John Libbey EUROTEXT

L'essentiel de l'information scientifique et médicale

www.jle.com

Le sommaire de ce numéro

http://www.john-libbey-eurotext.fr/fr/revues/agro_biotech/sec/sommaire.md?type=text.html

Montrouge, le 28/03/2012

Seyni Salack

Vous trouverez ci-après le tiré à part de votre article au format électronique (pdf) :
Analyses multi-échelles des pauses pluviométriques au Niger et au Sénégal

paru dans
Sécheresse, 2012, Volume 23, Numéro 1

John Libbey Eurotext

Ce tiré à part numérique vous est délivré pour votre propre usage et ne peut être transmis à des tiers qu'à des fins de recherches personnelles ou scientifiques. En aucun cas, il ne doit faire l'objet d'une distribution ou d'une utilisation promotionnelle, commerciale ou publicitaire.
Tous droits de reproduction, d'adaptation, de traduction et de diffusion réservés pour tous pays.
© John Libbey Eurotext, 2012

SECHERESSE

Article de recherche

Sécheresse 2012 ; 23 : 3–13

Analyses multi-échelles des pauses pluviométriques au Niger et au Sénégal

Seyni Salack[1,2]
Bertrand Muller[3,4]
Amadou T. Gaye[1]
Frédéric Hourdin[5]
Ndiaga Cisse[2]

[1] Université Cheikh Anta Diop
Laboratoire de physique de l'atmosphère et de l'océan Siméon Fongang (LPAO-SF)
Ecole supérieure Polytechnique (ESP)
BP 5085
Dakar-Fann
Dakar
Sénégal
<seyni.salack@ucad.edu.sn>
<atgaye@ucad.edu.sn>
[2] Centre régional pour l'amélioration de l'adaptation à la sécheresse (Ceraas)
BP 3320
Thiès Escale
Thiès
Sénégal
<ncisse@refer.sn>
[3] Cirad
AGAP
F-34398 Montpellier
France
<bertrand.muller@cirad.fr>
[4] Africa Rice Center
Africa Rice
Sahel Regional Station
BP 96
Saint-Louis
Sénégal
[5] Laboratoire de météorologie dynamique du CNRS
Université Pierre et Marie Curie (UPMC)
Tour 45-55, 3e étage
BP 99
75252 Paris cedex 05
France
<hourdin@lmd.jussieu.fr>

Tirés à part : S. Salack

doi: 10.1684/sec.2012.0335

Résumé

Les épisodes intrasaisonniers de « jour sans pluie » ou pauses pluviométriques sont des événements néfastes pour le système agricole traditionnel au Sahel ouest-africain. L'objectif de cette étude est d'identifier la distribution intrasaisonnière et multisites des pauses pluviométriques, leur saisonnalité et leurs implications dans la variabilité de la pluviométrie locale. Les résultats définissent une pause régionale et montrent la prévalence des pauses extrêmes en début et en fin de saison. Ces types de pauses pluviométriques caractérisent les faux départs qui sont des événements pluviométriques intermittents observés en début de saison. Les pauses ≥ 15 jours (en mai-juin-juillet) et 8-14 jours (en août-septembre) sont de basse fréquence d'occurrence et corrélées aux déficits pluviométriques annuels. Les périodes à risque de ces types de pause sont les mêmes au Niger et dans la zone nord-guinéenne du Sénégal. Alors qu'un décalage d'environ un mois est observé entre les régions sahéliennes de ces deux pays. Les années ayant enregistré des pauses extrêmes de faux départ et de fin précoce de saison sur plus du tiers du réseau pluviométrique sont identifiées au Niger et au Sénégal. Ces résultats aboutissent ainsi à une meilleure compréhension de la distribution intrasaisonnière des pauses pluviométriques au Sahel ouest-africain.

Mots clés : distribution multi-échelles, Niger, pause pluviométrique, Sahel ouest africain, saisonnalité, Sénégal, variabilité pluviométrique.

Abstract

Multi-scale analyses of dry spells across Niger and Senegal

The intra-seasonal episodes of ''rainless days'' or dry spells are hazardous events for traditional rainfed agriculture in the West African Sahel. The objective of this study is to identify the seasonal and multi-site distribution of dry spells (DS), their seasonality and their implications in local rainfall variability. The results define a regional dry spell and show the prevalence of extreme dry spells after onset and before cessation of the rainy season. These types of dry spells mark the false start of the rainy season. Dry spells ≥15 days (in May-June-July) and 8-14 days (in August-September) are of low frequency of occurrence and correlated to rainfall deficits. Periods of these types of dry spells in Niger are similar to those found in the North Guinean regions of Senegal. Approximately a one-month lag is found between the Sahelian regions of the two countries. The years in which extreme dry spells were found to be coherent over at least one third of the observation network at onset and cessation of the rainy season are identified for Niger and the Sahel/Northern Guinean regions of Senegal. These results lead to a better understanding of the intraseasonal distribution of dry spells over the West African Sahel.

Key words: dry spell, multi-scale distribution, Niger, rainfall variability, seasonality, Senegal, West African Sahel.

Pour citer cet article : 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

Tiré à part auteur

© John Libbey Eurotext, 2012

Dans les régions semi-arides ouest-africaines, le début de la saison de pluie est rarement soudain. Généralement, il est précédé d'une succession d'averses isolées avec une intermittence marquée par des séquences de jours secs d'une certaine durée. Celles-ci sont des pauses pluviométriques (DS) prolongées dont la longueur peut être d'une, deux à trois semaines. Une telle situation de « *faux départs* » contribue à sécher la terre arable et empêche la germination ou l'émergence des jeunes plants (Ati *et al.*, 2002). Dans la majorité des cas, une fréquence élevée de ces pauses, durant la saison culturale (en phases végétatives et reproductives) occasionne aussi une baisse des rendements agricoles (Winkel et Do, 1992), quelles que soient les pratiques culturales de fertilisation et densité de semis adoptées comme l'ont montré Alhassane *et al.* (2006) sur une variété de mil au Niger. L'occurrence des pauses rend parfois la distribution intra-saisonnière des pluies peu ou pas profitables au cultivateur traditionnel. Les DS définissent également les dates de semis optimales (Sivakumar, 1988), le niveau du stress hydrique des cultures (état de déficit ou d'engorgement du sol), le calendrier d'irrigation et de fertilisation dans les périmètres irrigués. L'analyse précise des DS est donc très importante pour la compréhension du régime pluviométrique local et régional afin d'optimiser les choix d'options agronomiques dans la gestion et les pratiques agricoles en milieu paysan.

Plusieurs auteurs ont décrit les pauses au niveau sous-régional (Sivakumar, 1992 ; Martin-Vide et Garcia ; 1993 ; Frappart *et al.*, 2009) ou national (Segele et Lamb, 2005 ; Sané *et al.*, 2008 ; Deni *et al.*, 2010). Cependant aucune étude ne s'est intéressée à l'effet des changements d'échelles spatiales sur la distribution des pauses pluviométriques, leur saisonnalité et leurs implications dans les déficits pluviométriques récurrents des zones semi-arides. Au Sahel ouest-africain en particulier, après les travaux de Sivakumar (1992), peu d'études se sont intéressées à la mise à jour de l'état de l'art sur les pauses pluviométriques. Pourtant cela s'avère nécessaire au vu de la variabilité spatio-temporelle accrue de la pluviométrie locale comme cela s'observe dans les deux dernières décennies au Sénégal (Salack *et al.*, 2011). Sivakumar a caractérisé les DS (aux seuils de 1, 5, 20 25 mm/jour) pendant la période culturale à partir de la date de semis définie selon le critère de Sivakumar (Sivakumar, 1988). Cependant, ces dates de semis sont devenues assez variables et les saisons culturales assez courtes un peu partout dans le monde (Oxfam, 2009). Sané *et al.* (2008) ont identifié les pauses au niveau de deux stations du sud du Sénégal (Kolda et Velingara-Casamance), pour caractériser la saison des pluies et la tendance à long terme des pauses, au seuil de 0,1 mm. Ces deux stations sont situées en zone relativement humide (> 800 mm/an) du Sénégal alors que les risques agroclimatiques associés aux pauses pluviométriques sont plus importants dans les régions arides et semi-arides du Sahel (Barron *et al.*, 2003 ; Segele et Lamb, 2005 ; Frappart *et al.*, 2009).

Les nouvelles tendances locales, dans un contexte de changement climatique global de plus en plus pressant, suggèrent une révision du concept de sécheresse avec de nouvelles approches. Ces nouvelles approches doivent tenir compte non seulement des situations observées au niveau d'un pluviomètre (échelle locale) mais aussi aux alentours du pluviomètre (à une plus grande échelle). Dans ces conditions, les approches de Sivakumar (1992), Martin-Vide et Garccia (1993), Segele et Lamb (2005), Lanà *et al.* (2008) ou Deni *et al.* (2010) qui consistent à analyser les pauses observées au niveau d'un pluviomètre sont considérées comme des approches locales. L'objectif principal de cette étude est de caractériser la distribution des pauses pluviométriques à différentes échelles (spatio-temporelles) en déterminant les relations entre : i) une pause locale (échelle du pluviomètre) et régionale (échelle d'un et de deux degrés carrés) ; ii) la saisonnalité de certaines catégories de pauses pluviométriques et la qualité du cumul saisonnier final pour une meilleure appréhension des risques agroclimatiques. Le décompte des DS est basé sur des séries de longueurs de pauses, extraites des données pluviométriques journalières observées au Niger (1971-2000) et au Sénégal (1950-2010). Les extractions sont faites au seuil de 0,1 mm/jour de la première à la dernière pluie observée par saison. Ce seuil permet de prendre en considération toutes les pluies observées au sol qui relèvent d'un système pluvio-orageux locale ou méso-échelle. Ainsi, on identifie une DS à l'aide de trois indicateurs : sa date de début (STDATE), sa durée (L) et sa fréquence d'occurrence par saison (F). En comparant le Niger (pays continental) et le Sénégal (pays côtier), cette étude permet d'affiner notre compréhension des similitudes du Sahel central et du Sahel ouest-africain (Lebel et Ali, 2009). La source des données utilisées, une mise à jour de la climatologie des précipitations dans les zones d'étude et les méthodes d'extraction locales et multisites sont exposées dans la première section. Les résultats sur la distribution spatio-temporelle des pauses, leur typologie, saisonnalité et implication dans la qualité des saisons sont détaillés dans la section suivante. Cette même section traite de la variabilité interannuelle des pauses extrêmes en début et milieu de saison et le concept de faux départ. Les conclusions et perspectives de cette étude constituent la dernière section.

Matériel et méthode

Source des données et mise à jour de la climatologie des précipitations de la zone d'étude

Les données du Sénégal sont extraites de la base de données du Centre d'études régional pour l'amélioration de l'adaptation à la sécheresse (Ceraas) qui relève de l'Institut sénégalais de la recherche agricole (Isra). Elles proviennent de divers réseaux d'observation dont celui de l'Agence nationale de la météorologie du Sénégal (Anams) (stations synoptiques, climatologiques et pluviométriques) et celui mis en place par Isra/Ceraas dans le cadre du suivi agro-sylvopastoral national. Ce sont des données journalières de 87 sites dont les séries sont complètes. Ces sites sont choisis après un contrôle de qualité rigoureux sur un total de presque 200 sites (Salack *et al.*, 2011). Parmi eux, 31 sites remontent jusqu'en 1950 tandis que les 56 autres commencent leur série à partir de 1991 et s'arrêtent en 2010. La longue série est utilisée pour établir les isohyètes du cumul moyen des trente dernières années (*figure 1A*). La plus longue série, commune aux 87 sites, concerne la période 1991-2010 (*tableau 1*). Elle est utilisée pour l'analyse multisites des pauses pluviométriques ci-après).

On met en évidence quatre zones pluviométriques différentes au Sénégal. La zone nord (NZ) dont la pluie moyenne annuelle est en dessous de 400 mm. La zone centre nord (CN) est comprise entre 400 mm et 600 mm. La zone centre sud (CS) est située entre 600 mm et 800 mm. La zone sud (SZ) concerne toute la région où le cumul moyen est supérieur à 800 mm. Ce zonage est basé sur les contrastes des conditions agronomiques en milieu paysan de ces régions. En moyenne, il pleut davantage et plus fréquemment dans les parties centrales et sud du pays que dans les régions du

© John Libbey Eurotext, 2012

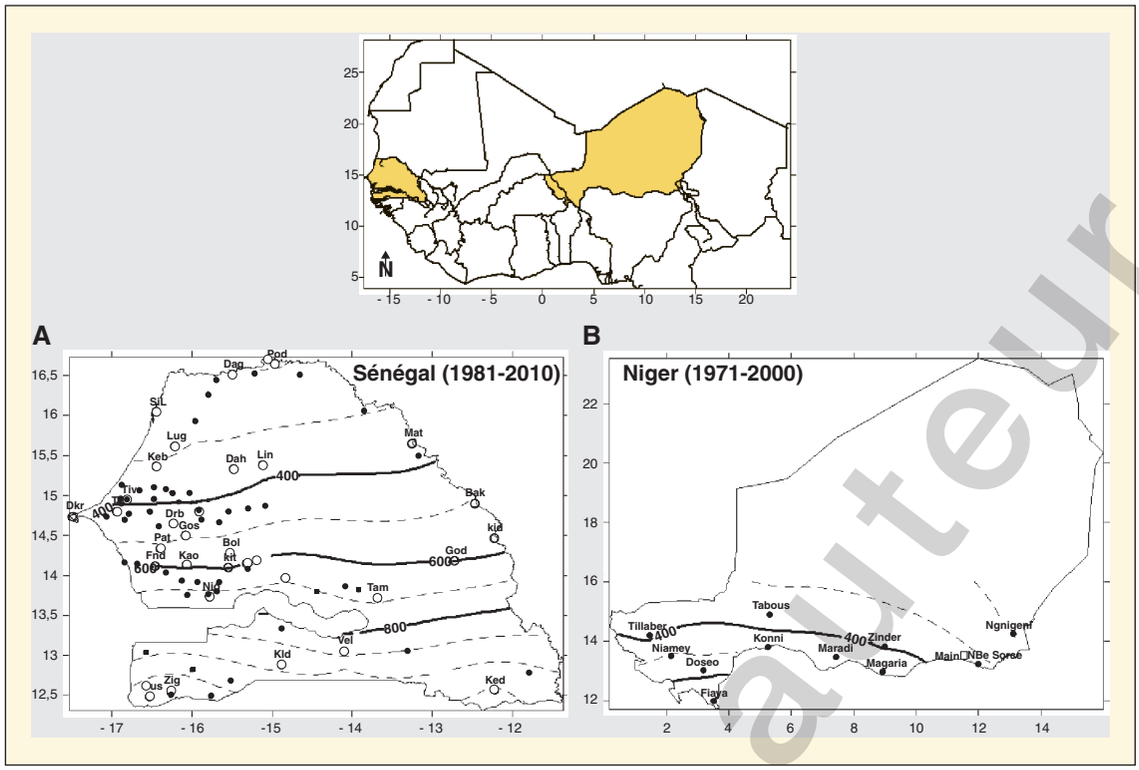

Figure 1. Cartes des postes pluviométriques utilisés et isohyètes.
Axes horizontaux : longitude ; axes verticaux : latitude.

nord (Moron *et al.*, 2006 ; Dieng *et al.*, 2008). À la fin des années 1960, il y a eu un déficit pluviométrique interdécennal de l'ordre de 10 à 20 % qui a duré presque trois décennies consécutives. Depuis la fin des années 1990, ce déficit pluviométrique interannuel est considérablement résorbé dans le pays. Selon Salack *et al.*, (2011), il y a un retour notable des cumuls journaliers intenses et une augmentation de l'occurrence des pauses courtes en accord avec le nombre de jours pluvieux. Comparativement aux décennies de sécheresse les tendances récentes présentent des différences statistiquement significatives de l'ordre de +10 à +17 % en moyenne zonale et +23 à +32 % localement sur le cumul annuel des pluies. Ces nouvelles tendances décennales sont plus marquées dans les régions soudaniennes et sahéliennes du pays (où le cumul annuel est < 800 mm/an) que dans les régions nord guinéennes (Extrême-Sud où le cumul annuel est > 800 mm/an). Cette situation est proche de ce qui se remarque dans le Sahel central et le Sahel est en général (Lebel et Ali, 2009) et dans le Gourma en particulier (Frappart *et al.*, 2009).

Les données du Niger proviennent de la Direction nationale de la météorologie de Niamey. Les séries journalières sont disponibles pour 1971 à 2000 sur 11 stations (*figure 1B*). La fréquence et l'intensité pluviométrique diminuent du sud au nord avec un cumul annuel compris entre 800 mm à 100 mm. Seule la station de Gaya peut enregistrer un cumul avoisinant 800 mm. Le zonage aboutit à seulement deux bandes pluviométriques minces au nord de Gaya. Le Sud-Ouest et l'Ouest du pays, incluant les stations de Magaria, Maradi, Konni, Dosso, Niamey et Tillabery sont dans la bande pluviométrique de 600-400 mm. Au nord de cette bande, le cumul annuel ne dépasse guère 400 mm. Malgré sa position enclavée, sa surface désertique à 90 % et ses caractéristiques climatiques purement semi-arides et arides, le Niger fait partie du Sahel central dont la pluviométrie connait une certaine augmentation dans les deux dernières décennies (Lebel et Ali, 2009).

Tableau 1. Nombre de postes pluviométriques dont les séries journalières sont complètes.

Pays	1950-2010	1971-2000	1991-2010	Total
Sénégal	31*	31*	56	87
Niger	0	11	0	11

* Pour ces deux périodes, les postes pluviométriques sont les mêmes au Sénégal.

Algorithme définissant un « jour sec régional »

À l'échelle du pluviomètre (échelle locale), on se donne un seuil en dessous duquel un jour est dit « sec » (Stern *et al.*, 2006). Au-delà de ce seuil le jour est déclaré pluvieux. Le seuil adopté dans cette analyse est de 0,1 mm/jour. Après un jour pluvieux, deux ou plusieurs jours consécutifs « sans pluie » constituent une séquence sèche. Cette séquence se termine au prochain jour pluvieux. La longueur totale d'une séquence sèche (L) est une pause pluviométrique (DS). On sort toutes les pauses pluviométriques en

Tirés à part auteur
© John Libbey Eurotext, 2012

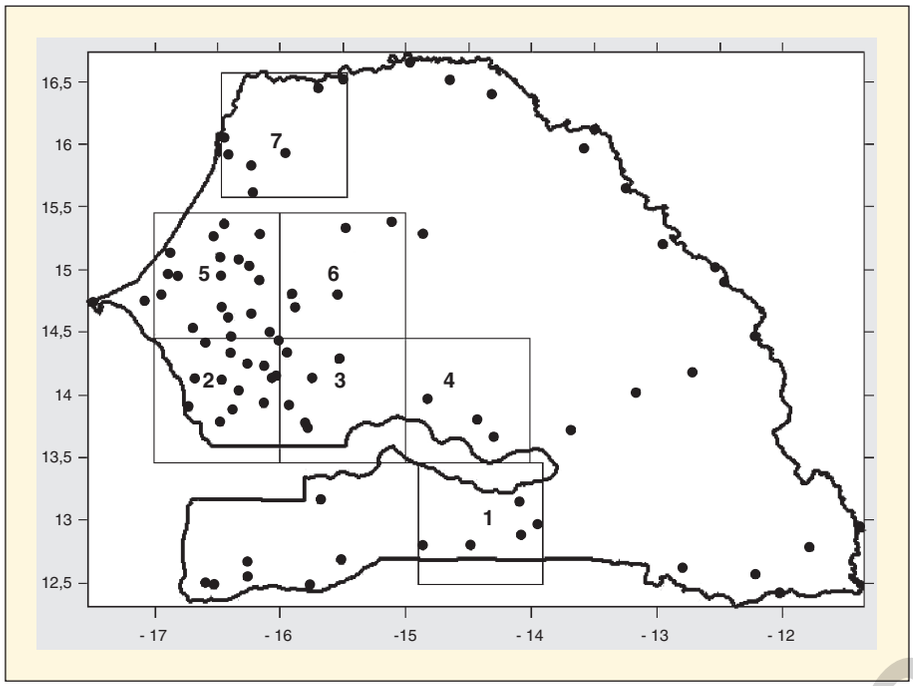

Figure 2. Maillage du Sénégal.

Axe horizontal : longitude ; axe vertical : latitude. Les degrés carrés GB1 à GB7 ont de 4 à 18 postes pluviométriques (sites). La zone englobant GB2, GB3, GB5 et GB6 (42 sites) forme une région de 2° × 2° (B2×2).

fonction de leur date de début (STDATE), leur longueur (L) et le nombre de fois qu'elles sont observées (F). Pour cela, on codifie les données de pluie journalières en RD = 0 (pour un jour sec) et RD = 1 (pour un jour pluvieux). Cette information constitue la base de données des pauses locales.

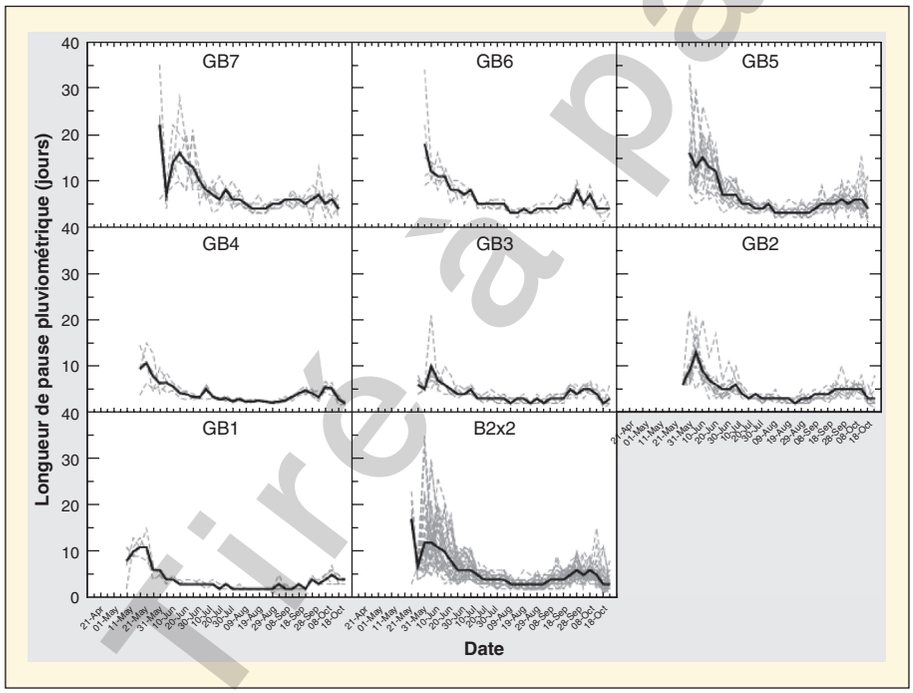

Figure 3. Distribution moyenne saisonnière (courbe noire) des pauses pluviométriques locales (courbe grise).

Le Sénégal a un réseau de pluviomètres plus dense que celui du Niger et le gradient pluviométrique est représentatif de celui de la sous-région (Salack *et al.*, 2011). C'est pourquoi les données de ce pays sont utilisées dans les analyses multisites. On subdivise le territoire en des carrés de 1×1 degré, 2×2 degrés (*figure 2*). Ces carrés sont considérés comme des régions uniformes. Les sept degrés carrés GB1, GB2……GB7, (notés GB1-*7*) conservent le gradient intrazonal du cumul moyen annuel des zones de référence (cf. NZ, CZ, CS, SZ). Les sites couverts par les GB1-*7* varient de 4 (cas du GB4) à 18 (cas du GB5). Le GB*7* est situé dans la zone nord (NZ) et le GB1 dans la zone sud (SZ). Les GB2, 3, 4 *5*, 6 sont répartis entre les zones centrales (CN, CS). La fusion des régions GB2, GB3, GB5 et GB6 forme une plus grande région de deux degrés carrés (B2×2). L'échelle des GB1-*7* (∼100 × 100 km) ou celle de la grande région B2×2 (∼200 × 200 km) est représentative d'une maille de modèle de climat comme le décrit Salack (2007).

Pour un carré, on crée une matrice binaire $B_{NxM} = RD_{ij} = \{0, 1\}$ dont les coefficients sont les événements de pluie journalière (RD) : 0 = jour sec, et 1 = jour pluvieux (au seuil de 0,1 mm/jour de pluie). Les dimensions *NxM* représentent respectivement les jours de l'an (*i* = 1, 2, 3…*N*, en ligne) et l'ensemble de pluviomètres (*j* = 1, 2, 3…*M*, en colonne) installés dans le carré (région). Le jour sec à l'échelle régionale ($RRD_{Nx\alpha}$) est défini selon les conditions ci-dessous.

$$RRD_{Na} = \begin{cases} 0 \quad si \quad \sum_{j=1}^{M} RD_{ij} \le M(1-\alpha) \\ 1 \quad si\ non \end{cases} \qquad (1)$$

Les lignes N (*i = 1, 2, 3…N*) contiennent les jours secs ou pluvieux de l'année et les colonnes (α) contiennent des valeurs dans l'intervalle]0, 1] qui constituent la fraction des postes pluviométriques du carré. Selon les conditions de l'équation (1), un jour est sec à l'échelle d'une région, lorsqu'il est rapporté par au moins une portion (α) du réseau d'observation. À chaque valeur α, on extrait les pauses régionales sur la base de $RRD_{Nx\alpha}$ en comptant le nombre de jours secs consécutifs (RRD = 0) avant le prochain jour pluvieux (RRD = 1). Ainsi, les *7* régions de 1×1 degré (GB1-*7*) et la région de 2×2 degrés (B2×2) disposent chacune d'une base de données de pauses « régionales » identifiées par leur STDATE, L, et F par saison. L'analyse

Tirés à part

© John Libbey Eurotext, 2012

de cette base de données permet de définir une pause régionale.

Résultats et discussion

Caractérisation multi-échelles des pauses pluviométriques

• Les cycles saisonniers locaux

La distribution de la longueur moyenne des pauses locales est représentée par la *figure 3*. On remarque une différence des dates de début car l'extraction des pauses est faite sur la base de la première pluie observée à la station. Du sud au nord, la première pluie apparaît dans l'intervalle de la seconde quinzaine de mai à la deuxième décade de juin. Mais ces événements de pluie sont assimilables à des faux départs puisqu'ils sont suivis par des pauses pluviométriques assez longues (parfois supérieures à 2 semaines). Cette différence des périodes à risque reflète également la variabilité spatiale des débuts de saison sur le territoire (Salack *et al.*, 2011). Les pauses supérieures à *7* jours persistent jusqu'à la première décade de juin au sud du Sénégal. Dans les régions centrales, elles sont observées jusque dans la première décade de juillet. Tandis que dans les régions du Nord on les observe au plus dans la dernière décade de juillet.
Par rapport à la première pluie observée, les événements de pauses extrêmes sont plus importants dans la période mai-juin-juillet et parfois en octobre. Le début de saison (mai-juin-juillet) est l'apanage des faux départs qui sont parfois responsables des pertes de semis en milieu paysan (Ati *et al.*, 2002 ; Sultan *et al.*, 2005). Il s'agit souvent du cas d'une « *grosse pluie* » en début de saison, isolée du reste de la saison par une pause pluviométrique trop longue pour la végétation. Les causes possibles de l'occurrence des pauses de plus d'une semaine en début de saison peuvent être le déplacement de la zone de convergence intertropicale (ZCIT) (Nicholson, 2009), la variation de l'intensité et l'étendue de la dépression thermique saharienne (Sultan et Janicot, 2003) et les intrusions d'air sec extra-tropical dans la haute troposphère (Roca *et al.*, 2005).

• Qu'est-ce qu'une pause régionale ?

Pour répondre à cette question on choisit de considérer la pause pluviométrique en termes de séquence sèche synchronisée sur une fraction des postes pluviométriques (sites) d'une région. On parle ainsi de pauses pluviométriques simultanées appelées ici pauses pluviométriques régionales (RDS_α), extraites sur la base de la définition d'un jour sec régional. La *figure 4* illustre le cas des régions GB5 (18 sites) et B2×2 (42 sites). La pause régionale sur 100 % du réseau (soit α égal 1) est illustrée par la courbe RDS1 (*figure 5*). Il s'agit souvent d'une accalmie des précipitations ressenties d'une manière uniforme sur tout le réseau d'observation. La distribution des pauses régionales RDS1 est similaire à la distribution du cumul journalier de pluie dans une série de pluie moyenne régionale. Si l'on considère que la série pluviométrique régionale dérive de la moyenne spatiale des sites couverts par la région, alors la fréquence des pauses extrêmes est sous-estimée et la fréquence des petites et longueurs intermédiaires de pauses est surestimée au détriment de la fréquence des grandes pauses. Mais une situation de pause régionale de longueur *L* peut éventuellement s'accompagner de quelques pluies ponctuelles éparses. Pour prendre en compte ces cas, on choisit de réduire progressivement la fraction de sites α, en la faisant tendre vers des valeurs faibles. Par exemple au seuil de 0,*7* (RDS0.*7*), on admet qu'au moins 13 des 18 sites du GB5 (ou 29 des 42 sites de la région B2×2) enregistrent une séquence sèche synchronisée (*figure 4*). Quand α tend vers les seuils de 0,3 ou moins, la distribution des pauses régionales ressemble à celles observées localement (*figure 5*). La répartition des pauses régionales montre également que les pauses longues se trouvent en début (fin) de saison et les pauses courtes se trouvent en août-septembre.
L'estimation du nombre moyen d'occurrences saisonnières des pauses régionales sur des portions du réseau du carré GB5 est illustrée à la *figure 4*. La moyenne spatiale des pauses locales (DS-moy) est représentée par les cercles pleins. Les barres d'erreurs désignent la différence entre les sites (écarts type intersites) du réseau local. La fréquence moyenne des pauses locales de 1-*7* jours est similaire à celle des pauses régionales où la fraction des sites α est entre 0,*7* et 0,9 (RDS0.*7*-0.9). Au seuil de 8-14 jours cette similitude se retrouve seulement sur les pauses régionales aux seuils 0,*7*-0,8. Les pauses synchrones sur tout le réseau (RDS1) sont le plus souvent de courtes durées et concentrées dans la période d'intensification des pluies. Il faut atteindre des longueurs de pauses supérieures à 14 jours pour que le nombre d'occurrences à l'échelle locale soit assimilable à une situation régionale. Cette situation

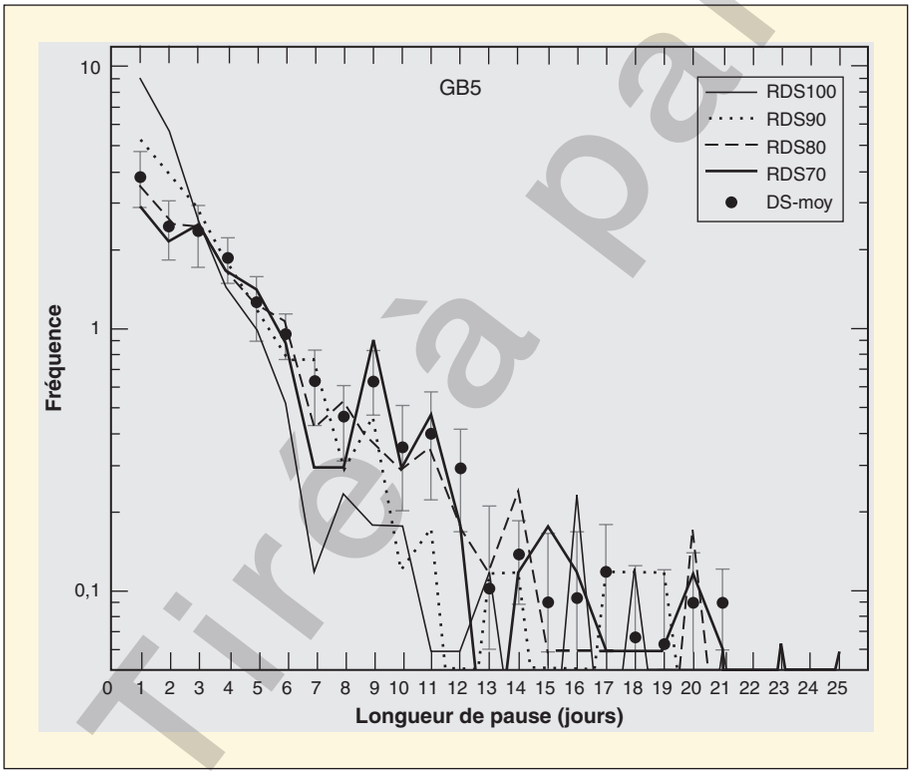

Figure 4. Nombre moyen de longueur de pauses locales (cercles pleins) et régionales ($RDS\alpha$) sur la période 1991-2010.

Tiré à part

© John Libbey Eurotext, 2012

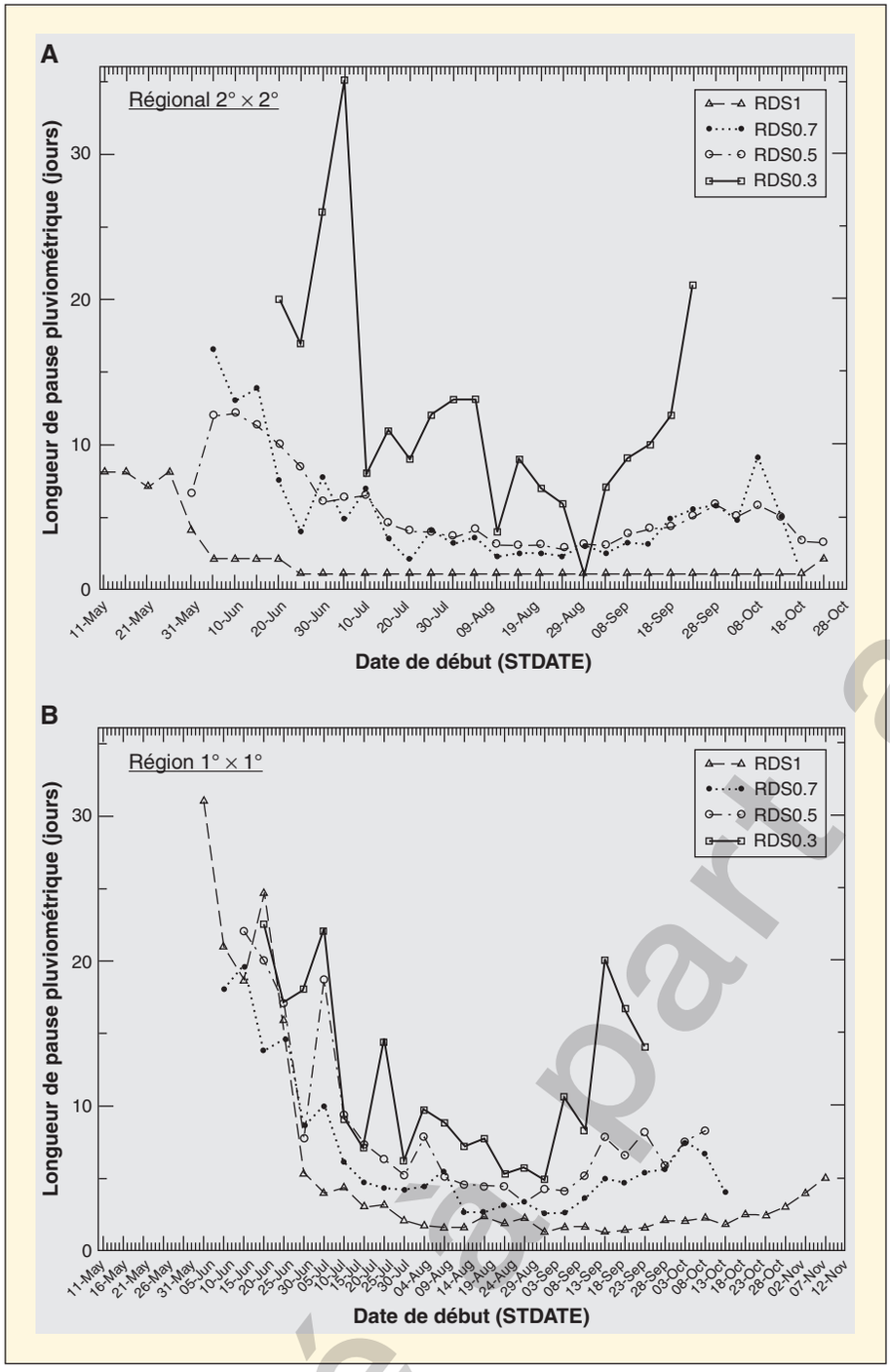

Figure 5. Distribution moyenne saisonnière des pauses régionales.
A) région d'un degré carré (GB5) ; B) région de deux degrés carrés (B2×2).

révèle une certaine corrélation entre la fréquence des pauses locales supérieures à 14 jours et les pauses régionales de même longueur. Par conséquent, la simultanéité des pauses locales sur une région (1×1 degré ou 2×2 degrés) ou une portion des sites d'une région dépend de la période intrasaisonnière considérée.

• Classification générale des pauses pluviométriques

Sur la base de leurs dates de début, longueurs et fréquences d'occurrence multi-échelles, les pauses pluviométriques (DS) peuvent être classées en deux grands groupes : les pauses ordinaires (ODS) et les pauses majeures (MDS). Les ODS sont constituées essentiellement des pauses courtes et moyennes. Le qualificatif « ordinaire » est lié au fait que les ODS sont observées ou observables dans le courant de la saison des pluies quelle que soit la qualité de l'année (sèche ou humide) des régions arides et semi-arides de l'Afrique (Sivakumar, 1992 ; Barron *et al.*, 2003 ; Segele et Lamb, 2005). Les pauses ordinaires courtes concernent les classes de 1-3 jours (DS1) et de 4-7 jours (DS2). Tandis que les pauses ordinaires moyennes durent 8-14 jours (DS3). Les catégories DS1 et DS2 sont plus fréquentes et plus homogènes en zone SZ et CS qu'en CN et NZ du Sénégal mais elles le sont moins au Niger (*figure 6*). En pratique, la catégorie DS1 n'est pas réellement préjudiciable aux cultures mais témoigne de la pluviosité d'une région comme cela est le cas en zone sud (SZ) du Sénégal. Sur les postes pluviométriques de ces deux pays, la catégorie DS1 est observée généralement pendant la phase intense de la saison des pluies (août-septembre). Quant à la catégorie DS2, elle est déterminante en début de saison, pour l'identification des dates optimales de semis en régime humide (Sivakumar, 1988). La catégorie DS3 est observable en début et/ou en fin de saison. Par ailleurs son apparition en août-septembre affecte la production du mil car elle coïncide avec la formation des talles puis la phase de maturation des épis chez le mil (Winkel et Do, 1992). Selon Salack *et al.* (2011), la fréquence d'occurrence de DS1 et DS2 suit le gradient Nord-Sud de la pluviométrie journalière au Sénégal, alors que la distribution spatiale de DS3 est assez irrégulière et ne présente pas de lien systématique avec la distribution spatiale de la pluviométrie.

Les pauses majeures (MDS) comprennent la catégorie de pauses supérieures ou égales à 15 jours (DS4). Pour certaines considérations agronomiques DS4 se subdivise en deux sous-classes (15-20 jours et supérieure à 20 jours) (Sivakumar, 1992 ; Salack *et al.*, 2011). La catégorie DS4 apparaît en début de saison, le plus souvent après les premières pluies de la saison caractérisant ainsi les faux départs. Elle exprime la rareté des événements convectifs pluvio-orageux en cette période dans la zone d'étude. Elles peuvent également causer des stress hydriques sévères, justifiant la perte de 30-50 % des rendements du mil à Niamey (Sultan *et al.*, 2005). Ces types de pauses sont assez aléatoires, de basse fréquence d'occurrence par saison et constituent la queue de la distribution comme on le voit sur la *figure 6*. On

Tirés à part auteur

© John Libbey Eurotext, 2012

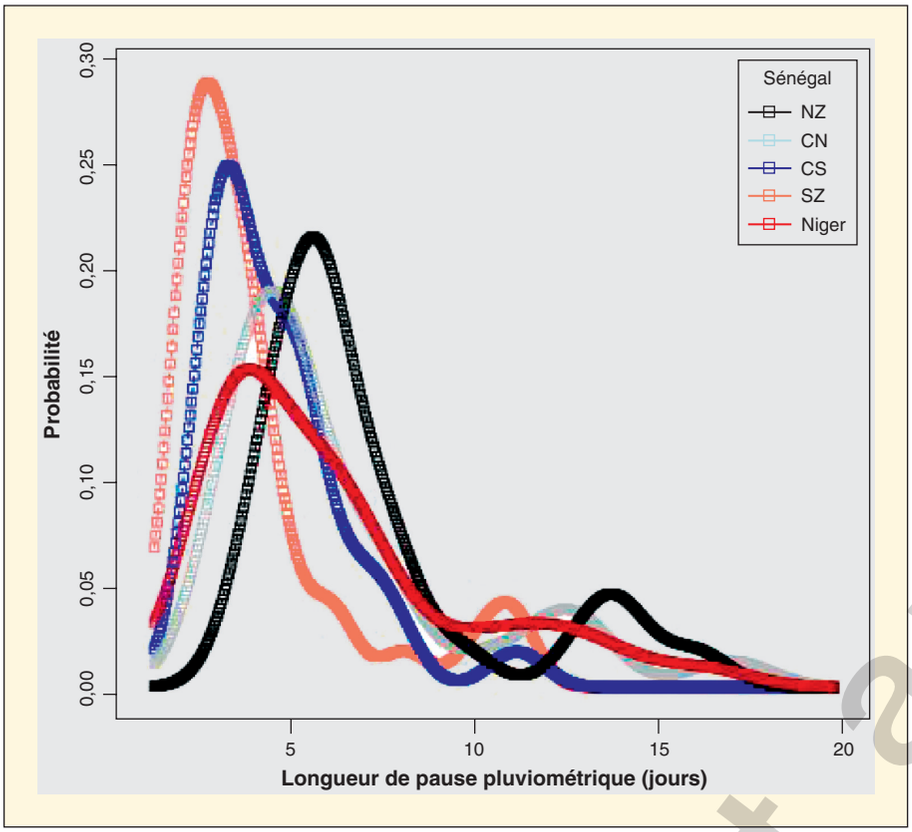

Figure 6. Densité de probabilité de la longueur moyenne saisonnière des pauses locales par zone pluviométrique au Sénégal des zones nord (NZ), centre nord (CN), centre sud (CS), sud et au Niger.

remarque que les pauses moyennes et majeures sont plus fréquentes dans les zones soudaniennes et sahéliennes.

Implication de la saisonnalité des pauses pluviométriques dans la variabilité de la pluie

La *figure 7* est l'intercomparaison de la distribution des dates de début au Niger et au Sénégal. Les dates sont extraites de toute la base de données disponible au Niger (1971-2000) et au Sénégal (1950-2010). Les dates de début (STDATE) d'une pause de catégorie DS4, dans les régions sud du Sénégal (plus de 800 mm/an), sont similaires à celles des régions soudano-sahéliennes du Niger. Cette similitude témoigne d'une certaine cohérence spatiale à l'échelle du Sahel de l'installation de la mousson dans ces régions car ces dates sont extraites à partir de la première pluie. Les dates d'occurrence des pauses de catégorie DS4 entre les 75^{e} et 95^{e} centiles de l'ensemble des cas détectés sont résumées dans le *tableau 2*. Dans les régions sud du Sénégal, les périodes à risques de pause extrême se situent entre le 7 juin et le 9 juillet, soit 32 jours critiques. Tandis que dans les régions soudaniennes et sahéliennes du Sénégal et du Niger, ces risques sont répartis sur 22 jours entre le 5 et le 27 juillet et entre le 5 et le 27 juin respectivement. Ces résultats viennent compléter ceux des études antérieures sur la nature des risques associés à ces périodes intrasaisonnières. En effet, selon Dieng *et al.* (2008), au Sénégal ces périodes sont caractérisées par des minima du cumul pentadaire traduisant ainsi une inactivité de la mousson. À Niamey (Niger), Sultan *et al.* (2005) ont remarqué une réduction (35-50 %) du rendement potentiel simulé lorsque la date moyenne d'installation de la mousson (28 juin $\pm$ 8 jours) est utilisée comme date de semis. Ce qui montre l'effet négatif de ces pauses extrêmes en début de saison sur les rendements du mil en association avec le déficit du cumul pluviométrique saisonnier. Par ailleurs, on observe un décalage d'environ un mois dans le démarrage de la saison culturale optimale au Niger (pays continental du Sahel central) et les régions sahéliennes du Sénégal (pays côtier à l'extrême Sahel ouest) (*tableau 2*). Les périodes d'occurrence de pauses moyennes de catégorie DS3 (en août-septembre) sont uniformes dans les régions pluviométriques de la zone d'étude (*tableau 3*). Ce caractère se justifie par la dynamique régionale du front intertropicale (FIT) dont le retrait se déroule d'une manière stable et régulière sur la région du Sahel ouest-africain.

Existe-t-il une relation entre l'occurrence d'une catégorie de pauses et le caractère déficitaire, excédentaire ou normale de la saison ? La *figure 8* (A, B) découle d'une analyse de l'effet de la saisonnalité des pauses vis-à-vis du cumul pluviométrique annuel. Elle met en relation le nombre moyen d'occurrence des quatre catégories de pauses (DS1, DS2, DS3, DS4), dans les différentes périodes intrasaisonnières de la saison et les cumuls pluviométriques annuels. L'occurrence des pauses de 1-7 jours (catégories DS1 et DS2), en début, milieu ou fin de saison est corrélée aux excédents pluviométriques (*figure 8A*). Tandis que les pauses moyennes et longues (catégories DS3 et DS4) tendent à être corrélées aux déficits pluviométriques (*figure 8B*). Pour les pauses extrêmes en début de saison de type DS4, cette relation est assez évidente dans les régions soudano-sahéliennes et sahéliennes ($<$ 600 mm/an). Quant aux pauses de catégorie DS3, elles sont susceptibles d'expliquer les déficits pluviométriques saisonniers si elles apparaissent en août-septembre quelle que soit la zone pluviométrique considérée (*figure 8B*).

Pour déterminer le caractère excédentaire, normal ou déficitaire, on utilise la moyenne des indices d'anomalies standardisées de tous les sites du Sénégal et du Niger (RAI). Sur le RAI nous appliquons le critère d'Ali et Lebel (2009). Ce critère consiste à considérer une année excédentaire lorsque les valeurs du RAI sont supérieures à + 0,5. Les années normales sont celles pour lesquelles les valeurs du RAI sont dans l'intervalle [- 0,5, + 0,5]. Et les années déficitaires sont celles dont les valeurs de leur RAI sont inférieures à - 0,5 (Ali et Lebel, 2009). Le *tableau 2* présente la liste des années dans lesquelles l'occurrence des pauses est observée sur plus du tiers du réseau d'observations. Toutes les années ayant enregistré des pauses extrêmes de catégorie DS4 en début de saison et DS3 en août-septembre sont déficitaires. Tandis que les années ayant enregistré uniquement une DS4 ou DS3 sont

© John Libbey Eurotext, 2012

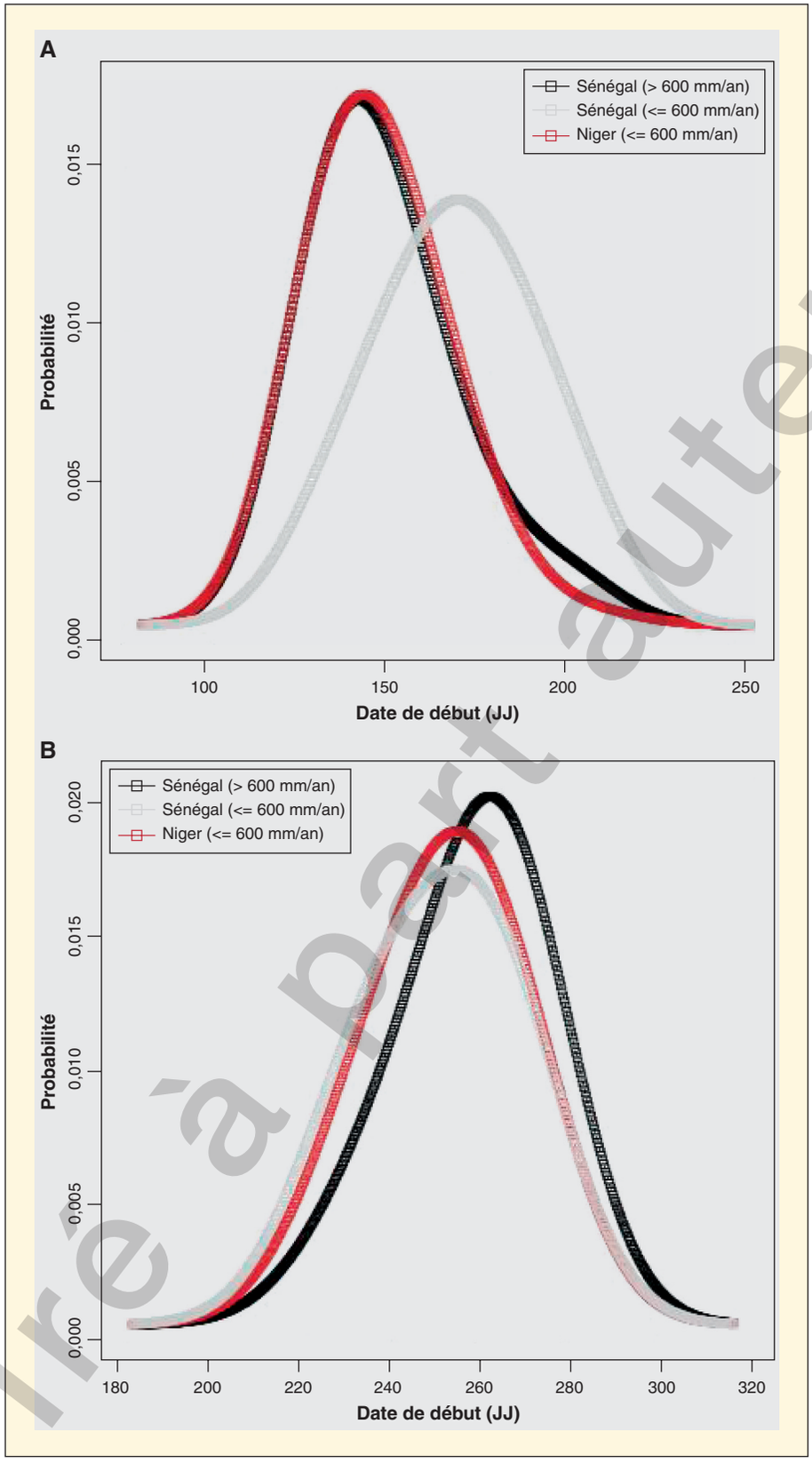

Figure 7. Densité de probabilité des dates de début de pauses dans différentes zones pluviométriques au Niger et au Sénégal.
A) en début de saison, après les premières pluies ; B) en août-septembre dans la phase active de la mousson.

Tiré à part auteur

© John Libbey Eurotext, 2012

Tableau 2. Périodes à risques de faux départ et fin précoce caractérisées par la prévalence de pauses pluviométriques de catégories DS4 et DS3 au Sénégal et au Niger.

Catégorie DS4	Date au 75e centile	Date au 95e centile	Durée de la période à risque
Sénégal (> 600 mm/an)	7 juin	9 juillet	32 jours
Sénégal (≤600 mm/an)	5 juillet	27 juillet	22 jours
Niger (≤600 mm/an)	5 juin	27 juin	22 jours
Catégorie DS3			
Sénégal (> 600 mm/an)	24 sept	29 sept	5 jours
Sénégal (≤600 mm/an)	20 sept	28 sept	8 jours
Niger (≤600 mm/an)	18 sept	28 sept	10 jours

Tableau 3. Liste des années ayant subi des pauses pluviométriques extrêmes sur plus du tiers des postes pluviométriques du pays en mai-juin-juillet (catégorie DS4) / août-septembre (catégorie DS3) au Sénégal et au Niger.

Sénégal	Catégorie DS4 (mai-juillet)	Catégorie DS3 (août-sept)
Catégorie DS4 (mai-juillet)	1973, 1974, 1975, 1980, 1982, 1983, 1986, 1987, 1988, 1995, 2002	1972, 1976, 1977, 1991, 1992, 1997, 2007
Catégorie DS3 (août-sept)	1972, 1976, 1977, 1991, 1992, 1997, 2007	1952, 1956, 1957, 1960, 1961, 1964, 1968, 1985, 1989, 1990, 1993, 1998, 2000, 2001, 2003, 2004, 2006, 2008
Niger		
Catégorie DS4 (mai-juillet)	1971, 1974, 1975, 1981, 1989, 1995	1984, 1987, 1990
Catégorie DS3 (août-sept)	1984, 1987, 1990	1972, 1982, 1991, 1993, 1996,1997, 2000

localement normales ou sèches (*tableau 3*). Quelques exceptions sont observées sur les occurrences des pauses DS3 dans les années 1952, 1956, 1957, 1960, 1961, 1964 et 1968 reconnues pour leur caractère excédentaire.

Conclusion et perspectives

La définition d'un jour sec à l'échelle locale et à l'échelle régionale a permis d'identifier une certaine saisonnalité dans la distribution intrasaisonnière des pauses pluviométriques. En considérant la longueur de la pause, sa date de début et sa fréquence d'occurrence saisonnière, les pauses courtes (1-7 jours ou catégories DS1, 2) sont plus fréquentes en phase d'intensification de la saison et essentiellement liées aux excédents pluviométriques interannuels. Les pauses majeures (≥ 15 jours ou catégorie DS4) et moyennes (8-14 jours ou catégorie DS3) sont assez rares et associées aux faux départs et fins précoces des saisons de pluie. Elles sont des pauses extrêmes, corrélées aux déficits pluviométriques interannuels dans les zones sahéliennes de la zone d'étude. Les périodes à risques de pauses extrêmes se situent entre le 7 juin et le 9 juillet au sud du Sénégal (régions ayant plus de 600 mm/an). Dans les régions sahéliennes du Niger et du Sénégal (régions ayant moins de 600 mm/an) ces risques s'observent entre le 5 et le 27 juillet et entre le 5 et le 27 juin respectivement.

La connaissance du caractère saisonnier de l'occurrence des pauses pluviométriques extrêmes permet d'éviter les faux départs, les périodes à risque de stress hydrique et d'optimiser le choix des dates de semis en milieu paysan. Cependant la tendance de ces types de pauses à être associées aux déficits pluviométriques n'est pas une condition suffisante pour émettre une prévision agro-météorologique alarmiste lorsqu'une pause extrême est observée de manière évidente sur le réseau pluviométrique d'une région. Il est donc nécessaire de cerner toute la prévisibilité des pauses extrêmes dans la zone d'étude afin d'améliorer la veille agro-météorologique. Pour vérifier la qualité agronomique des saisons vis-à-vis de l'occurrence des pauses extrêmes, il va falloir réaliser des simulations à

Tiré à part auteur

© John Libbey Eurotext, 2012

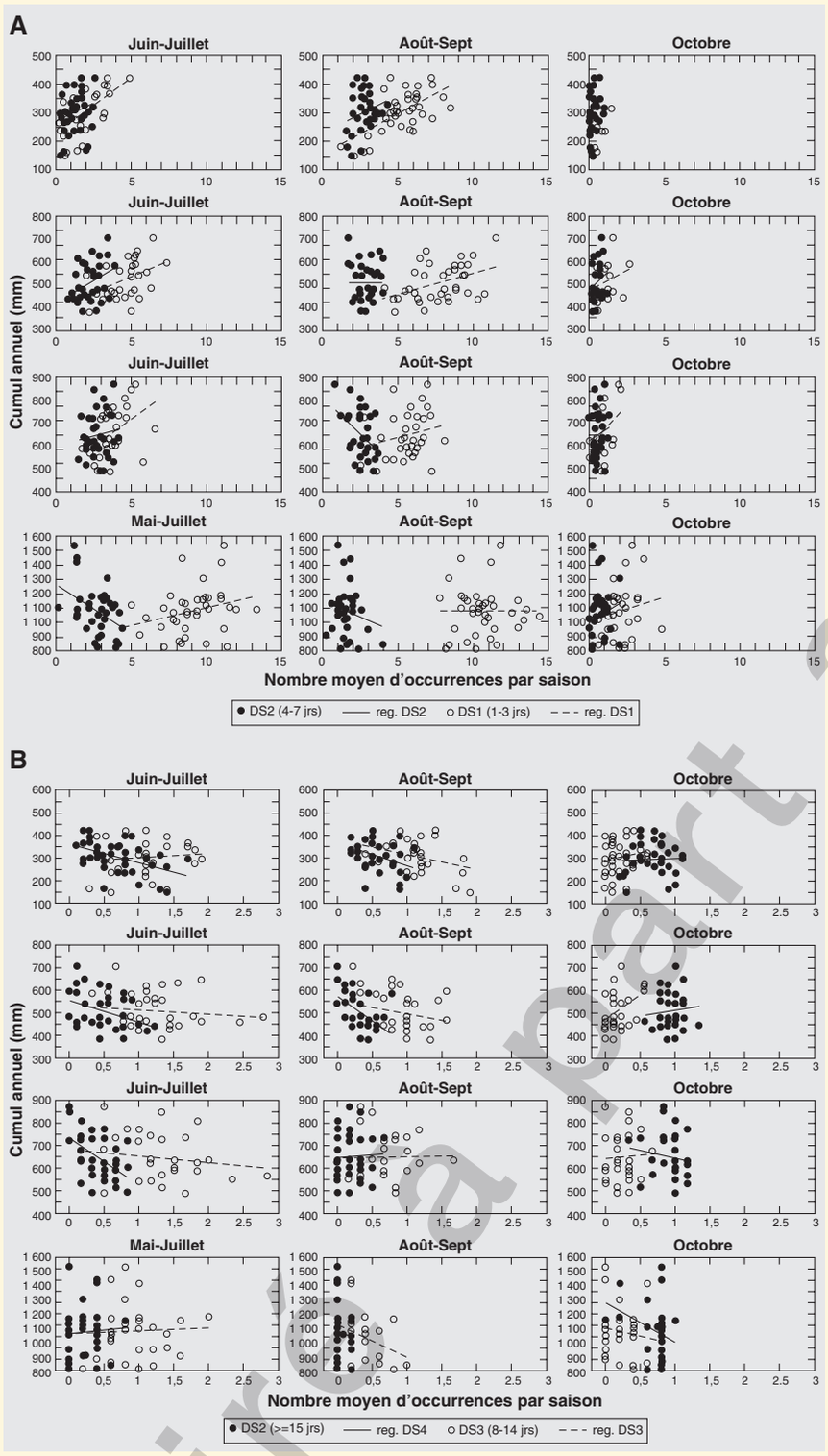

Figure 8. Relation entre l'occurrence intrasaisonnière des pauses pluviométriques et les cumuls annuels observés par zones pluviométriques.

A) les catégories DS1 (1-3 jours) et DS2 (4-7 jours) ; B) les catégories DS3 (8-14 jours) et DS4 (≥ 15 jours).

l'aide d'un modèle de culture assez robuste. En comparant les résultats des simulations sur les années ayant enregistré des pauses extrêmes et celles qui n'en ont pas, on peut estimer leurs effets sur la production des cultures. ■

Remerciements

Les auteurs remercient le Centre d'études régional pour l'amélioration de l'adaptation à la sécheresse (Ceraas), l'Agence nationale de la météorologie du Sénégal (Anams), et le *German Academic Exchange Service* (Bourse DAAD, N° A/09/04677). Le premier auteur a bénéficié d'un séjour au Laboratoire de météorologie dynamique (LMD) et au Laboratoire d'océanographie et du climat : Expérimentations et approches numériques (LOCEAN). Ce séjour a été financé en partie par l'Institut Pierre Simon Laplace (IPSL, Paris, France) et par l'Agence universitaire de la Francophonie (AUF).
Nous apprécions également le soutien du projet *Analyses multidisciplinaires de la mousson africaine* (http://www.amma-international.org).

Références

Alhassane A, Traoré SB, Zouzou M, Sarr B, Amadou M, 2006. Effet de la fertilisation azotée, de couverture et de la densité de semis sur la consommation hydrique d'une variété de mil au Niger. *Science et Technique ; Sciences Naturelles et Agronomie* 28 : 99-116.

Ali A, Lebel T, 2009. The Sahelian standardized rainfall index revisited. *International Journal of Climatology* 29 : 1705-14. doi :10.1002/joc.1832

Ati OF, Stigter CJ, Oladipo EO, 2002. À comparison of methods to determine the onset of the growing season in northern Nigeria. *International Journal of Climatology* 22 : 731-42.

Barron J, Rockström J, Gichuki F, Hatibu N, 2003. Dry spell analysis and maize yields for two semi-arid locations in East Africa. *Agricultural and Forest Meteorology* 117 : 23-37.

Deni MS, Jemain AA, K Ibrahim, 2010. The best probability models for dry and wet spells in peninsular Malaysia during monsoon seasons. *International Journal of Climatology* 30 : 1194-205. doi : 10.1002/joc.1972.

Dieng O, Roucou P, Louvet S, 2008. Variabilité intra saisonnière des précipitations au Sénégal (1951-1996). *Sécheresse* 19 : 87-93. doi : 10.1684/sec.2008.0130

Frappart, F, Hiernaux P, Guichard F, Mougin E, Kergoat L, Arjounin M *et al.*, 2009. Rainfall regime across the Sahel band in the Gourma

Tirage à part à l'auteur

© John Libbey Eurotext, 2012

region, Mali. *Journal of Hydrology*. doi :10.1016/j.jhydrol.2009.03.007

Lanà X, Martinez MD, Burgueno A, Serra C, Martin-Vide J, Gomez L, 2008. Spatial and temporal patterns of dry spell lengths in the Iberian Peninsula for the second half of the twentieth century. *Theoretical and Applied Climatology* 91 : 99-116.

Lebel T, Ali A, 2009. Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990-2007). *Journal of Hydrology*. doi :10.1016/j.jhydrol.2008.11.030

Martin-Vide J, Garcia CCL, 1993. Analyse par la chaine de Markov de la sécheresse dans le Sud-Est de l'Espagne. Note méthodologique. *Sécheresse* 4 : 123-9.

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, 2009. On the factors modulating the intensity of the tropical rainbelt over West Africa. *International Journal of Climatology* 29 : 673-89.

Oxfam, 2009. *What Happened to the Seasons ?* Oxfam GB Research Report.

Roca R, Lafore J-P, Piriou C, Redelsperger J-L, 2005. Extratropical dry-air intrusions into the West African monsoon midtroposphere : An important factor for the convective activity over the Sahel. *Journal of Atmospheric Science* 62 : 390-407.

Salack S, 2007. Caractérisation *de la variabilité saisonnière de la pluie dans les modèles de climat, dans une perspective d'études d'impacts en agriculture*. Mémoire de master 2 de recherche en sciences de l'ingénieur, université Cheikh Anta Diop (Sénégal).

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

Sane T, Diop M, Sagna P, 2008. Étude de la variabilité de la saison pluvieuse au Sud en Haute-Casamance (Sud-Sénégal). *Sécheresse* 19 : 23-8.

Segele ZT, Lamb PJ, 2005. Characterization and variability of Kiremt rainy season over Ethiopia. *Meteorology and Atmospheric Physics* 89 : 153-80.

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.

Stern R, Rijks D, Dale I, Knock J, 2006. *Instat Climatic Guide*. University of Reading, UK.

Sultan B, Baron C, Dingkhun M, Sarr B, Janicot S, 2005. Agricultural impacts of large-scale variability of the West African monsoon. *Agricultural and Forest Meteorology* 128 : 93-110.

Sultan B, Janicot S, 2003. The West African monsoon dynamics. Part II : the ''preonset'' and ''onset'' of the summer monsoon. *Journal of Climate* 16 : 3407-27.

Winkel T, Do F, 1992. Caractéristiques morphologiques et physiologiques de résistance du mil (*P. glaucum*) à la sécheresse. *Agronomie Tropicale* 46 : 339-51.

Tiré à part auteur

© John Libbey Eurotext, 2012