Southern Sahelian and Sudanian climatic zones of West Africa. *Agricultural and Forest Meteorology* 42 : 295-305.
- Sivakumar MVK, 1992. Empirical analysis of dry-spells for agricultural applications in West Africa. *Journal of Climate* 5 : 532-9.
- Sultan B, 2012. Global warming threatens agricultural productivity in Africa and South Asia. *Environmental Research Letter* 7 : 041001.
- Sultan B, Baron C, Dingkuhn M, Janicot S, 2005. Agricultural impacts of large-scale variability of the West African monsoon. *Agricultural and Forest Meteorology* 128 : 93-110.
- Stern R, Rijks D, Dale I, Knock J, 2006. *Instat Climatic Guide*. Reading (UK) : University of Reading.
- Traoré SB, Reyniers FN, Vaksman M, Kouressy M, Yattara K, Yoroté A, et al., 2000. Adaptation à la sécheresse des écotypes locaux de sorgho du Mali. *Sécheresse* 11 : 227-37.
- Vincent LA, Aguilar E, Saindou M, Hassane AF, Jumaux G, Roy D, et al., 2011. Observed trends in indices of daily and extreme temperature and precipitation for the countries of the western Indian Ocean, 1961-2008. *Journal of Geophysical Research* 116 : D10108. doi: 10.1029/2010JD015303.
- Winkel T, Do F, 1992. Caractéristiques morphologiques et physiologiques de résistance du mil (P. glaucum) à la sécheresse. *Agronomie Tropicale* 46 : 339-51.