

# UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR



ECOLE DOCTORALE EAU, QUALITE ET USAGE DE L'EAU

ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE (ESP)

*Année : 2011-2012      N° d'ordre :xxxx*

**THESE DE DOCTORAT**

**SPÉCIALITÉ : CLIMAT ET IMPACTS CLIMATIQUES (CLIC)**

*Présentée par*

**Seyni SALACK**

---

## **ANALYSE DES PAUSES PLUVIOMÉTRIQUES ET ÉVALUATION DES INCERTITUDES DE LA PLUIE DES MODÈLES RÉGIONAUX DE CLIMAT À L'AIDE D'UN MODÈLE DE CULTURE**

---

Soutenue le 23 *janvier* 2013 devant le Jury composé de :

Alioune Kane	Professeur	Président	UCAD
Benjamin Sultan	Directeur de Recherche	Rapporteur	LOCEAN/IRD
Bénoit Sarr	Maître de Conférences	Rapporteur	AGRHYMET
Serigne Faye	Professeur	Examineur	UCAD
Saïdou M. Sall	Maître de Conférences	Examineur	UCAD
Amadou T. Gaye	Professeur	Directeur de thèse	UCAD
Bertrand Muller	Maître de Recherche	Co-Directeur de thèse	CIRAD/CERAAS

ANALYSE DES PAUSES PLUVIOMÉTRIQUES ET ÉVALUATION  
DES INCERTITUDES DE LA PLUIE DES MODÈLES RÉGIONAUX  
DE CLIMAT À L'AIDE D'UN MODÈLE DE CULTURE<sup>1</sup>

*(Analysis of dryspells and evaluation of uncertainties in  
RCMs' precipitation, using a crop model.)*

Seyni SALACK

23 janvier 2013

1. Thèse préparée en parties au LPAO-SF (Dakar) et au CERAAS (Thiès)

*«Love leads to passion. Passion brings determination. Determination increases tenacity.  
Tenacity endows research with accuracy and precision.»* (SeSa, 31 January 2011)

A mes enfants...

**Tawakalt, Muhammad et Maryam**

*«La seule chose intéressante que j'ai trouvée dans la recherche, c'est sa difficulté. Mais pour moi le défi qui demeure encore, c'est d'être meilleur que votre Maman.»*

## REMERCIEMENTS

Gloire à Allah (swt) grâce à qui tout advient. J'errais, Il m'a guidé. J'étais seul, Il m'a donné de la compagnie. J'étais ignorant, Il m'a appris. Sa générosité est infinie, ma reconnaissance envers Lui n'a point d'égale. Je me prosterne devant Lui, Le tout miséricordieux. Une de nos traductions stipule que, celui qui n'est pas capable d'apprécier les bienfaits des autres sur lui ne saura jamais être reconnaissant envers Allah (hadith). Par conséquent, ce serait injuste de ma part de rendre grâce à Allah sans apprécier et remercier les personnes physiques et morales à travers lesquelles Il (Allah) a oeuvré pour ma vie.

De mon Master 2 à la fin de cette thèse, tout ce que je sais, je le dois à mes promoteurs, le Professeur Amadou T. Gaye, Dr Bertrand Muller, et Dr Frédéric Hourdin. Ils ont beaucoup fait pour moi. Ils sont la "think tank" derrière cette thèse, son usine d'idées... Souvent ils discutent de certaines idées que je ne comprenais que des jours, voir des mois plus tard. Les idées font les grands hommes et ces trois hommes en sont conscients. Je leur demande pardon pour les écarts de langage ou de conduite ainsi que d'autres inconvenients que je leurs aurais causés, individuellement ou collectivement. Une cohabitation de plus de cinq ans ne peut pas rester sans conséquences (par exemple, si entre temps, Mr Muller a développé des *cheveux blancs*, j'en suis certainement pour quelque chose!). Que tous les trois retrouvent ici ma sincère gratitude, égale en valeur à celle que j'ai pour mes parents, ma mère Adama Amoud et mon père Salack Ourzoulaye. Malgré, la distance physique qui nous a séparé, ces derniers ont continué à renforcer, fortifier et conforter le socle de sagesse qu'ils avaient construit en moi. Ma dette envers eux est sans mesure. Que mon seigneur Allah soit satisfait d'eux.

Je remercie Dr Benjamin Sultan de LOCEAN et Dr Benoît Sarr de l'AGRHYMET pour avoir accepté d'être les rapporteurs de ma thèse malgré le manque de temps et les exigences particulières de leurs professions. Dr Benoît Sarr était celui qui m'a administré la 1<sup>ère</sup> cuillerée, qui m'a donné goût à la recherche. Il a été très instructif et inspirateur. J'avais commencé avec lui et je suis très fier de terminer cette tranche de ma vie avec son avis.

L'exécution des tâches et les conditions financières de travail de cette thèse ont été facilitées par la bourse intra-régionale du DAAD<sup>1</sup>, à laquelle s'ajoutent les financements du projet AMMA-EU<sup>2</sup> et l'AUF<sup>3</sup> qui m'ont permis de séjourner au LMD et au LOCEAN, à Paris, en 2010, ainsi que le 2012 START<sup>4</sup> *Partnership Enhancement Award* pour séjourner à l'IRI, à New York. L'environnement de travail a été mis en place par les gens du CERAAS<sup>5</sup> et du LPAO-SF<sup>6</sup>.

Je remercie sincèrement Dr Ousmane Ndoye, l'ancien Directeur du CERAAS, remplacé par Dr Ndiaga Cissé avec qui j'ai eu le privilège de travailler avant la fin de ma thèse. J'ai trouvé ma place au CERAAS comme si elle a toujours été là. Mes relations avec le personnel et les étudiants sont totalement décomplexées et détendues.

---

1. Deutscher Akademischer Austauschdienst (German Academic Exchange Services)

2. <http://www.amma-international.org>

3. Agence Universitaire de la Francophonie

4. global change SysTem for Analysis, Research and Training

5. Centre d'Etudes Régional pour l'Amélioration de l'Adaptation à la Sécheresse

6. Laboratoire de Physique de l'Atmosphère et de l'Océan -Siméon Fongang- de Dakar

On a échangé et partagé beaucoup de choses d'ordre purement professionnel et social. Le Dr Modou Sène avec qui j'ai commencé les consultations scientifiques est tombé malade entre temps. Je le remercie vivement et je prie Allah de lui rétablir sa santé. Les échanges scientifiques ont continué avec les Dr Cheikh Thiaw, Dr Mame Codou, le jeune Dr Bassirou Sine, Mlle COUNA SYLLA, Mr Cheikhou Dramé (le Mr Informatique du CERAAS et son assistante Khadi Diop) et Moustapha Fall (l'observateur du réseau pluviométrique). Dans un cadre moins formelle, presque familiale, les débats et les discussions sont menés à vive voix dans notre bureau. Un bureau ou un vrai "*melting pot*" (un agro-météo. Nigérien, un généticien Togolais et un physiologiste Burkinabé). Mr Tossim Habalo, Mr Belko, Mme Marème Belko, Dr Roger Bayala et le tout nouveau Dr Seyni Boureima (l'autre nigérien du CERAAS) ont beaucoup édité mon "*dictionnaire d'agronomie*". Les collègues doctorants, boursiers DAAD de ma promotion, Patrice Kouakou, Bassiaka Ouattara et Lucie Aba ont des choses à me raconter. A force de les écouter, je suis devenu très curieux à connaître la suite. A la comptabilité, Mr Saibane, Mr Moussa Ndoye et Mr Diack ont toujours *fait la pluie* (paiements de bourse) avant la fin du mois (Au début de mon séjour c'était avec Mr Amadou Kandji et Mr Cissé). Merci pour cette promptitude dans la gestion de l'argent.

Je ne peux pas parler du staff administratif sans parler de la vaillante Mariama Senghor, la secrétaire du Directeur. Elle est magnifique, multi-tâche et disponible à rendre service. En compagnie de sa *fausse jumelle* Mme Faye, de Mlle Astou Faye ("*la gardienne du savoir*" à la documentation du CERAAS), de Mlle Sassoume Lô et de Mme Niang, je ne peux jamais résister 5 min face aux débats sur les perruques, les gréffages, le port de pantalon etc... des femmes et jeunes filles. C'étaient de vraies batailles rangées!!! Mme Sall a toujours été là pour agrémente nos échanges d'ingrédients de sagesse. Les débats étaient constructifs, instructifs et sans rancunes, pendant les pauses et dans le bus. Merci à toutes pour ces moments inoubliables. Les autres choses que j'ai partagées avec les gens du CERAAS (e.g. le Tchièp, le café, les jus etc...) sont passées par la cafétéria entre les seules mains magiques de Sosso (Mme Fofane). J'ai toujours réclamé plus de plat les Jeudi à cause de son *soupou kandja*. Je n'oublie pas les nouveaux boursiers DAAD comme Terry Tovignan, Paul Martial, Emile, les anciens étudiants en Master, Madina Diancoumba, Omar Souleymane, Amadou Souleymanane, les chauffeurs (Ali Ka, Makhah, Malik, Jean, Gning) et les techniciens (Cissé, Ousmane Faye), ainsi que les gardiens et les manoeuvres. Voici mon monde à moi lorsque je suis au CERAAS. Toutes ces personnes ont contribué à rendre mon séjour agréable et mémorable. Je vous en remercie infiniment et je vous demande pardon pour les excès dans mon comportement. La vie continue et ces lignes doivent restées pour rendre indélébiles les souvenirs de mon passage au CERAAS.

Au LPAO-SF, le décor est tout autre. Ici, je me sens chez moi, ici je suis chez moi...J'étais étudiant du LPAO-SF, mais la meilleure fonction qu'on m'aurait attribuée aurait été celle de *gardien du labo*. « Et il arriva...! », voici la fameuse phrase qui annonce mon entrée dans la salle du fond du labo. De toutes les façons, j'y étais de nuit comme de jour tant que je suis à Dakar. J'étais plus au labo qu'à ma maison (mon épouse en sait quelque chose, elle a sûrement plus à raconter à ce sujet). J'ai dormis sur des nattes, sur des tables, sur des chaises...mais également je suis resté au tant de temps éveillé, juste...juste... pour faire fonctionner un *script* ou

un code fortran ou bien faire une figure, qui parfois n'est pas la bonne...Il fallait tout reprendre....aaahh! Que la thèse est dure et difficile!!!

L'atmosphère de travail, au labo, est plus "familiale" que formelle. Un problème d'ordre technique dévient le soucis de tous. Il y a même ceux qui abandonnent leur poste de travail uniquement pour venir m'aider à trouver une solution à mes problèmes ou me donner d'autres astuces informatiques. Parmi eux figurent le Dr Abdoulaye Dème, Dr Moustapha Saidou Sall, Dr Daouda Badiane, Dr Mouhamed Ly et Dr Samo Diatta. A tous les besoins administratifs et sociaux, le soutien indispensable de Soukhna n'a jamais manqué. Je vous remercie infiniment pour la convivialité et la disponibilité. Je remercie aussi les collègues avec qui j'ai travaillé *la main à la pâte*. Il s'agit de Moussa Gueye, Lamine Mbaye, Abdoulat Diop, Thioro Fall, Soukeye Cissé, Dr Koly Beavogui, Dr Malick Wade, Mamadou Dramé, Ismaïla Diallo, Moussa Diakhaté, Ibrahim Khalile Kanté, Alpha Aguibou, Ahmadou Diallo, Coumba Niang, Abdoulaye Ndiaye, Ibrahima Diouf, Alix Gounoung ainsi que les océano. Alban Lazar, Bamol Sow, Philippe Estrade et les autres. L'accompagnement a été des plus exemplaire. Vous m'avait appris à confondre collègue de travail et *cousin à plaisanteries*. Je vous suis très reconnaissant pour l'atmosphère socio-professionnelle que vous avez créée.

Au LMD<sup>7</sup> et LOCEAN<sup>8</sup> j'ai eu le privilège de travailler avec Benjamin Sultan, Pascal Oettli et de partager le même bureau avec Serge Janicot que je dérangerais souvent avec mes questions *idiotes*. Allah m'est témoin, si Dr Abdoulkhadra Traoré n'était pas là pour m'aider, j'allais *gallérer* dans cette ville car Paris est "dur comme cailloux"! Il y avait aussi la chaleur familiale de Mme Awa Dème et ses adorables enfants. Je ne saurai être moins reconnaissant à ces gens pour la patience, la disponibilité et l'attention particulière qu'ils m'ont accordée. J'ai également été honoré de travailler avec Dr Alessandra Giannini de l'IRI<sup>9</sup>. Pendant, un bon mois j'avais l'air d' "un prince à New York"<sup>10</sup>. Je me sens particulièrement chanceux pour avoir rencontré et/ou travaillé avec "les grands" de ce domaine du climat...la liste est trop longue. Je dois rendre grace à Allah!

Je pensais qu'être délégué de ma formation doctorale (CLIC<sup>11</sup>) est une responsabilité délicate et que ma thèse est trop difficile. Mais la plus dure responsabilité, à mon avis, c'est celle qu'a accepté le Prof Alioune Kane : la Direction de l'EDEQUE<sup>12</sup>. En compagnie de Mme Awa Niang et le comité de pilotage, ils ont su gérer jusque là, les difficultés et les grands défis, malgré les faibles moyens. L'un des grands défis qu'ils ont rencontré à notre temps, étaient nos exigences, les mots durs pendant les réunions, les revendications interminables des doctorants à travers les délégués Mohammed Diatta, Mariama Kaba et moi-même. Par la grandeur d'esprit, ils surpassent ces défis et continuent à oeuvrer pour la bonne marche de l'école doctorale. Je vous rend un hommage mérité et vous remercie pour le temps et les échanges que nous avons eu et vous demande pardon pour les excès de conduite/langage. En tant qu'élément de la 1<sup>ère</sup> génération de l'EDEQUE, j'ose espérer que le type de rapport Doctorants-Direction que nous avons mis en place va perdurer et être parfait dans le temps.

---

7. Laboratoire de Météorologie Dynamique, Paris Jussieu

8. Laboratoire d'océanographie et du climat : Expérimentations et approches numériques, Paris Jussieu

9. International Research Institute for Climate and Society, The Earth Institute (Columbia University)

10. Cherchez les idées dans le film "Coming to America de Eddy Morphy"

11. Formation doctorale Climat et Impacts Climatiques

12. Ecole Doctorale Eau, Qualité et Usage de l'Eau

A SABS<sup>13</sup>, j'ai travaillé depuis 2007, à enseigner toute les catégories d'élèves (collège et lycée). Certains que peut être je ne verrai plus dans le reste de ma vie. J'ai appris à me surpasser et à cultiver de la patience, à absorber le stress du travail, à forger un esprit d'écoute et d'attention particulièrement fin, avec le seul objectif d'être un meilleur éducateur. Mais ce qui continue à me fasciner encore, c'est le leadership visionnaire de Mme Stéphanie Neils Kane, le pragmatisme de Mme Shailla Fall, la gestion rigoureuse de Pape Ndao, le style oratoire de Tchialis Ndiaye, l'expérience de Zakariyya Dieye et d'autres collègues encore. Je me suis abbreuver à la fontaine de SABS pour continuer à *Shaping the world leaders of tomorrow*. Je vous remercie tous (staff et élèves de SABS) pour la confiance que vous m'avez accordé et l'opportunité de pouvoir aider à forger des leaders de demain. Je n'oublie pas non plus mes premiers étudiants de la LGIEE<sup>14</sup> (Promotion 2009-2010, Maimouna Ndiaye, Mamadou Diop, Maodo Malick etc...) ainsi que le Directeur Dr Sarr de l'UFR SET<sup>15</sup> à l'Université de Thiès. La première expérience est toujours extra-ordinaire! C'est pourquoi cette promotion me tient particulièrement à coeur.

Je reconnais que rien de tout ceci n'aurait été fascinant, beau et possible si l'atmosphère familiale était hostile. Allah m'a honoré d'une femme impassible, compréhensive, endurente et surtout combative. Elle a toujours su gérer mon absence à la maison. Qu'Allah soit satisfait de mon épouse Nana Zouera, plus que je le suis aujourd'hui. La famille Leye du quartier Gueule Tapée, la famille Counta à Thiès, la famille Mouhamed Gueye à Sacré coeur III, La famille Gueye de Gorome III et ma soeur Mariama Camara ont tous contribué directement ou indirectement à agrémenter cette page de mon histoire. Oh! quel beau monde, qui me prouve chaque jour que la vie vaut la peine d'être vécue. Qu'Allah vous récompense énormément.

Après une dure journée..., lorsque j'arrive à la porte de ma maison, les cris...*papa gnawna ! papa gnawna !*<sup>16</sup> de Tawakalt et Muhammad, accompagnés des gémissements de la petite Maryam, me rappellent que je suis arrivé...ouf! Il n'y a pas mieux que ceci ailleurs...!

Alhamdoulillah, ass-salatou, wass-salamou a'ala rassoulillah (saw)!!!

Seyni Salack (SeSa),

[abutawakalt@gmail.com](mailto:abutawakalt@gmail.com)

13. The Senegalese-American Bilingual School, Point E, Dakar

14. Licence en Gestion Informatisée de l'Eau et de l'Environnement

15. Unité de Formation et de Recherche en Science et Technologie

16. papa est venu!, papa est venu!

## RESUME

Les poches de sécheresse intrasaisonnière ou pauses pluviométriques sont des facteurs pluviométriques néfastes pour l'agriculture pluviale, surtout lorsqu'elles apparaissent durant les phases critiques du développement des cultures. Elles sont les indicateurs principaux de la distribution intrasaisonnière de la pluie. Une mise à jour agro-climatologique des précipitations de la sous-région montre un retour apparent des déficits pluviométriques. Les "nouvelles" tendances positives et statistiquement significatives, observées sur les cumuls annuels sont de plus en plus associées à des pauses pluviométriques. Sur la base des observations de la pluie journalière, de 1960 à 2000 (12 sites au Niger) et de 1950-2010 (84 sites au Sénégal), l'extraction et l'analyse de ces pauses pluviométriques aboutissent à l'identification de leur distribution intrasaisonnière à l'échelle locale et multi-sites sur une aire limitée (pauses régionales). La caractérisation multi-échelle des dates de pauses de début et fréquences d'occurrence montrent les similitudes et disparités entre ces deux pays, ainsi qu'une meilleure compréhension de l'implication des pauses dans la variabilité de la pluviométrie locale. En particulier, les résultats sur les dates d'occurrence des pauses extrêmes de catégories DS4 (DS3) montrent qu'elles sont plus précoces dans les années humides et tardives sur le calendrier culturale des années sèches. Le nombre de cas par saison n'a pas changé significativement. Cependant, leur occurrence est corrélée aux déficits pluviométriques saisonniers dans la zone d'étude. Le caractère saisonnier, la composante méso-échelle qu'elles exhibent et leur corrélations avec les anomalies des températures des Océans prouvent que les pauses extrêmes sont potentiellement prévisibles. La connaissance des périodes intrasaisonnières à forte probabilité d'occurrence des pauses extrêmes permet d'éviter les fausses alertes de début de saison (les "faux départs"), éviter les périodes à risque de stress hydrique et d'optimiser le choix des dates de semis réussis en milieu paysan.

Les sorties d'ensemble multi-modèles régionaux de climat sont unanimes sur la bonne représentation des dates d'occurrence de ces catégories de pauses dans les zones aux cumuls annuels moyens  $\geq 600$  mm. Cependant, ils présentent une faible représentation des pauses extrêmes dans les zones à risque où les cumuls moyennes sont inférieurs à 600 mm/an. Une étude de sensibilité à travers le modèle de culture SARRAH, montre que ces biais (négatifs/positifs) sur la distribution intrasaisonnière de la pluie sont plus fréquents et peuvent expliquer -40 % à +40 % des biais sur la croissance, le développement et les rendements du mil *Souna III*. Par ailleurs, les résultats de cette étude montrent aussi que les méthodes d'extraction, les artefacts de post-traitement des sorties des modèles de climat, les biais sur les cumuls journaliers tout comme les biais sur les fréquences d'occurrences des événements pluviométriques (pauses pluviométriques) sont des sources d'incertitudes importantes dans l'attribution d'impacts à la pluie.

Mots clés :Pause Pluviométrique, Modèles Régionaux de Climat, Prévisibilité des Pauses extrêmes, Incertitudes en évaluation d'impacts, Sénégal-Niger, Sahel Ouest-Africain.

## SUMMARY

The intra-seasonal episodes of drought or dry spells (DS) events are rainfall hazards for rain-fed agriculture, especially when they occur at crop's critical stages. They are the main indicators of rainfall distribution within the rainy season. An agro-climatologic update of rain regimes over the sub-region reveals an obvious recovery from drought. These "new" positive and statistically significant trends of annual rain amounts are embedded with an increase in dry spell occurrence. On the basis of observed daily records of rainfall, from 1960 to 2000 (12 sites in Niger) and 1950 to 2010 (84 sites from Senegal), the extraction and analysis of these dry spells led to their typology, intra-seasonal distribution at local and multi-sites over a limited area (simultaneous dry). The space-time multi-scale characterization of the onset dates and seasonal frequency of occurrence of dry spells shows the common patterns and contrasts between the two countries, including a better understanding of extreme dry spells' implication in the local rainfall variability. In particular, the results on the assessment of the starting dates reveals an early occurrence of extreme dry spells of category DS4 (DS3) during wet years and a late onset in dry years. The number of cases per season has not changed significantly over time. However, their occurrence is correlated to seasonal rainfall deficits. Their seasonality, meso-scale components found and their links to remote Oceans' surface temperature anomalies indicate that extreme dry spells are potentially predictable. The knowledge of high risk intra-seasonal periods of extreme dry spells occurrence helps to avoid "false onset" of rainy season, high water stress rainless days and the identification of successful on-farm cropping dates.

Regional climate models ensemble-based simulations are unanimous in describing the onset dates of extreme dry spells across regions where average annual rainfall amount is  $\geq 600$  mm. However they show low description over the regions where annual rainfall does not exceed 600 mm. A sensitivity analysis through the SARRAH crop model reveals that this biasness (negative/positive) in rainfall distribution is more frequent and can account for -40 % to +40 % bias in the development and yield of the *Souna III* millet cultivar. On the other hand, the results of this study show also that the methods of extraction, post-treatment artifacts of models products, the bias in daily rainfall amount and frequency of occurrence of rainfall events (such as extreme dry spells) are all sources of uncertainty in the attribution of impacts to rainfall.

Keywords : Dry Spell, Regional climate models, Predictability of extreme dryspells, Uncertainties in impacts evaluation, Senegal-Niger, West-African Sahel.

## PUBLICATIONS

### Articles

1. **Salack S**, Giannini A, Diakhaté M, Gaye AT, Muller B (2013) Oceanic influence on the sub-seasonal to interannual timing and frequency of extreme dry spells over the West African Sahel. *Climate Dynamics*. Doi : 10.1007/s00382-013-r1673-4.
2. **Salack S**, Muller B, Gaye AT, Hourdin F, Cisse N (2012a) Analyses multi-échelles des pauses pluviométriques au Niger et au Sénégal. *Sécheresse* 23 : 3-13. Doi : 10.1684/sec.2012.0335.
3. **Salack S**, Sultan B, Oettli P, Muller B, Gaye AT, Hourdin F (2012b) Représentation de la pluie dans les modèles régionaux de climat et application à l'estimation des rendements du mil au Sénégal. *Sécheresse* 23 : 14-23. Doi : 10.1684/sec.2012.0332.
4. **Salack S**, Muller B, Gaye AT Gaye (2011) Rain-based factors of high agricultural impacts over Senegal. Part I : integration of local to sub-regional trends and variability. *Theor Appl Climatol* 106 :1-22. Doi 10.1007/s00704-011-0414-z.

### Contributions

1. Giannini A, **Salack S**, Lodoun T, Ali A, Gaye AT, Ndiaye O (2013) A unifying view of climate change in the Sahel linking intra-seasonal, interannual and longer time scales. *Environmental Research Letters*, 8 (2013) 024010 (8pp). Doi :10.1088/1748-9326/8/2/024010.
2. Smith JW, Reynolds AE, Pratt AS, **Salack S**, Klotz B, Battle TL, Grant D, Diop A, Fall T, Gaye A, Robertson D, DeLonge MS, and Chan S (2012) Observations of an 11 September Sahelian Squall Line and Saharan Air Layer Outbreak during NAMMA-06. *International Journal of Geophysics*, Volume 2012, 14 pages. Doi : 10.1155/2012/153256

### Posters et présentations orales

1. **Salack S**, Gaye AT, Giannini A, Muller B, Lazar A (2012) Potential predictability and influence of the Atlantic Ocean on seasonal occurrence of extreme dry spells over the West African Sahel. Work presented at the 4<sup>th</sup> international African Monsoon Multidisciplinary Analyses. 2-6 July 2012, Toulouse, France.
2. **Salack S**, Muller B, Gaye AT Gaye, Hourdin F (2011). Dry spells analysis : Multi-scale detection, attribution of impacts and sources of uncertainty using an integrative approach. Work presented at the Open Science Conference (OSC) of the World Climate Research Program (WCRP) in Denver, Colorado, USA. 25-28 October 2011. (Prix WCRP 2011).

3. Salack, S., Muller, B. and Gaye, A. T. (2010) Rain-based factors of high agricultural impacts over Senegal. Part I : Integration of local to sub-regional observed changes. Work presented at Atelier AMMA France 2010. <http://www.ammainternational.org>
4. **Salack S**, Muller B., Gaye T. A., Hourdin F. (2010) An implication of low frequency dry spells in seasonal and interannual rainfall variability in Senegal. Poster presentation at the WCRP-UNESCO (GEWEX/CLIVAR/IHP) Workshop on metrics and methodologies of estimation of extreme climate events. UNESCO headquarters, Paris 27-29 September 2010.  
<http://www.extremeworkshop.org>
5. **Salack S**, Muller B., Gaye T. A., Hourdin F. (2009). Multi-scale intra-seasonal characterization of dry spells in Senegal and their implication in the rainy season attributes. Poster presentation at the 3<sup>rd</sup> international African Monsoon Multidisciplinary Analyses, Burkina-Faso, 20-24 July 2009. <http://www.ammainternational.org>
6. **Salack S**, Muller B., Gaye T. A., Couna S., Fall M., (2009) : Updated space-time variability of rainfall regimes and agro-climatic features in Senegal. Poster presentation at the international African Monsoon Multidisciplinary Analyses, Burkina-Faso, 20-24 July 2009.  
<http://www.ammainternational.org>

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction Générale</b>	<b>23</b>
1.1	Pourquoi les pauses pluviométriques (DS) ?	26
1.2	Etat de l'art	27
1.3	Objectifs et plan de la thèse	28
<b>2</b>	<b>Zone d'étude et données utilisées</b>	<b>32</b>
2.1	Sénégal	32
2.2	Niger	35
2.3	Données disponibles	36
2.3.1	Données observées en station	38
2.3.2	Données de température de surface de l'Océan (SST)	40
2.3.3	Données de précipitation simulée issues des expériences AMMA-ENSEMBLES	41
<b>3</b>	<b>Composantes pluviométriques à forts impacts agricoles au Sénégal : intégration des tendances locales à la variabilité sous-régionale</b>	<b>46</b>
3.1	Résumé de l'article	46
<b>4</b>	<b>Prévisibilité potentielle des pauses pluviométriques extrêmes (extDS)</b>	<b>72</b>
4.1	La prévisibilité potentielle	72
4.2	Résumé des articles	74
<b>5</b>	<b>Les sources d'incertitudes dans le forçage d'un modèle de culture à l'aide des sorties d'un modèle régional (MRC)</b>	<b>90</b>
5.1	Introduction	90

---

5.2	Méthodologie . . . . .	92
5.2.1	Le modèle SARRAH . . . . .	94
5.2.2	Méthodes d'extractions de la pluie des MRC . . . . .	95
5.2.3	Etude de sensibilité de la production potentielle du mil <i>Souna III</i> à la distribution de la pluie simulée par les MRC . . . . .	95
5.3	Sensibilité de la production potentielle du mil aux choix de la paramétrisation du MRC et des méthodes d'extraction . . . . .	98
5.4	Les biais des modèles régionaux dans leur représentation de la pluie . . . . .	100
5.5	Les biais des modèles régionaux dans la simulation des rendements . . . . .	102
5.6	Conclusion . . . . .	106
<b>6</b>	<b>Synthèse générale et perspectives</b>	<b>109</b>
6.1	Mise à jour agro-climatologique des composantes pluviométriques à forts impacts agricoles . . . . .	109
6.2	Prévisibilité potentielle des évènements majeurs de pauses pluviométriques . . .	111
6.3	Evaluation agro-météorologique des modèles régionaux de climat . . . . .	112
6.4	Sources d'incertitudes dans l'attribution des impacts à la pluviométrie . . . . .	113
6.5	Perspectives . . . . .	114
	<b>Bibliographie</b>	<b>118</b>
<b>I</b>	<b>Annexes</b>	<b>136</b>
<b>A</b>	<b>Coordonnées géographiques et series journalières des pluviomètres utilisés</b>	<b>137</b>
<b>B</b>	<b>Présentation sommaire de SARRAH</b>	<b>141</b>
B.1	Phénologie des céréales dans le Modèle SARRAH . . . . .	141
<b>C</b>	<b>Coefficients utilisés dans la paramétrisation du mil Souna III dans le modèle SARRAH</b>	<b>144</b>
<b>D</b>	<b>Distribution intra-saisonnière de la pluviométrie dans les modèles régionaux</b>	

---

<b>de climat (MRC)</b>	<b>147</b>
D.1 Répartition des cumuls journaliers . . . . .	148
D.2 Représentation des pauses extrêmes dans les MRC . . . . .	148
D.3 Remarques et perspectives . . . . .	150
<b>E Article (a) paru dans le 1<sup>er</sup> numéro 2012 du Journal <i>Science et Changements</i> <i>Planétaires/Sécheresse</i></b>	<b>154</b>
<b>F Article (b) paru dans le 1<sup>er</sup> numéro 2012 du Journal <i>Science et Changements</i> <i>Planétaires/Sécheresse</i></b>	<b>167</b>
<b>G Poster Lauréat d'un Prix WCRP 2011 (Meilleures présentations Poster)</b>	<b>179</b>
<b>H Archive des Lauréats du WCRP open science conference, Denver, USA, 24- 28 octobre 2011</b>	<b>181</b>

# Liste des abréviations

AAV Area average value (Valeur Moyenne spatiale)

AMMA Analyses multidisciplinaires de la mousson Africaine

AMMA-MIP AMMA-Model Intercomparison Program

ANACIM Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie

ANAMS Agence National de la Météorologie du Sénégal, actuellement jumulée à l'ANAC pour former l'ANACIM

AUF Agence Universitaire de la Francophonie

CDF *Cumulative Density Function* pour Fréquences relative cumulées

CERAAS Centre d'Etudes Régional pour l'Amélioration de l'Adaptation à la Sécheresse

CIRAD Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement

CLIC Formation doctorale Climat et Impacts Climatiques

CLIDATA Système de gestion de bases de données climatiques

CRA Centre Régional Agrhymet, Niamey, Niger

DAAD *Deutscher Akademischer Austauschdienst* pour German Academic Exchange Service

DAS *Days After Sowing* pour Jours Après semis

DMN Direction de la Météorologie Nationale, Niamey, Niger

DS *Dry spell* pour Pause Pluviométrique

EDEQUE Ecole Doctorale Eau, Qualité et Usage de l'Eau

- ENSEMBLES Projet Européen de simulation multi-modèles de climat pour les études d'impacts de changement climatique
- ESCAPE Environmental and Social Changes in Africa : Past, present and future
- extDS *Extreme dry spell* pour Pause Pluviométrique extrême
- FEWS Famine Early Warning System
- GIEC Groupe Intergouvernemental d'Experts du Climat
- HadISST Hadley Centre Improved SST data set
- IPCC International Panel on Climate Change ou GIEC
- IRI International Research Institute for Climate and Society (Columbia University)
- ISRA Institut Sénégalais de la Recherche Agricole
- JJ Jour Julien
- LGIEE Licence en Gestion Informatisée de l'Eau et de l'Environnement
- LMD Laboratoire de Météorologie Dynamique, (Université Pierre et Marie Curie)
- LOCEAN Laboratoire d'océanographie et du climat : Expérimentations et approches numériques
- LPAOSF Laboratoire de Physique de l'Atmosphère et de l'Océan -Siméon Fongang- de Dakar
- MRC Modèle régional de climat
- PDF *Probability density Function* pour Fonction de Densité de Probabilité
- RClimDex.r Script écrit/exécutable dans l'environnement R pour déterminer les événements extrêmes
- RCM Regional climate model
- RHtest-dlyPrpc.r Script écrit/exécutable dans l'environnement R pour détecter, tester et corriger la non homogénéité d'une série de pluie journalière
- SABS The Senegalese-American Bilingual School, Point E, Dakar
- SARRAH Système d'Analyses des Risques Agro-climatiques, H pour Habillé ou détaillé

SDDR Service départemental de développement rural

SeSa Seyni Salack

SFS Student-Fisher Statistical Scheme (schéma numérique d'identification des points de changement statistiquement significatif)

SST *Sea Surface Tempertaure* pour Temperatures de surface de l'Océan

SSTA *Sea Surface Tempertaure Anomalie* Anomalie des températures de surface de l'Océan

START global change SysTem for Analysis, Research and Training

STDATE Date de début d'une Pause Pluviométrique

TAC/CGIAR The Technical Advisory Committee of the Consultative Group on International Agricultural Research

TCM Tableau des Cumuls Mensuels

UFR/SET Unité de Formation et de Recherche en Science et Technologie, Université de Thiès

WCRP World Climate Research Program

# Liste des tableaux

2.1	<i>Noms et sources des modèles régionaux utilisés dans cette analyse. Chaque modèle est nommé d'après l'acronyme de l'institution qui le maintient. . . . .</i>	44
5.1	<i>Evaluation des cumuls pluviométriques annuels simulée par les MRC sur la période 1991-2007.</i>	101
5.2	<i>Evaluation des nombres de jours pluvieux annuels simulés par les MRC sur la période 1991-2007.</i>	101
5.3	<i>Évaluation des rendements simulés par les forçages <math>MRC_{orig}</math> de SARRAH sur la période 1991-2007. . . . .</i>	103
A.1	<i>Coordonnées (degrés décimaux), nom de site, nom de code attribué et séries journalière complètes disponibles dans le cadre des travaux d'analyses au Sénégal.</i>	138
A.2	<i>Suite du tableau A.1 . . . . .</i>	139
A.3	<i>Coordonnées (degrés décimaux), nom de site, nom de code attribué et séries journalière complètes disponibles dans le cadre des travaux d'analyses au Niger. .</i>	140

# Table des figures

1.1	<i>Circulation moyenne méridionale associée à la moyenne zonale du vent (<math>ms^{-1}</math>, iso-contours). Ces conditions moyennes de juin-août-sept sont issues des ré-analyses NCEP (Hourdin et al., 2010).</i>	25
1.2	<i>Evolution latitudinale de la pluviométrie journalière en Afrique de l'Ouest en 2000. Les différentes phases de la mousson sont mises en exergue (Sultan et al., 2003).</i>	26
1.3	<i>Distribution des pauses pluviométriques et phases phénologiques des céréales (mil, sorgho, maïs). Les événements de faux départ et les pauses pluviométriques (DS) sont désignés par les flèches.</i>	29
2.1	<i>a) Dynamique atmosphérique caractérisant la partie extrême de l'Afrique de l'Ouest : Position moyenne de la zone de convergence inter-tropical pendant l'été de l'hémisphère Nord (Fall et al., 2006). b) Carte d'orientation, localisation des sites de la zone d'étude et distribution spatio-temporelle moyennes de la pluviométrie récente du Sénégal. L'écart inter-isohyète est de 100 mm.</i>	33
2.2	<i>Carte d'orientation, localisation des sites de la zone d'étude et distribution spatio-temporelle moyennes de la pluviométrie récente du Niger. L'écart inter-isohyète est de 100 mm.</i>	36
2.3	<i>Variabilité interannuelle du cumul pluviométrique et le nombre de jours pluvieux annuels. (a) les anomalies standardisées sur 1970-2000. (b) Le nombre de jour pluvieux par zone pluviométrique au Niger et au Sénégal.</i>	37

2.4	<i>Etat des températures océaniques moyennes globales pendant les saisons mai-juillet et août-octobre 2009. Les cadres rectangulaires delimitent les bassins océaniques qui influencent la saison des pluies au Sahel. . . . .</i>	41
2.5	<i>Evolution latitudinale du cycle moyen journalier des précipitations dans les modèles régionaux de climat (MRC) du projet ENSEMBLES (van der Linden et Mitchell, 2009). . . . .</i>	45
5.1	<i>Méthodes de réduction d'échelle de MCG à l'échelle parcellaire. a) les méthodes classiques sont le plus souvent utilisées pour désagréger les sorties du MCG. b) Méthodes statistique-dynamiques : réduire la résolution du MCG à travers un MCR avant d'utiliser des liens statistiques pour passer à l'échelle parcellaire (Salack, 2007). . . . .</i>	93
5.2	<i>Mailles des modèles régionaux de climat (traits gris), réseau de stations d'observations ANAMS-CERAAS (points noirs) et zonage agro-climatique du Sénégal. . . . .</i>	94
5.3	<i>Conception graphique des méthodes d'extraction "bilinéaire (Oettli et al., 2011) et du "plus proche point de maille (méthode classique). Les points de maille sont représentés par les cercles pleins. Le point d'observation réelle est représenté par un cercle ouvert. . . . .</i>	95
5.4	<i>Fréquences relatives cumulées (CDF) de la production saisonnière simulée et observée localement au Sénégal, obtenues par intégration de la pluie simulée par 8 MRC au modèle SARRAH a) forçage direct b) forçage indirect. Les courbes noires représentent les observations. . . . .</i>	99
5.5	<i>Les cumuls saisonniers moyens des pluies observées (observations) et simulées par les 8 MRC, organisées en 4 zones agro-climatiques : Nord (&lt;400 mm/an), centre Nord (400-600 mm/an), centre Sud (600-800 mm/an) et Sud (&gt;800 mm/an).102</i>	
5.6	<i>Distributions intrasaisonnières des pauses pluviométriques observées et simulées par les MRC pour les 4 zones agro-climatiques considérées. . . . .</i>	103
5.7	<i>Relation entre les biais sur les rendements simulés (kg/ha) et les biais sur les pluies simulées (cumulées sur les cycles) (mm/cycle) des MRC. . . . .</i>	104

5.8	<i>Distributions des biais sur les rendements simulés (%) issus des différents forçages. (A gauche) les biais moyens issu des données originales des MRC (<math>MRC_{orig}</math>). (Au centre) les biais largement attribués aux cumuls journaliers de la pluie dans MRC (scénario de forçage <math>MRC_{cum}</math>). (A droite) les biais largement attribués aux cumuls journaliers de la pluie dans MRC (scénario de forçage <math>MRC_{dist}</math>). . . . .</i>	105
5.9	<i>Rendements simulés (<math>kg\ ha^{-1}</math>) en relation avec les pluies (cumulées sur les cycles de culture) pour les différents forçages selon les pluies observées (points rouges), les pluies simulées originales <math>MRC_{orig}</math> (cercles blancs) et les pluies <math>MRC_{cum}</math> pour lesquelles l'intra-saisonnier est corrigé mais il y a des biais sur les cumuls (points noirs). . . . .</i>	106
5.10	<i>Efficacités des pluies (rapport entre la transpiration et la pluie) en relation avec pluviométries (cumulées sur les cycles de culture) pour les différents forçages selon les pluviométries observées (points rouges), les pluviométries simulées originales <math>MRC_{orig}</math> (cercles blancs), et les pluviométries <math>MRC_{cum}</math> pour lesquelles l'intra-saisonnier est corrigé mais il y a des biais sur les cumuls (points noirs). . . . .</i>	107
6.1	<i>Organigramme conceptuel du Student-Fisher Statistical Scheme (SFS, Salack et al., 2011) . . . . .</i>	116
B.1	<i>Représentation schématique des phases et stades phénologiques du mil dans le modèle SARRAH. . . . .</i>	142
B.2	<i>(Haut) Structure modulaire du modèle SARRAH (Baron et al., 2003). (Bas) Relations allométriques chez le mil Souna III mises en évidences par expérimentation en station par B. Sarr, au CERAAS, Sénégal, 1996. . . . .</i>	143
D.1	<i>Comparaison des classes de pluie et des longueurs des pauses pluviométriques simulées et observées dans les régions Nord et Sud du Sénégal. Classes de cumuls journaliers des régions du Nord (a) et du Sud (b). Fréquence-durée des pauses pluviométriques des régions du Nord (c) et du Sud (d). . . . .</i>	149

---

D.2	<i>Comparaison des dates de début sorties de la moyenne d'ensemble de 8 MRC aux dates de débuts de pauses extrêmes observées sur la période 1991-2007. En a) il s'agit des extractions MJJ et en b) les extractions en ASO. . . . .</i>	151
D.3	<i>Comparaison de la fréquence sortie de la moyenne d'ensemble de 8 MRC à la fréquence d'occurrence saisonnière observée sur la période 1991-2007. Ici toutes les longueurs de pauses sont considérées. Les pauses extrêmes (extDS) de type DS3 et DS4 sont celles <math>&gt; 8</math> jours. . . . .</i>	152

# Chapitre 1

## Introduction Générale

La région sahélienne est actuellement confrontée à une très forte dégradation de son potentiel de production. A l'horizon 2015, cette region devra nourrir une population de l'ordre de 85 millions d'habitants, plus de 100 millions d'habitants d'ici à 2025 (CILSS, 2002). Avec les pratiques agricoles existantes et la très grande variabilité climatique caractérisant la zone, l'approvisionnement en nourriture de ces populations représentera un défi encore plus difficile à surmonter. Ainsi, la fréquence de plus en plus élevée des évènements extrêmes tels que les inondations, l'occurrence des pauses pluviométriques extrêmes, les sécheresses etc. (IPCC, 2007 ; IPCC, 2012) va accentuer, la vulnérabilité des systèmes de production agricole. Pour atténuer les conséquences néfastes de cette vulnérabilité sur les populations locales, la communauté scientifique se doit de doubler les efforts pour améliorer la compréhension et la prévision de la variabilité et des changements climatiques dans la sous-region. C'est dans ce contexte qu'ont vu le jour certains projets tels que AMMA<sup>1</sup> (Redelsberg, 2006 ; Lebel *et al.*, 2010), ESCAPE<sup>2</sup> (Sultan *et al.*, 2011), CORDEX<sup>3</sup> etc. L'originalité de ces projets tient à l'ampleur des campagnes de mesures de terrain, à leur caractère multidisciplinaire et multilatéraux en vue de mieux identifier les mécanismes et la complexité du système de mousson à différentes échelles de temps et d'espace et améliorer nos connaissances.

Les importantes avancées des connaissances concernant les processus intra-saisonniers essentielles pour le système agricole, peuvent être tirées des travaux récents de Sultan *et al.* (2003),

---

1. Analyses multidisciplinaires de la mousson Africaine

2. Environmental and Social Changes in Africa : Past, present and futurE

3. COordinated Regional Downscaling EXperiments, voir <http://wcrp.ipsl.jussieu.fr>

Janicot *et al.* (2008b), Bouali (2009), Roehrig (2010), Lafore *et al.* (2011) parmi d'autres. La dynamique de la circulation atmosphérique dans la région du Sahel Ouest Africain (SOA) est constituée de deux flux importants : les vents Nord/Nord-Est appelés les alizés et les vents du Sud/Sud-Ouest appelés la mousson, qui s'installent sur la région sahélienne de mars à octobre (Sultan *et al.*, 2003). L'interface entre ces deux courants d'air est la zone de convergence intertropicale (ZCIT). La trace de la ZCIT au sol est dénommée le front intertropical (FIT) dont le déplacement latitudinal (entre 4-6°N en Janvier et 20-25°N en Août) favorise la pénétration de la mousson (Sultan *et al.*, 2003 ; Nicholson, 2009). Les facteurs physiques et dynamiques de l'atmosphère sous-régionale sont énumérés par Lafore *et al.* (2011). Dix parmi ces facteurs sont déterminants pour la mousson Ouest Africain (MOA). Ces dix éléments sont résumés sur le profile atmosphérique de la figure 1.1. Il s'agit du Front Intertropical (FIT), La dépression thermique saharienne, le Jet d'Ouest Subtropical, les Thalwegs en provenance des moyennes latitudes, le Jet d'Est Tropical (TEJ), le Jet d'Est Africain (AEJ), Les Ondes d'Est Africaines (AWE) et les vortex cycloniques, l'Air sec en moyenne troposphère, le flux de mousson et l'énergie des basses couches et l'activité convective (notamment zones de convection inhibée, les zones de convection localisées et les convections organisée en ligne de grains). La coexistence et l'interaction de ses éléments avec d'autres parties du système climatique, tels que la distribution et les types de sols, déterminent le temps météorologique dominant.

En plus de la variabilité interannuelle et décennale (Bell et Lamb, 2005 ; Lebel et Ali, 2009), la pluviométrie au Sahel Ouest africain est fortement marquée par la variabilité intra-saisonnière des évènements journaliers. La distribution des pluies se concentre à plus de 80 % entre fin juin et septembre (Lamb, 1978 ; Le Barbé *et al.*, 2002 ; Balme, 2004). Le cumul annuel au cours de la saison des pluies résulte de 40 à 50 évènements pluvieux. Seulement 20 évènements produisent 80 % du cumul, et 50 % de la pluie tombe en moins de 4 heures (Mathon *et al.*, 2002). Trois phases caractérisent la saison des pluies suivant la position latitudinale de la ZCIT (Sultan et Janicot, 2003 ; Sultan *et al.*, 2003 ; Lebel et Ali, 2009). On trouve, le "préonset" (déclenchement de la saison humide à la mi-mai d'après Sultan *et al.*, 2003), l' "onset" (mousson établie à la date moyenne du 24 juin d'après Sultan *et al.*, 2005) et le retrait de la mousson en octobre (figure 1.2).

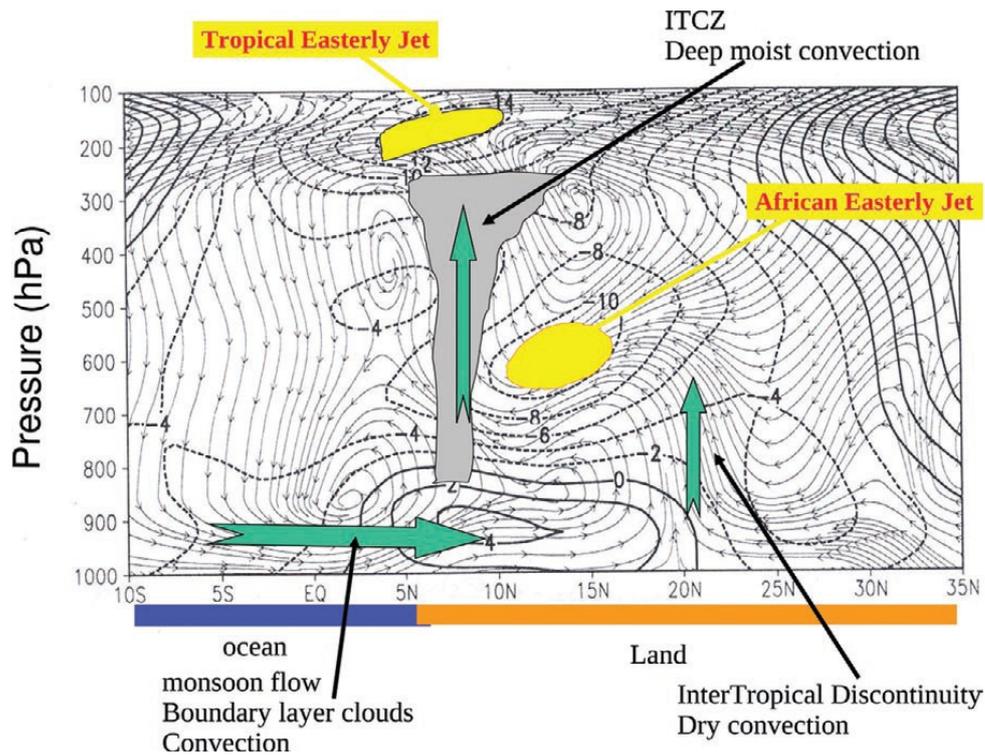


Figure 1.1: *Circulation moyenne méridionale associée à la moyenne zonale du vent ( $\text{ms}^{-1}$ , iso-contours). Ces conditions moyennes de juin-août-sept sont issues des ré-analyses NCEP (Hourdin et al., 2010).*

Les études visant à améliorer notre compréhension des conséquences de cette variabilité intra-saisonnière sur la production agricole au Sahel se sont multipliées (exemple de Sultan *et al.*, 2005; Traoré *et al.*, 2011; Marteau, 2011). Cependant, beaucoup d'incertitudes existent encore dans l'évaluation quantitative des impacts de la repartition temporelle des événements pluviométriques sur le développement et la croissance des cultures locales (Sultan *et al.*, 2008). Les sources de ces incertitudes peuvent être liées à une mauvaise maîtrise des conditions agro-climatiques locales. Mais elles peuvent également être liées à l'intégration des outils d'aide à la décision utilisés pour faire cette évaluation (Hansen *et al.*, 2006). Ces outils sont essentiellement les modèles de climat dans lesquels une partie de la complexité du système climatique est représentée (Hourdin, 2005; Hourdin *et al.*, 2010; Bouali, 2009) et les modèles de croissance et développement des cultures qui représentent la complexité du continuum sol-plante-atmosphère (Hoogenboom *et al.*, 2003). Malheureusement, cette intégration pose un certain nombre de problèmes. Il y a le problème classique de "saut" d'échelle spatiale, entre les modèles de climat (dizaine à une centaine de km) et les modèles des cultures (échelle parcellaire),

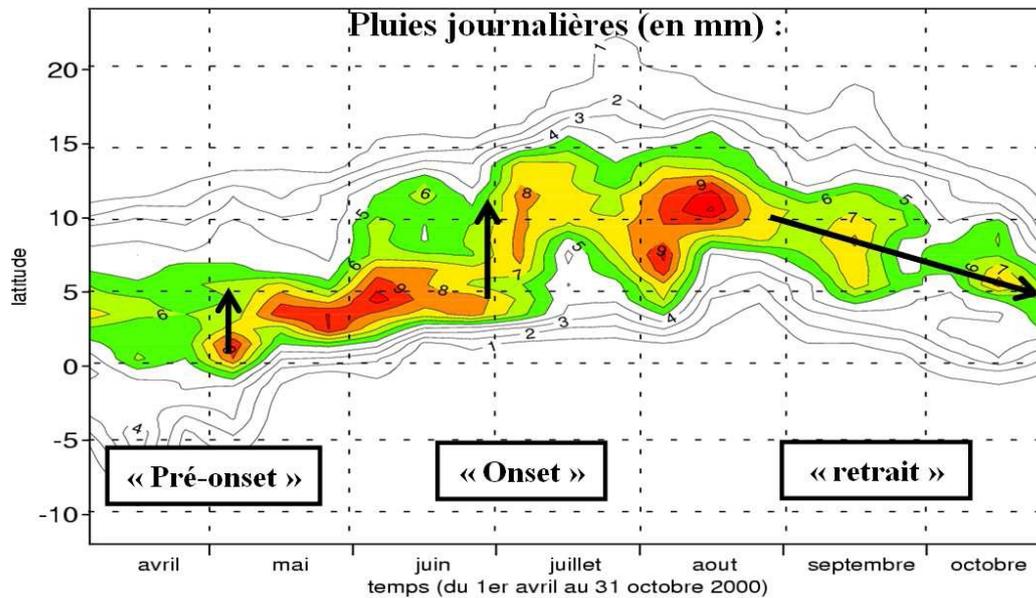


Figure 1.2: Evolution latitudinale de la pluviométrie journalière en Afrique de l'Ouest en 2000. Les différentes phases de la mousson sont mises en exergue (Sultan et al., 2003).

très connu des chercheurs (Baron et al., 2005 ; Hansen et al., 2006 ; Sultan et al., 2008). Il y a également les problèmes liés aux conditions du forçage d'un modèle de cultures à l'aide des sorties d'un modèle de climat (Sivakumar, 2006). Souvent ce sont les biais sortis des modèles de climat qui se traduisent par des biais énormes sur les sorties des simulations des modèles de cultures (Mavromatis et Jones, 1998 ; Oettli et al., 2011). D'autres fois, ce sont les méthodes de post-traitement des sorties des modèles de climat qui introduisent des biais qui s'ajoutent aux erreurs internes du modèle de cultures. Il est, donc, nécessaire de raffiner l'état de nos connaissances sur la distribution intra-saisonnière des facteurs pluviométriques les plus influents pour l'agriculture, identifier des approches innovantes pour la mutualisation des outils, mieux anticiper et gérer les crises agro-climatiques.

## 1.1 Pourquoi les pauses pluviométriques (DS) ?

Le début de la saison des pluies est précédé d'une succession d'averses isolées avec une intermittence marquée par des séquences de "jours sans pluie" ou *jours secs*. Ces séquences sèches sont souvent des pauses pluviométriques (DS) prolongées dont les durées peuvent parfois être d'une, deux à trois semaines. Parfois, c'est autour de la date de semis que les paysans observent

l'occurrence des pauses extrêmes associées à des événements intermittents assez intenses pour constituer des "faux départs" (Sultan *et al.*, 2005). Une situation de "faux départs" après le démarrage de la saison contribue à sécher la terre arable et empêche la germination ou l'émergence des jeunes plants (Ati *et al.*, 2002). Les agriculteurs sont obligés de semer plusieurs fois à cause des faux démarrages de saison. Une fréquence élevée de ces événements secs durant la saison culturale (surtout en phases végétative et reproductive) occasionnent aussi une baisse des rendements agricoles (Sivakumar, 1992 ; Winkel et Do, 1992 ; Sultan *et al.*, 2005), quelques soient les pratiques culturales de fertilisation et de densité de semis adoptées, comme le montrent Alhassane *et al.*, (2006) et Alhassane (2009). La figure 1.3 illustre une distribution type d'événements pluvieux associés à l'occurrence des pauses pluviométriques pendant la saison culturale. Après le semi, le cycle de croissance d'une plante céréalière est reparti en différentes phases dont la germination (Ger), phase juvénile (BVP), phase photosensible (PSP), phase reproductive et la phase de maturation (MATU)). La phase juvénile est sensible au semis tandis que la phase reproductive est sensible au rendements (Marteau, 2011). De ce fait, l'occurrence des DS rend parfois la distribution intra-saisonnière des pluies peu ou pas profitable aux cultures pluviales.

Les pauses pluviométriques (DS) sont des indicateurs de la répartition des jours pluvieux dans une saison, des dates de semis optimales (Sivakumar, 1988), du niveau du stress hydrique des cultures (état de déficit ou d'engorgement du sol), du calendrier d'irrigation et de fertilisation dans les périmètres irrigués etc. Par conséquent, l'analyse précise et la prévision des DS deviennent très importantes dans la réduction de l'effet des aléas pluviométriques sur les cultures vivrières et des crises alimentaires récurrentes de la sous-région.

## 1.2 Etat de l'art

Après les travaux de Sivakumar (1992) au Sahel Ouest Africain, peu ou pas d'études se sont intéressées à la mise à jour de l'état de l'art sur la distribution des pauses pluviométriques qui est aussi une manière indirecte de caractériser la distribution intra-saisonnière des jours pluvieux. Pourtant cela s'avère nécessaire vue la variabilité spatio-temporelle accrue de la pluviométrie locale et sous-régionale. Quelques auteurs ont décrit les pauses au niveau la sous-région (Martin-Vide et Garcia, 1993 ; Sané et Diop 2008 ; Frappart *et al.*, 2009 ; Marteau, 2011), dans les

peninsules Iberique et Malaisienne (Lanà *et al.*, 2008 ; Deni *et al.*, 2009), et en Africa de l'Est (Segele et Lamb, 2005). Sivakumar (1992) a caractérisé les DS à différents seuils de pluie journalière (1, 5, 20 25 mm/jour) pendant la période culturale à partir de la date de semis définie selon le critère de Sivakumar (1988). Cependant, ces dates de semis sont devenues assez variables et les saisons culturales assez courtes un peu partout dans le monde en raison du contexte des changements climatiques (Oxfam, 2009). Sané *et al.*, (2008) ont identifié les DS à deux stations du Sud du Sénégal (Kolda et Velingra-casamance), pour caractériser la saison des pluies. Ces deux stations sont situées en zone relativement humide ( $> 800$  mm/an) du Sénégal, alors que les risques agro-climatiques associés aux pauses pluviométriques sont plus importants dans les régions arides et semi-arides du Sahel comme le montrent Barron *et al.* (2003), Segele et Lamb (2005), Frappart *et al.* (2009). Denis *et al.*, (2009) ont utilisé une dizaine de fonctions de distributions aléatoires pour ajuster la distribution empirique de la fréquence d'occurrence saisonnière des DS dans la Péninsule Malaisienne sans un succès notable. Lanà *et al.*, (2008) ont calculé les périodes de retour de certains types de DS sur la base d'ajustement de la distribution de Weibull. Malheureusement ces approches statistiques souffrent de leur caractère stationnaire et du manque de données dans notre sous région.

Très peu d'études se sont intéressées à la cohérence spatiale des pauses pluviométriques (exemple de Marteau, 2011), leur saisonnalité (en termes de date de début, fréquence d'occurrence et durée), leur implication dans la qualité des saisons pluvieuses de la sous-région et la prévisibilité potentielle des pauses de longue durée (pauses extrêmes) en lien avec les températures de surface des Océans. Pourtant, ces indicateurs permettent une bonne compréhension des pauses et aident à améliorer leur prévision statistique et dynamique (dans les modèles de climat).

### 1.3 Objectifs et plan de la thèse

L'objectif général de cette thèse est de contribuer à améliorer notre compréhension de la distribution intrasaisonnière des événements pluvieux à travers une maîtrise de l'occurrence des pauses pluviométriques au cours de la saison des pluies. En particulier, elle cherche à (i) caractériser les DS (date de début, fréquence d'occurrence saisonnière et durée), (ii) identifier les traits prévisibles dans leur variabilité (notamment la saisonnalité locale et multi-sites, la co-

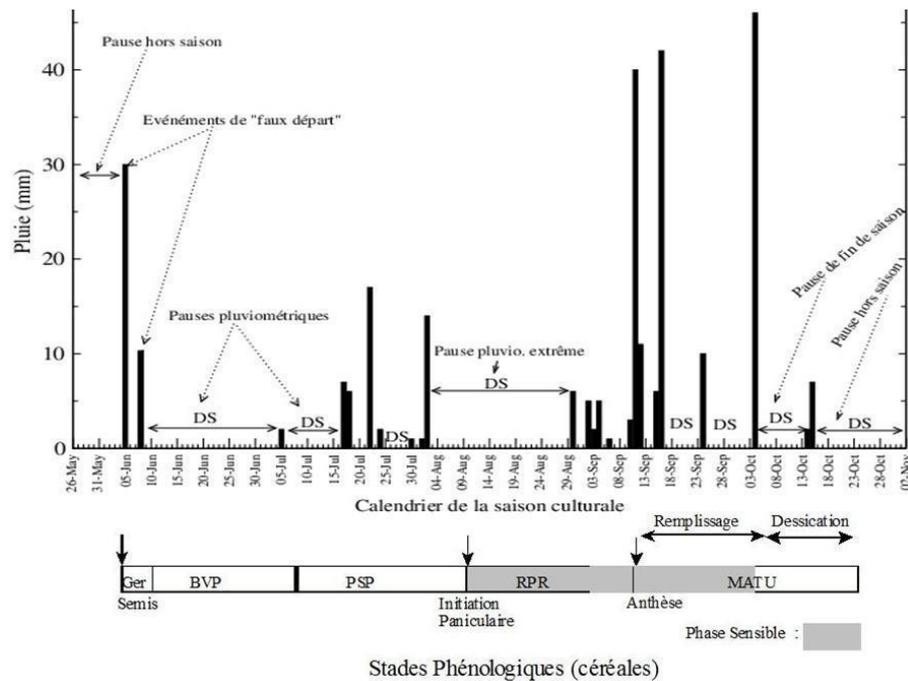


Figure 1.3: *Distribution des pauses pluviométriques et phases phénologiques des céréales (mil, sorgho, maïs). Les événements de faux départ et les pauses pluviométriques (DS) sont désignés par les flèches.*

hérence spatiale, leur implication dans la variabilité pluviométrique, leur lien avec les anomalies des températures de l'Océans), (iii) identifier et quantifier les incertitudes associées à l'intégration des modèles régionaux de climat (MRC) et les modèles de cultures dans le contexte des études d'impacts.

Nous utiliserons des données observées du Sénégal et du Niger, les sorties de huit modèles régionaux de climat (MRC) et les températures de surface des Océans. Les données observées sont analysées directement et les données simulées sont employées dans divers scénarii d'analyses de sensibilité en entrée du modèle SARRAH<sup>4</sup> (Dingkhun *et al.*, 2003 ; Sultan *et al.*, 2005).

Ce document est reparti en six chapitres (l'introduction constitue le *chapitre 1*). Les méthodes mathématiques et statistiques employées pour aborder les problèmes sont diverses et variées. Par conséquent chaque chapitre détaillera des méthodes spécifiques pour résoudre une problématique ou répondre à une question scientifique.

- *Chapitre 2* présente la zone d'étude (Sénégal et Niger), les sources et les données utilisées.

4. Système d'Analyses des Risques Agro-climatiques, H pour Habillé ou détaillé

- Le *chapitre 3* fait une mise à jour de nos connaissances sur la variabilité et les tendances des composantes pluviométrique à forts impacts agricoles, avec des approches agro-météorologiques ciblées. Nous employons essentiellement les tests statistiques de Fisher Snedecor (F-test), de Student (t-test) et l'indice d'erreur relative pour développer un algorithme permettant d'identifier les points de changement, les fortes variabilités et les grandes tendances saisonnières, interannuelles et inter-décennales. Nous quantifions également l'amplitude et précisons la direction (ou signes) des grands changements observés dans le régime pluviométrique local. Cet algorithme est appelé le *Student-Fisher Statistical Scheme* (SFS). Ce chapitre pose la problématique des pauses pluviométriques dans la sous région.

- Le *chapitre 4* traite la prévisibilité potentielle des pauses pluviométriques extrêmes en trois étapes : i ) La caractérisation multi-échelle des pauses pluviométriques (DS) au Sénégal et au Niger, ii) L'identification des liens entre la variabilité spatio-temporelle de pluviométrie locale et l'occurrence des pauses pluviométriques, iii) L'identification des liens entre l'occurrence des pauses extrêmes et les facteurs externes telles que les températures des Océans. En comparant le Niger (pays continental) et le Sénégal (pays côtier), ce chapitre permet d'affiner notre compréhension des similitudes et des disparités qui se trouvent entre le Sahel Central (11°W et 5°E, 12°N et 16°N) et le Sahel Ouest (18°W et 11°W, 12°N et 16°N) selon la subdivision du Sahel Ouest Africain proposée par Lebel et Ali (2009)).

- Dans le *chapitre 5*, nous discutons des sources d'incertitudes dans les études d'impacts intégrant les modèles de climat et les modèles de cultures. Nous exposons d'abord les méthodes d'extraction et d'intégration des sorties des MRC dans les applications agronomiques avec le modèle SARRAH. Il montre les traits particuliers de la pluie simulée ainsi que le potentiel des MRC à reproduire le caractère fréquence-durée des DS (voir aussi l'annexe D). C'est également ici que les artefacts de post-traitement sont discutés comme étant des sources d'incertitudes.

Ainsi, nous montrons comment les biais dans la description des DS par les MRC peuvent expliquer la propagation des biais dans la production du mil *Souna III* simulée

par SARRAH. Il expose une quantification des incertitudes liées à la propagation des biais sur les rendements potentiels du mil *Souna III* lorsque la distribution de la pluie des MRC est mal représentée. Ce chapitre met ainsi en exergue comment optimiser les ressources de la modélisation pour améliorer l'évaluation et la prévision de la production agricole.

- Le *chapitre 6* est une synthèse générale des résultats saillants et des perspectives auxquelles ils s'ouvrent.

# Chapitre 2

## Zone d'étude et données utilisées

### 2.1 Sénégal

Le Sénégal est situé à l'extrême Ouest de l'AO entre les latitudes  $12^{\circ}30-16^{\circ}30N$  et les longitudes  $11^{\circ}30-17^{\circ}30W$ . Le territoire couvre environ  $197\ 000\text{ km}^2$ . La topographie du pays est exemptée de terrain escarpé. Seule une petite partie du relief, à la frontière Sud-Est avec la Guinée, est relativement élevée avec des altitudes  $> 200\text{ m}$  par rapport au niveau de la mer. Les arbres et la steppe arbustive dominant le Nord, la savane boisée prédomine au centre du pays tandis que la savane dense et la forêt se trouvent de plus en plus vers le sud (Moron *et al.*, 2006). Hormi les facteurs de grande et méso-échelle, la circulation atmosphérique locale est particulièrement influencée par la proximité avec l'Océan Atlantique Nord. La figure 2.1a illustre la position moyenne de la zone de convergence inter-tropical pendant l'été de l'hémisphère Nord. Le flux maritime maintient les régions côtières très humides et crée un gradient Est-Ouest des températures dans la saison sèche entre novembre-mai (Fall *et al.*, 2006). L'humidité relative également diminue du sud au nord avec une dérive profonde vers les régions côtières. La couverture nuageuse influence la durée quotidienne de l'ensoleillement. Cependant, dans la saison des pluies, la durée de l'insolation moyenne en juillet-août-septembre est rarement en dessous de 6-7 heures du Sud vers le Nord (Fall *et al.*, 2006).

Le taux de précipitations, associé aux lignes de grains qui arrosent le Sénégal, a une valeur moyenne de  $5\text{ mm h}^{-1}$  (exemple du cas de Dakar en 1992-1993 par Nzeukou et Sauvageot (2002)). Malgré sa faible cohérence spatiale, l'intensité des précipitations diminue vers le nord

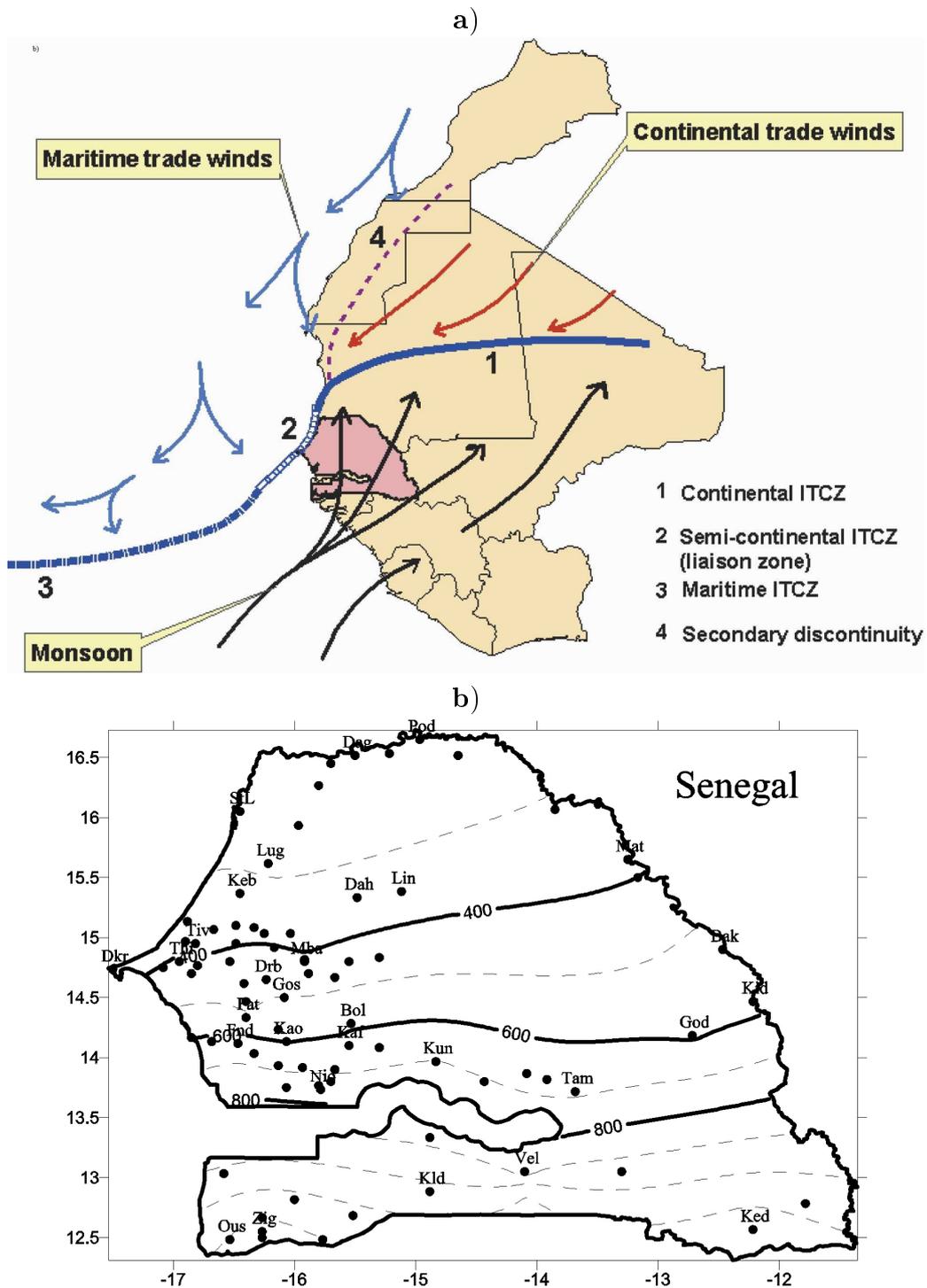


Figure 2.1: a) Dynamique atmosphérique caractérisant la partie extrême de l'Afrique de l'Ouest : Position moyenne de la zone de convergence inter-tropicale pendant l'été de l'hémisphère Nord (Fall et al., 2006). b) Carte d'orientation, localisation des sites de la zone d'étude et distribution spatio-temporelle moyennes de la pluviométrie récente du Sénégal. L'écart inter-isohyète est de 100 mm.

de 19 à 10 mmjr<sup>-1</sup> (Moron *et al.* 2006) en phase avec les nombre de jours pluvieux. Considérant la longueur moyenne de la saison des pluies, l'amplitude des températures et la forme de son relief, le Sénégal se retrouve dans les groupes II, III, et les classes AEZ5 de la classification agro-écologique de la FAO (1978) et du TAC/CGIAR2 (1992)<sup>1</sup> (les détails de ces classifications peuvent être consultés dans Sivakumar et Valentin (1997)). Ces conditions écologiques sont favorables à la culture du mil, sorgho, maïs, arachide, coton et du niébé en milieu paysan.

Quatre zones pluviométriques différentes sont identifiées au Sénégal (figure 2.1). Il y a la zone nord (NZ), la zone centre nord (CN), la zone centre sud (CS) et la zone sud (SZ). Ces quatre régions pluviométriques ont également des contrastes agricoles assez différents, ce qui leur a valu le nom de "zones agro-climatiques". Il s'agit de la zone Nord (NZ), la zone centre Nord (CN), la zone centre Sud (CS), et la zone Sud (SZ). La NZ est la partie du pays où le cumul pluviométrique moyen annuel ne dépasse pas 400 mm. Dans cette zone l'agriculture sous pluie est techniquement difficile voir impossible chaque année à cause des déficits pluviométriques récurrents. La CN et la CS sont respectivement entre les isohyètes 400-600 mm et 600-800 mm. Elles englobent le bassin arachidier et présentent un potentiel agricole assez diversifié. La SZ concerne toute la zone sud de l'isohyète 800 mm. Elle a un système agricole assez sécurisé qui utilise des variétés de mil à cycle long, du sorgho, du maïs, du coton et du riz. Cette zone est la seule dans laquelle la variabilité Est-Ouest de la pluie est très importante. Par exemple à Oussoye (Ous), Zinguinchor (Zig), la moyenne annuelle de la pluie dépasse 1,100 mm sur la période 1979-2008 alors qu'à Kolda (Kol) et Vélingara Casamance (vel casa), la moyenne de la pluie sur cette même période est en dessous de 1000 mm. Ces latitudes pluviométriques sont des "bandes" relativement petites ayant une différence intra-zonale de l'ordre de 200-300 mm. Par conséquent des pluviomètres bien repartis sur la longitude permettent de capter cette variabilité intra-zonale de la pluie. Ce zonage basé sur la pluie est très proche des zones naturelles précédemment décrites par Moron *et al.*, (2006).

---

1. The Technical Advisory Committee of the Consultative Group on International Agricultural Research

## 2.2 Niger

Situé entre les latitudes 11°33-23°33N et longitudes 0°06-15°20E, le Niger est un pays enclavé d'une superficie de 1 267 millions Km<sup>2</sup>. Il est limité au Nord par la Libye et l'Algérie, à l'Est par le Tchad, au sud par le Nigeria et le Bénin et à l'Ouest par le Burkina-Faso et le Mali. Le climat du Niger est tropical semi-aride, avec une saison sèche et une saison pluvieuse bien marquées. La saison sèche s'étend généralement d'octobre à mai. Elle est caractérisée par des tempêtes de sable, de poussière et des coups de vent fréquents, qui ont souvent des effets très nocifs sur la santé (maladies respiratoires, maladies diarrhéiques, fièvres, toux, refroidissements, rougeole, etc.) et sur l'environnement (accumulation de sable, érosion, etc.).

La saison des pluies s'étend généralement de juin à septembre (Sivakumar, 1992; Sultan *et al.*, 2005). En règle générale, la quantité de précipitation et la durée de la saison des pluies diminuent à mesure que l'on se déplace vers le Nord (ACMAD, 1998). Le niveau annuel normal des précipitations va de 0 mm à 800 mm du nord au sud du pays (figure 2.2). Les précipitations quotidiennes les plus fortes se produisent généralement en juillet et en août, si bien que les quantités de pluie reçues durant ces deux mois représentent plus de 70 % du total annuel. De plus, même pendant la saison des pluies, des pauses pluviométriques d'une dizaine de jours sont relativement fréquentes. Sur toute l'étendue du territoire, la durée de l'insolation correspond à environ 70 % de sa durée théorique.

Les températures annuelles moyennes sont très stables et s'échelonnent entre 25°C et 30°C. On observe deux maxima saisonniers (avril/ mai et octobre) et deux minima saisonniers (décembre/ janvier et août). Dans toutes les régions du pays, les températures les plus élevées (plus de 40°C) sont enregistrées durant la saison sèche dans le Sud du pays (avril et mai), plus que dans le Nord (mai et juin). Durant la saison des pluies, les températures atteignent généralement leurs minima relatifs en août et leur maxima relatif vers la fin de la saison (septembre et octobre). Le maximum relatif intervient plus tard dans le Sud (en octobre) que dans le Nord (en septembre) (ACMAD, 1998).

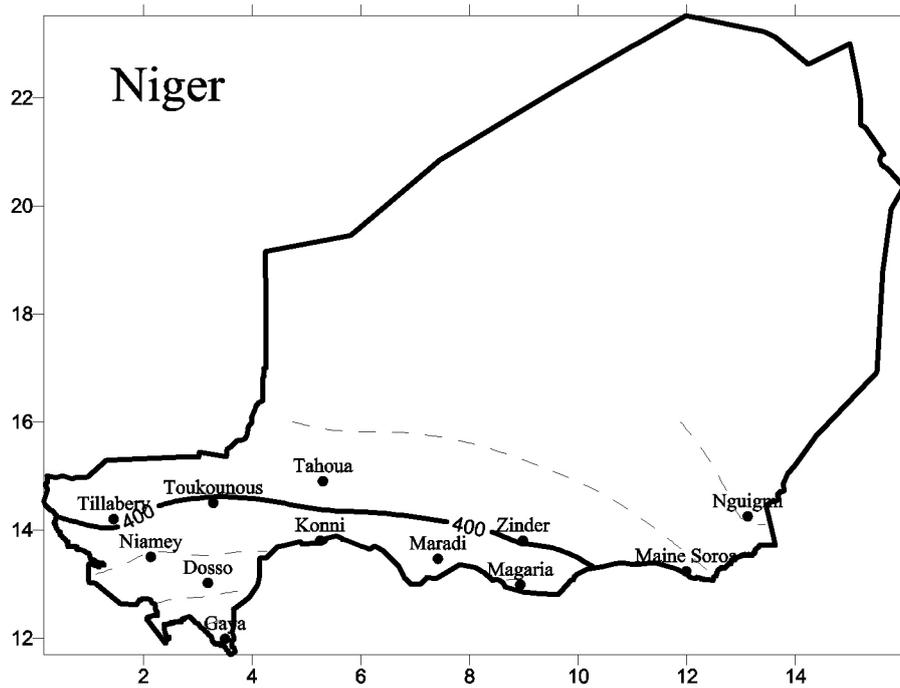


Figure 2.2: Carte d'orientation, localisation des sites de la zone d'étude et distribution spatio-temporelle moyennes de la pluviométrie récente du Niger. L'écart inter-isohyète est de 100 mm.

## 2.3 Données disponibles

Deux jeux de données sont utilisés pour les analyses : i) les données observées au sol dans les parks météo., agro-météo, climatologiques et pluviométriques du Sénégal et du Niger, les données de simulation de 8 modèles régionaux de climat (MRC) et les données de températures de surface des Océans globaux (SSTs). L'utilisation des données de quelques stations du Niger à côté de celles du Sénégal permet d'affiner notre compréhension des similitudes/contrastes locaux en rapport avec la distribution et la prévisibilité des pluies ainsi que la performance des modèles régionaux de climat (voir les chapitres 4 et 5 et l'Annexe C). Les figures 2.3a, b présentent la variabilité interannuelle du cumul pluviométrique et du nombre de jours pluvieux annuels au Niger et au Sénégal. Cette variabilité est étudiée de manière détaillée dans le chapitre 3.

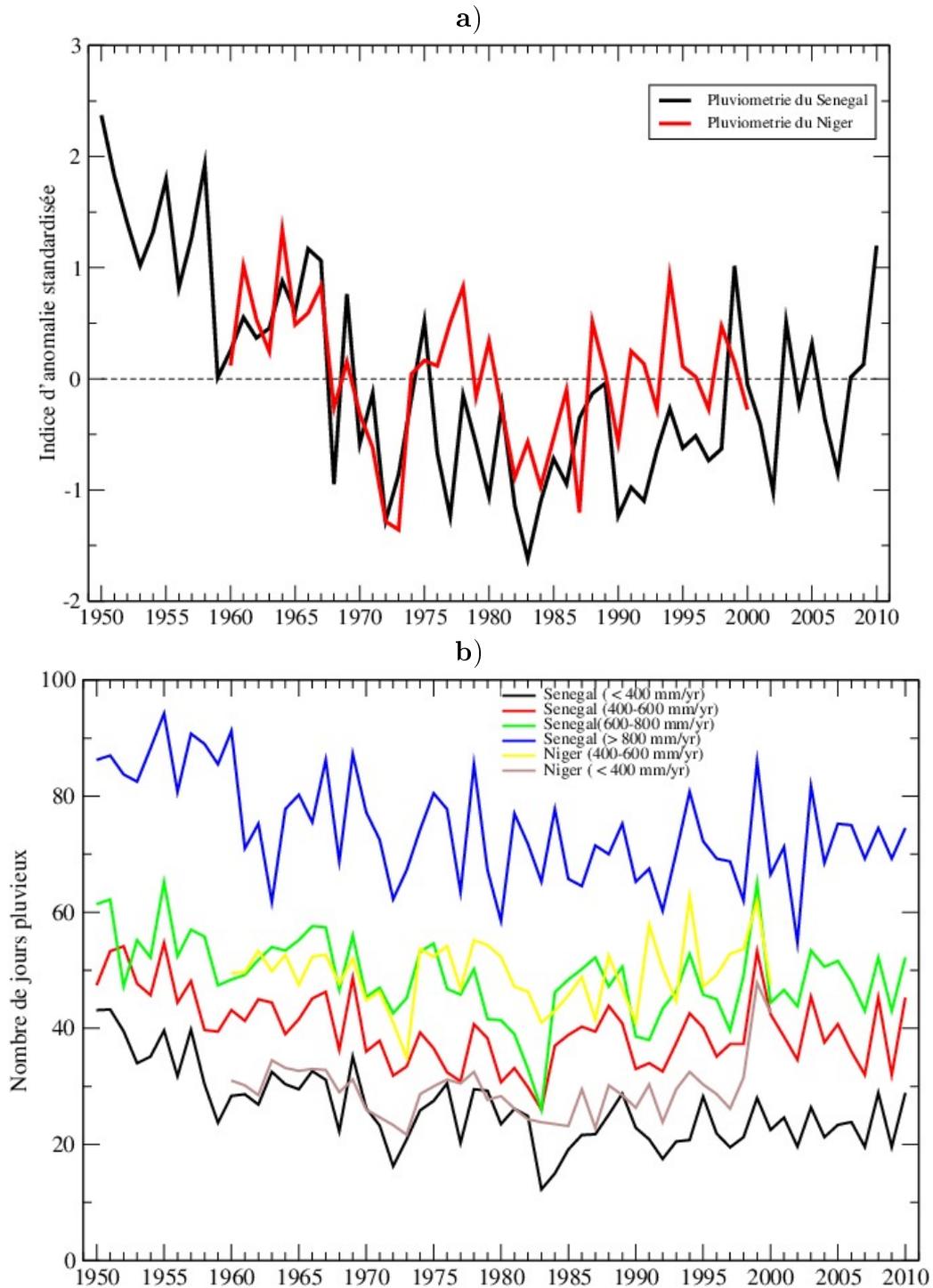


Figure 2.3: Variabilité interannuelle du cumul pluviométrique et le nombre de jours pluvieux annuels. (a) les anomalies standardisées sur 1970-2000. (b) Le nombre de jour pluvieux par zone pluviométrique au Niger et au Sénégal.

### 2.3.1 Données observées en station

Les données du Sénégal sont extraites de la base de données du CERAAS<sup>2</sup>. Elles proviennent de divers réseaux d'observation dont celui de l'ANAMS<sup>3</sup> et celui mis en place par ISRA<sup>4</sup>-CERAAS dans le cadre du suivi agro-sylvo-pastoral national. Il s'agit d'une base de données journalières d'une centaine de points de mesure repartis un peu partout sur le territoire national (voir figure 2.1b). Elle est constituée de stations synoptiques, climatologiques et des postes pluviométriques tenus par des SDDR<sup>5</sup>. Le nombre des sites d'observations pluviométriques est en augmentation par rapport aux années 90s et antérieures contrairement aux remarques des rapports précédents (Bell et Lamb, 2006). Cette évolution positive de l'observatoire est attribuable à l'impact des différents projets de recherche et développement (AMMA, ESCAPE) implémentés dans la sous-région dans ces dernières années.

Cette base de données a subi un contrôle de qualité par traitement à l'aide du script *RClimDex.r*<sup>6</sup> (Easterling *et al.*, 2003 ; New *et al.*, 2006), reconnu par le GIEC<sup>7</sup>. L'objectif du traitement par *RClimDex.r* est d'identifier les données aberrantes (pluie négative) et les valeurs manquantes. Ensuite on procède à une première visualisation graphique des cumuls interannuels de chaque site. L'effet des valeurs douteuses (extraordinairement grandes dans l'échantillon ou *outliers*) se remarquent sur les graphiques individuels tracés pour chaque site. Ce qui nous permet de revenir sur les années mises en cause pour vérifier ces valeurs. Grâce à la connaissance du milieu et à l'expérience sur la climatologie des précipitations de la zone, on retrouve les erreurs de typographie associée aux valeurs journalières. Les sites non identifiés (par leur coordonnées géographiques), les séries courtes (moins d'une dizaine d'années), manquantes et douteuses (trop de valeurs extrêmes injustifiées ou négatives), sont tous écartés.

Après ce contrôle, les données ont été homogénéisées. L'homogénéisation consiste à corriger les ruptures artificielles dues à la modification dans le réseaux d'observations. Il peut s'agir notamment du déplacement ou changement d'un pluviomètre, changement de l'envi-

---

2. Centre d'Etudes Régional pour l'Amélioration de l'Adaptation à la Sécheresse

3. Agence National de la Météorologie du Sénégal, actuelle *Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie (ANACIM)*

4. Institut Sénégalais de la Recherche Agricole, l'institution de cotutelle du CERAAS

5. Service départemental de développement rural

6. *RClimDex.r* est disponible sur le site <http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI>

7. Groupe Intergouvernemental d'Experts du Climat

ronnement immédiat d'une station, d'observateur etc. Ces types de ruptures artificielles sont présents dans la plupart des données climatiques et peuvent inférer avec la variabilité réelle de la pluie. Omettre de corriger ces ruptures artificielles implique le risque que les tendances passées soient biaisées. La procédure de correction est intégrée dans le script *RHtest-dlyPrpc.r* (voir sur <http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI>) pour les données journalières. Les données doivent être consécutives et dans l'ordre du calendrier. Ce script permet de détecter et d'ajuster les points de rupture multiples pouvant exister dans une série comportant des erreurs autorégressives du premier ordre. Il est basé sur les test de  $t$  et  $F$  maximum avec pénalité, impliqués dans un algorithme de test récursif avec un facteur d'auto-corrélation retardée (laggée) (Wang *et al.*, 2010). L'homogénéisation permet également d'avoir la date et l'amplitude des ruptures détectées. S'il n'est pas possible d'appliquer les coefficients correcteurs aux données journalières, les dates des ruptures permettent néanmoins de déterminer des périodes supposées homogènes.

Finalement, on se retrouve avec une base de données pluviométriques propre, homogènes et non interpolées (Tableaux A.1 et A.2 de l'annexe A). Le nombre de sites change selon la longueur de la série temporelle disponible. Ainsi, dans les chapitres 3, 4 et 5, 84 sites sont utilisés pour la mise à jour de la climatologie des précipitations, l'analyse multi-échelle des pauses pluviométriques et la sensibilité des rendements du mil au Sénégal, tandis que 31 sites sont utilisés dans l'analyse de l'évolution à long terme de la pluie et la prévisibilité des pauses pluviométriques extrêmes (chapitres 3 et 4).

Les autres variables telles que les extrema de température ( $T_{max}$ ,  $T_{min}$ ), l'humidité relative moyenne ( $RH_{moy}$ ), la vitesse du vent et la durée d'insolation sont celles qui souffrent plus de lacunes. Elles sont manquantes sur le long terme. Nous disposons de ces variables sur seulement 12 stations synoptiques (1991-2000), en provenance de l'ANAMS. Pour réaliser les simulations agronomiques à l'aide des modèles de cultures, nous avons créé une saison moyenne climatologique des 10 ans (1991-2000). Aux sites d'observations pluviométriques, on affecte la moyenne climatologique des sites synoptiques qui leur sont plus proches. Ainsi à chaque saison, la distribution de la pluie observée (simulée) est conservée tandis que les autres variables, nécessaires pour l'estimation de l'évapotranspiration (ETP), constituent une réplique de leur moyenne climatologique. C'est une approche assez classique le plus souvent employée

pour palier aux manques de données synoptiques (Baron *et al.*, 2005; Oettli *et al.*, 2011).

Les données de pluies journalières du Niger proviennent de la DMN<sup>8</sup> de Niamey. Les séries journalières sont disponibles pour la période 1960 à 2000 sur 12 stations (Tableau A.3 de l'annexe A). Ces données sont sorties essentiellement des TCMs<sup>9</sup> des stations synoptiques et climatologiques disponibles à la DMN. La série journalière de pluies observées sur la période 1960-1990 a été copiée de la base de données de l'Unité BRIL du CRA<sup>10</sup>, tandis que 1991-2000 fut copiées des TCMs de la DMN, Niamey, Niger.

En dehors du contrôle de qualité régulièrement effectué par les experts du CRA, les données relevées des TCM étaient conformes aux archivages CLIDATA<sup>11</sup> de l'unité "Climatologie" de la DMN à laquelle j'étais affecté pendant mon séjour en tant que détaché du *Service Civique National*.

### 2.3.2 Données de température de surface de l'Océan (SST)

Il est bien reconnu que les températures de surface des Océans (SSTs) influencent la variabilité interannuelle et décennale de la pluviométrie du Sahel. L'analyse des SSTs observées ainsi que les expériences de simulations à l'aide des MCG soutiennent que les anomalies des SSTs (SSTA) des températures de surface de l'océan l'Atlantique, de l'océan équatorial Indien et l'océan Pacifique tropical modulent les précipitations au Sahel (Folland *et al.*, 1986; 1998; Janicot *et al.*, 2001; Giannini *et al.*, 2003; Mohino *et al.*, 2011), y compris l'étendue spatiale de la sécheresse pendant les événements El Niño (Lyon 2004). La figure 2.4 présente la distribution des températures océaniques moyennes globales pendant les saisons mai-juillet et août-octobre 2009. Les cadres rectangulaires délimitent les bassins océaniques qui influencent la saison des pluies au Sahel.

L'occurrence des pauses extrêmes est-elle liée aux anomalies des températures de surface des Océans? Pour répondre à cette question, nous utilisons les données de températures de

8. Direction de la Météorologie Nationale

9. le Tableau des Cumuls Mensuels est le carnet de l'observateur du park météo. dans lequel sont enregistrées manuellement toutes les variables météo.. A la fin de chaque mois ces carnets sont acheminés à la DMN pour dépouillement et archivage dans la base de données.

10. Centre Régional Agrhymet

11. L'application CLIDATA est un logiciel de propriété industrielle développé dans le cadre de la coopération entre l'Institut Hydrométéorologique Tchèque et la DMN, Niger. Il est essentiellement utilisé pour l'archivage, le control de qualité et l'analyse graphique des données hydro-agro-météorologiques

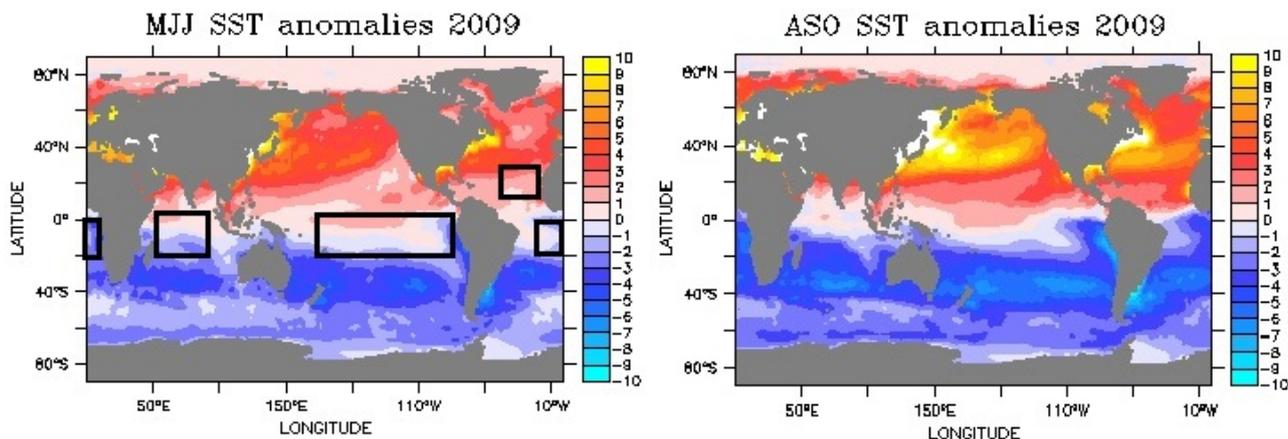


Figure 2.4: *Etat des températures océaniques moyennes globales pendant les saisons mai-juillet et août-octobre 2009. Les cadres rectangulaires delimitent les bassins océaniques qui influencent la saison des pluies au Sahel.*

surface des Océans du Hadley Centre (Rayner *et al.*, 2004) plus connues sous l'appellation de HadISST<sup>12</sup>. HadISST est une archive de SSTs mensuelles, observées de 1870 à nos jours. Nous avons extrait les SSTs de la période 1950-2010. Ensuite, nous avons élaboré des indices d'anomalies de SSTs (SSTAs) en soustrayant la climatologie. Ces SSTAs sont mises en relation avec l'indice régional d'occurrence des pauses extrêmes (ROI) pour étudier la nature des corrélations éventuels (voir le chapitre 4).

### 2.3.3 Données de précipitation simulée issues des expériences AMMA-ENSEMBLES

Depuis un certain temps, des progrès considérables sont réalisés dans le domaine de la modélisation dynamique du climat avec l'avènement des modèles régionaux de climat (MRC). Les MRC reposent sur des modèles à méso-échelle simulant le climat local d'une région déterminée à résolution fine (20-50 km) (Paeth *et al.*, 2011). Ils ne remplacent pas les modèles de circulation générale ou MCG qui simulent le climat à une plus grande résolution (maillage d'une centaine de km), puisqu'ils prennent les informations à l'échelle de ces derniers pour produire les détails à une plus fine échelle. Les MRC prennent en compte certains processus sous maille qui influent beaucoup sur la variabilité spatio-temporelle de la pluviométrie locale (l'orographie, la convec-

12. Hadley Centre Improved SST data set

tion locale etc.). Les améliorations dans les MRC concernent surtout la physique (réduction de l'échelle spatiale des mailles aux dizaines de kilomètres) et les paramétrisations (Jones *et al.* 2004; Hourdin *et al.* 2006; Sylla *et al.* 2010a). Par conséquent, ils donnent des résultats plus plausibles dans l'évaluation des événements extrêmes sur une région, comparativement aux MCG (Jones *et al.*, 2004; Salack, 2007; Sylla *et al.*, 2010b; Paeth *et al.*, 2011).

Par ailleurs, les approches de la modélisation du climat ont aussi beaucoup évolué avec l'introduction des simulations d'ensemble multi-modèles (Palmer *et al.*, 2004). Ces dernières consistent d'une part à configurer différents modèles dynamiques de climat sur la base des mêmes conditions initiales et latérales ou d'autre part à initialiser un même modèle avec une séquence de conditions latérales différentes (Palmer *et al.*, 2004). Ces méthodes d'approches ont permis d'aboutir à de meilleures sorties des modèles de climat, améliorant ainsi la prévisibilité du climat à toutes les échelles spatio-temporelles (Hansen *et al.*, 2006; Troccoli et Palmer, 2007; Paeth *et al.*, 2011).

Les données de précipitations journalières simulées que nous avons utilisées sont sorties des expériences de simulations d'ensemble, d'une dizaine de modèles régionaux issus du projet européen ENSEMBLES<sup>13</sup>. Les objectifs du projet sont énumérés par Paul van der Linden à la conférence AMMA-ENSEMBLES tenue à Niamey au Niger les 23, 24, 25 et 26 mai 2008 (Bouali, 2009). Il s'agissait de :

1. mettre en place un système de prévisions basé sur un ensemble de modèles européens globaux et régionaux pour étudier les changements climatiques,
2. quantifier et réduire l'incertitude dans la représentation des prévisions à différentes échelles de temps et d'espace, dans le cadre du changement climatique, afin de produire des scénarios de l'évolution future du climat,
3. maximiser l'exploitation des résultats de prévisions en les liant à une gamme d'applications : l'agriculture, la santé, la sécurité alimentaire, l'énergie, les ressources en eau et l'assurance et la gestion des risques météorologiques.

Les expériences de simulations du projet ENSEMBLES proposent plusieurs jeux de données

---

13. Les expériences tirées du projet ENSEMBLES sont actuellement mise à profit dans le cadre du projet CORDEX

dont ceux de modèles régionaux de climat en régime d'ensemble, forcés par les mêmes conditions latérales issues des réanalyses ERA-Intérim<sup>14</sup> et fixés sur une grille régulière de  $0.44 \times 0.44^\circ$  soit  $50 \times 50$  km. La grille couvre l'Afrique de l'Ouest (la fenêtre AMMA,  $-20^\circ\text{W}$ - $10^\circ\text{E}$ ) sur la période 1989-2007. Ces données sont disponibles et accessibles à tous, moyennant le respect de quelques termes et conditions d'utilisations (<http://ensemblesrt3.dmi.dk/>).

La matrice de la région AMMA sortie de ces simulations contient de données journalières de plusieurs variables météorologiques sur la période 1990-2050 et plus (simulations du climat présent et changements climatiques) (Van der Linden et Mitchell 2009). Pour ces travaux, nous avons choisi seulement huit (08) de ces modèles. La pluie simulée par chacun des huit modèles régionaux de climat (MRC) est extraite sur la fenêtre du Sénégal afin de forcer le modèle de culture SARRAH calé et validé sur le mil Souna III (en application à la sensibilité des rendements potentiels voir le chapitre 5). Ces 8 MRC sont développés et/ou maintenus par différentes institutions (Tableau 2.1). Parfois deux institutions peuvent avoir le même modèle avec différentes configurations ou paramétrisations comme le cas du modèle HIRHRAM5 (tableau 2.1). La Figure 2.5 est une représentation du cycle saisonnier des précipitations journalières en Afrique de l'Ouest. Certains détails sur l'utilisation de ces données à l'échelle locale sont exposés dans le chapitre 5 et l'annexe D.

---

14. Les ré-analyses ERA-Intérim sont la nouvelle génération de ré-analyse (1989 à nos jours) du Centre Européen des Prévisions Météorologiques à Moyen Terme développées pour remplacer les ré-analyses ERA-40 du même centre (Pour plus d'information voir <http://www.ecmwf.int>)

Tableau 2.1 – *Noms et sources des modèles régionaux utilisés dans cette analyse. Chaque modèle est nommé d'après l'acronyme de l'institution qui le maintient.*

Nom du modèle régional	Institution	Acronyme
HIRHAM	Danish Meteorological Institute (DMI)	DMI
CLM	GKSS Forschungszentrum Geesthacht GmbH (GKSS)	GKSS
HadRM3P	UK Met Office, Hadley Centre for Climate Prediction and Research (HC)	HC
RegCM3	The Abdus Salam Intl. Centre for Theoretical Physics (ICTP)	ICTP
RACMO	The Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI)	KNMI
HIRHAM	Meteorologisk Institutt	METNO
REMO	Max-Planck-Meteorological Institut (MPI)	MPI
RCA	Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI)	SMHI

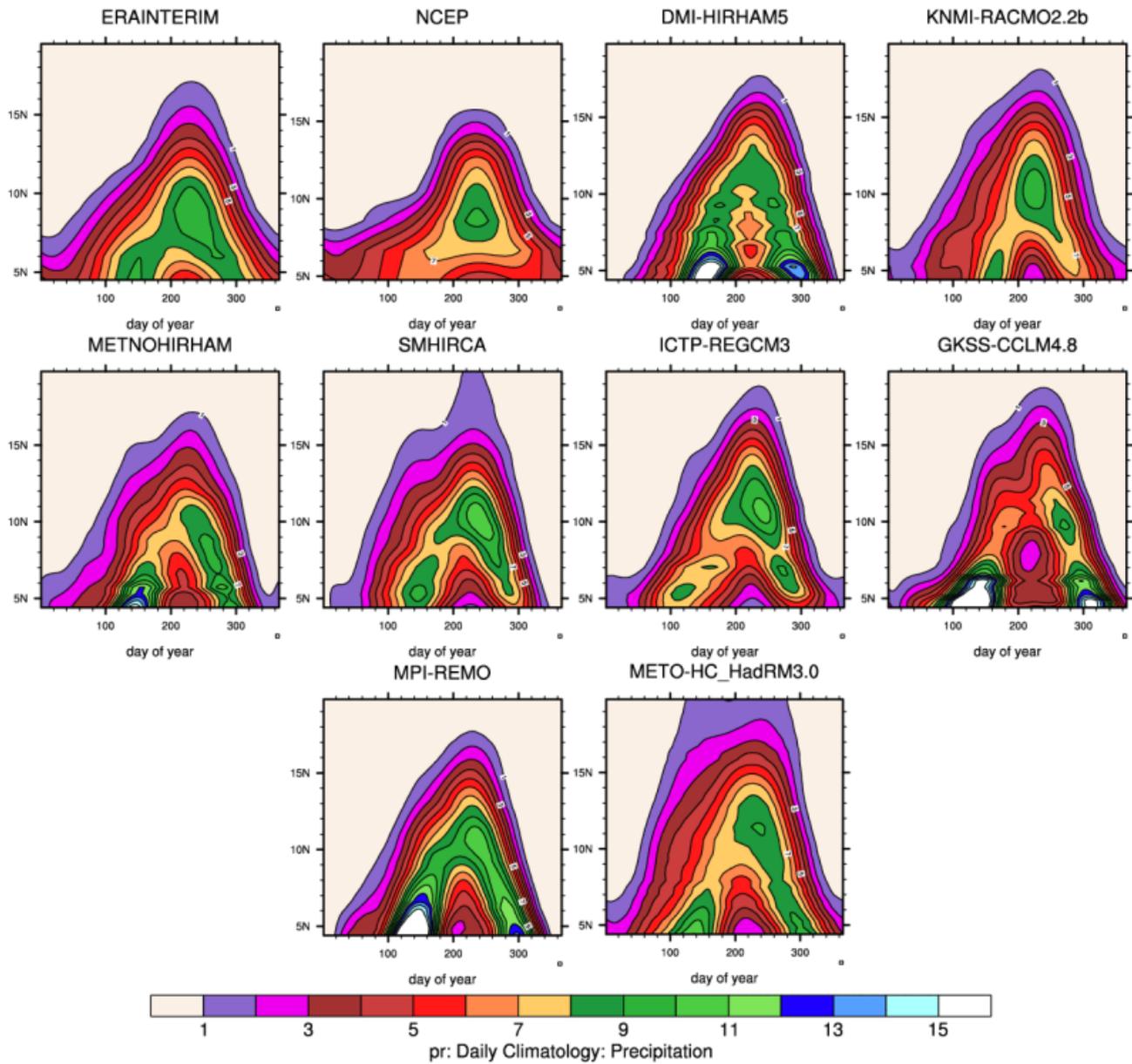


Figure 2.5: Evolution latitudinale du cycle moyen journalier des précipitations dans les modèles régionaux de climat (MRC) du projet ENSEMBLES (van der Linden et Mitchell, 2009).

# Chapitre 3

## Composantes pluviométriques à forts impacts agricoles au Sénégal : intégration des tendances locales à la variabilité sous-régionale

### 3.1 Résumé de l'article

La maîtrise de l'évolution historique des régimes pluviométriques est une composante essentielle pour les systèmes d'alertes précoces (Le Barbé *et al.*, 2002). Dans la sous-région du Sahel Ouest africain, la veille agro-climatique est compliquée à cause l'influence de plusieurs facteurs physiques tels que la proximité avec l'océan, l'incursion des masses de poussières désertiques venant du Nord (Smith *et al.*, 2012 ; Dramé, 2012) et l'orographie des régions du Fouta Djallon au Sud.

La majorité des rapports basés sur l'analyse des données observées montrent des anomalies négatives des pluies à partir des années 1970s jusqu'au début des années 1990s (L'Hôte *et al.*, 2002 ; Sène et Ozer, 2002 ; Dai *et al.*, 2004). La persistance de ces anomalies négatives est considérée comme un " *changement* " et non une variabilité pluviométrique car les différences inter-décennales étaient statistiquement significative (Bell et Lamb, 2006). Tout récemment,

Lebel et Ali (2009) rapportent que le Sahel central (11–16°N ; 10° W–0°E) et le Sahel Est (11°N–16°N ; 0–10°E), on observe un "retour" vers des conditions relativement pluvieuses. Alors que la situation à l'extrême Ouest du Sahel (11–16°N ; 20–10°W) reste encore déficitaire. La situation pluviométrique récente telle qu'elle est observée par exemple au Sénégal, nous incite à poser la question : les conditions pluviométriques actuelles sont-elles similaires à celles des années de sécheresse (les années 1970s et 1980s) ? En effet, les événements d'inondations sont récurrents depuis le début des années 1990s selon l'étude de Sène et Ozer (2002). A nos jours, cette situation persiste et des cumuls excédentaires sont enregistrés dans plusieurs localités du pays presque à chaque saison. A la vue de ces développements locaux relativement "nouveaux", il est nécessaire de faire une mise à jour de nos connaissances sur l'évolution des composantes pluviométriques à forts impacts agricoles. Il serait important de trouver des réponses assez précises aux questions suivantes : (i) quelles sont les composantes intrasaisonniers de pluie qui ont changé ? (ii) quels sont les taux, le sens et les échelles de ces changements ? Ces changements sont-ils significatifs et persistants ?

L'objectif de ce chapitre est d'apporter des réponses aux questions ci-dessus avec des approches agro-météorologiques. Nous nous intéressons notamment aux cumuls pluviométriques (décadaires, saisonniers et interannuels), le nombre de jours pluvieux (décadaires, saisonniers et interannuels), les dates de semis optimales et les longueurs de saison culturale, les dates de début/fin de saison, et les fréquences d'occurrence de quatre catégories de pauses pluviométriques. Nous employons essentiellement les tests statistiques de Fisher Snedecor (F-test), de Student (t-test) et l'indice d'erreur relative pour développer un algorithme permettant d'identifier les points de changement (années de début des changements), les fortes variabilités et les grandes tendances saisonnières, interannuelles et inter-décennales, leur amplitude et leur signes (ou signes positif ou négatifs). Ces analyses se basent essentiellement sur les données pluviométriques du Sénégal en guise d'étude de cas et posent la problématique des pauses pluviométriques (DS) dans la sous région.

Le diagnostic spatio-temporel par le SFS<sup>1</sup> permet d'identifier trois périodes dans l'évolution des facteurs pluviométriques à forts impacts agricoles au Sénégal. La période humide,

---

1. Le Schéma statistique de Student-Fisher ou *Student-Fisher statistical scheme*

à l'échelle du pays est bien 1950-1969 (P1). Par contre, la période de sécheresse et celle de "recouvrement" sont mal réparties sur le territoire. Depuis plus d'une décennie et demie, les cumuls pluviométriques (annuels et intrasaisonniers), les nombre de jours aux cumuls exceptionnels (RR50), et la fréquence des pauses courtes (DS1) ont connu des changements importants. En début des années 1990, un recouvrement de l'ordre de +10 % à +17 % est observé dans les régions du Sénégal où la pluviométrie moyenne annuelle est  $\leq 800$  mm/an. De manière générale, les tendances au recouvrement sont plus importantes à l'échelle locale (+26 %-32 %), avec des années de débuts aussi reculées que 1988 dans certains cas individuels (exemple Bake, Boulel et Kebemer).

Cette situation du régime pluviométrique est persistante jusqu'à nos jours avec des hausses remarquables de la fréquence des jours pluvieux en Août-Septembre (21<sup>eme</sup>-26<sup>eme</sup> décade). Les valeurs du cumuls journaliers de plus en plus fréquentes incluent la classe 20-40 mm / jour et les cas extrêmes  $\geq 50$  mm / jour, dans les parties Nord et centrales du pays. Les nouvelles perceptions incluent une augmentation dans la fréquence des jours aux cumuls forts, un déplacement du maximum du nombre de jours pluvieux et une augmentation des pauses courtes (surtout au Nord du pays). Cette tendance est statistiquement significative, persistante mais reste encore en dessous de la moyenne de la période humide (1950-1969) en confirmation des études antérieures. Dans l'extrême Sud du pays (les régions dont le cumul annuel est  $\geq 800$  mm), cette tendance au recouvrement n'est pas observée. Il n'y a pas, non plus, de grands changements observés sur les paramètres agro-climatiques tels que les dates de début de saison et les dates de semis optimales dans les décennies passées. Cependant, ces facteurs ont connu une forte variabilité spatio-temporelle.

Le début de la saison des pluies est suivie par des événements extrêmes (exemple des pauses  $\geq$  de 15 jours), en particulier dans la période mai-juin-juillet sur tout le territoire, tandis que la fin des saisons a tendance à enregistrer des pauses de durée moyenne. Les dates de semis optimales sont généralement caractérisées par une forte variabilité inter-saisonnière, conduisant à un raccourcissement de la saison culturale. Ceci suppose une fréquence des "faux départs" et des fins précoces de la saison qui contribuent à augmenter les risques agro-climatiques dans la sous-région. Un synopsis de ces composantes pluviométriques offre un aperçu des valeurs

---

moyennes (affectées de leurs écarts types) par période historique de référence. Cela permet de documenter le contexte agro-climatique dans une perspective d'études d'impacts en agriculture et des applications locales en recherche au développement. Les résultats détaillés de ce chapitre sont publiés dans l'article ci-après.

# Rain-based factors of high agricultural impacts over Senegal. Part I: integration of local to sub-regional trends and variability

S. Salack · B. Muller · A. T. Gaye

Received: 28 June 2010 / Accepted: 31 January 2011  
© Springer-Verlag 2011

**Abstract** The evolution of seasonal cycle and interannual rainfall, the number of rainy days and daily rainfall types, dry spells frequency of occurrence, onset/cessation/length of rainy season, sowing dates, and the duration of the cropping period, are investigated at local (individual sites) and sub-regional scales (four different rainfall zones) using daily records of station data (83 sites) over Senegal. In the limits of a case study, these analyses complement and update previous studies conducted in the extreme Western Sahel (11–16° N and 20° W–10° E). The results unveil noticeable evolution of some of these rain-based factors in the recent periods as compared to the previous dry years. In the regions recording less than 800 mm/year (Sudan and Sahel sub-regions), the positive and statistically significant trends of rainfall amount are associated with new features of increasing frequency of short dry spell category,

increasing number of some classes of extreme daily rainfall amounts and shifts in the peak number of rainy days. At sub-regional scales, the starting years (or change points) the magnitude and the signs of the new trends are unevenly distributed in the period post-1990. Earlier and higher amplitude changes are found at local scales and not less than one third of the sites in each sub-regional network are significantly affected. The extreme Southern sub-region exhibits no significant changes. Statistically significant trends are not observed on daily rain records  $\leq 10$  mm, onset/cessation dates, successful sowing dates, rainy season length, cropping period, medium and extreme dry spell categories. Rather, some of these factors such as the successful sowing date and the cropping season length exhibit significant variability. The onset (cessation) dates of the rainy season are followed (preceded) by extreme dry spell episodes. In the perspectives of climate impact assessments on the local agriculture a sub-regional periodic synopsis of the major rain-based factors of interest to agricultural applications are provided at the end the paper. They document some important internal variability patterns to reckon with in a multi-decadal work over the 1950–2008 period for this region.

S. Salack · A. T. Gaye  
Laboratoire de Physique de l'Atmosphère et de l'Océan  
Simeon Fongang, (LPAO-SF), Ecole Supérieure Polytechnique,  
Université Cheikh Anta Diop,  
BP 5085, Dakar-Fann,  
Dakar, Senegal

S. Salack (✉)  
Centre Régional pour l'Amélioration de l'Adaptation à la  
Sécheresse (CERAAS),  
BP 3320, Thiès Escale,  
Thiès, Senegal  
e-mail: seyni.salack@ucad.edu.sn

B. Muller  
Centre International de Recherche Agronomique pour le  
Développement (CIRAD), UMR, AGRAP,  
34398 Montpellier, France

B. Muller  
Africa Rice Center, AfricaRice, Sahel Regional Station,  
BP 96, Saint-Louis, Senegal

## 1 Introduction

In the West African Sahel, rainfed agriculture is closely linked to food security, and changes in rain regimes need to be monitored. Most of the previous reports based on station data emphasized the overturning of rainfall anomalies from positive in the 1950s to negative after the late 1960s up to the 1990s (L'Hôte et al. 2002; Sene and Ozer 2002; Dai et al. 2004; Bell and Lamb 2006). The persistent inter-decadal patterns of these anomalies were rated as changes rather

than variability because their differences were proven statistically significant (Bell and Lamb 2006). In the recent time, both Central (11–16° N; 10° W–0° E) and Eastern Sahel (11°N–16° N; 0–10° E) are experiencing rainfall recovery. But the Western Sahel (11–16° N; 20–10° W) is still dry (the 1990–2007 average values are equal to the 1970–1989 average values) according to Lebel and Ali (2009). Senegal, as a case study, represents approximately 80% of the total land area of the Western Sahel. The recent characteristics of the rainy seasons led to the question: Are we still under dry conditions in this part of the Sahel? Some local features observed in the daily rainfall include the persistence of flood events (which was reported to have started since the early 1990s see Sene and Ozer 2002), and more often than not above normal total seasonal rainfall is recorded at some locations in the country. These relatively new and local developments prompted this study seeking to provide local detailed update of the rainfall features from agricultural perspectives. The important questions we address are: Which component of the rainfall regime has new pattern? What are the rates, signs and scales of the new patterns? Are they significant? How the locally observed changes (if any) are perceived at sub-regional scale and vice versa? Within the time limit of the available data, what is the most recent state of matters for documentation and application in agriculture?

All rainfall related factors have important agricultural implications. For instance, the development and yield of millet, sorghum, and maize are affected by rainfall amount, onset and early cessation and seasonal distribution of rainy days and dry spells (Catherinet et al. 1963; Misra and Misra 1991; Le Houerou 1992; Sivakumar 1992; Oladipo and Kyari 1993; Sultan et al. 2005). The space-time patterns of these factors are less documented in the recent time for this region. The lack of longer and updated time series (Ozer et al. 2003; Camberlin and Diop 2003; Fall et al. 2006), and insufficient spatial coverage of some previous studies in this topic (e.g., Sane et al. 2008) could not help answer the aforementioned questions. Camberlin and Diop (2003) found a single onset/cessation dates for the whole country and noticed a decreasing trend of the length of the rainy season due to shifts in the onset/cessation dates of the first efficient rainfall over the 1950–1992 period. However, the North–south intra-seasonal rainfall gradient over Senegal is so important (Fall et al. 2006; Salack 2007) that it would not be realistic to consider a single onset date for the whole territory. Sane et al. (2008) used only the southern Casamance region data (Kolda and Velingra sites) to analyze the quality of the rainy season. These two stations are not representative of the entire Senegal, much less the Western Sahel. Some other studies such as Le Barbé et al. (2002), Ali and Lebel (2009), Lebel and Ali (2009) only provided global average information (say 5×5° square box

or more) on the rainfall regime of the West African window which undermine local details.

This study takes advantage of an updated and quality controlled data set of a dense observation network to share with the scientific community valuable information for applications in climate impact assessments on agriculture at local and sub-regional scales. This is also one of the objectives of the AMMA project (The African Monsoon Multidisciplinary Analyses) (Redelsperger et al. 2006; Lebel et al. 2009). Through statistical analysis of long-term daily rain records, we provide a local versus sub-regional perceptions of the observed changes found in some rain-based parameters important for agriculture. These factors include rainfall amount and number of rainy days and types (annual and intra-seasonal), the frequency of occurrence of four categories of dry spells, onset/cessation dates, and lengths of rainy season and cropping period (timing and length) using two different agro-meteorological criteria. The main objectives are to identify, statistically rate, update and document the magnitudes, signs and starting year of the major shifts (if any) found in the historical records of these rainfall components in order to update our state of knowledge of rainfall pattern in this region. This is also an agro-climatic approach that helps lay down a strong base for model validation and impact assessments on local rainfed agricultural systems in a multi-decadal time setting.

The paper is organized as follows. The physical background of the study area, the available station data and its sampling are described in section 2. Then the estimation of the rain-based parameters and the Student's–Fisher's tests scheme (SFS) used to assess the statistical significance of the changes are exposed in section 3. The noticeable evolutions of the rain-based factors over 1970–2008 are analyzed and an updated synopsis is provided in section 4. Concluding remarks and perspectives are given in section 5.

## 2 Study area and data availability

### 2.1 Physical background of the study area

Senegal is located in the extreme West of West Africa between latitudes 12°30–16°30 N and longitudes 11°30–17°30 W. The territory covers approximately 197, 000 km<sup>2</sup>. The topography of the country is free from steep terrain. Only a small portion of high elevation fields (altitude, >200 m above sea level) is found in the southeast border with Guinea. Shrub and tree steppes dominate the North, Savanna woodlands dominate the center and dense savanna and increasing forest are found toward the humid south (Moron et al. 2006). The atmosphere dynamic circulation over Senegal is influenced by the regional scale North/

North–East trade winds, the South/South-West humid flow called the monsoon and a minor maritime flux from the North Atlantic Ocean from the West. This flux keeps the coastal regions very humid and creates an East–West temperature gradient in the November–May dry season (Fall et al. 2006). The trade winds and the monsoon flux meet to form the continental inter-tropical convergence zone (ITCZ) which is the main evidence for the establishment of the rainy season in Senegal (Dieng et al. 2008). The large-scale dynamic factors modulating this zone of precipitation include the strength and position of the African Easterly Jet around 700–600 hPa, and Tropical Easterly Jet around the 250–100 hPa (Grist and Nicholson 2001; Nicholson 2009); African easterly waves with their associated low level deep convective vortices (Reed et al. 1977; Viltard and de Félice 1979; Diedhiou et al. 1999); and the less frequent equatorial Kelvin waves (Mounier et al. 2007; Janicot et al. 2008). The coexistence and interaction of these systems with others such as vegetation and soil types determine the dominating westward-moving convective meso-scale weather systems (Laurent et al. 1998; Gaye et al. 2005) recently addressed as disturbance lines (DLs) by Bell and Lamb (2006). Rainfall rate, associated to DLs imbedded in the large-scale atmospheric features, has an area average value around  $5 \text{ mm h}^{-1}$  (case of Dakar in 1993–1992 by Nzeukou and Sauvageot 2002). A Low spatial coherence is observed on daily mean intensity of rainfall which decreases northward from 19 to  $10 \text{ mm day}^{-1}$  according to Moron et al. (2006).

During summer period the monsoon availability influences temperature distribution which has an East–West rather than North–South gradient. The relative humidity decreases from south to north with a shallow drift towards the coastal regions. Clouds cover affects daily sunshine hours. However on the average sunshine hours are not below 6–7 h in the June–July–August (JAS) season from the North to the South (Fall et al. 2006). Considering its average rainy season length, mean temperature and land forms, Senegal falls within groups II, III, and AEZ5 classes of global Agro-Ecological zone according to the Food and Agriculture Organization (FAO 1978) and the TAC/CGIAR2 (1992)<sup>1</sup> criteria (see Sivakumar and Valentin (1997) for details on these classifications). These physical conditions are in favor of rainfed field crops such as millet, sorghum, maize, groundnut, cotton, and cowpea.

## 2.2 Data source and sampling

Observed daily rainfall data were collected from the Regional Centre for Improvement of Plants Adaptation to

Drought (*Centre Régional pour l'Amélioration de l'Adaptation à la Sécheresse* (CERAAS)). The data set includes rainfall records from the network of the National Meteorological Agency (*Agence Nationale de la Météorologie du Sénégal* (ANAMS)) and other raingauges managed by the Senegalese Institute for agricultural research (*Institut Sénégalais de la Recherche Agricole* (ISRA)), and by CERAAS for crop monitoring and forecasting. ANAMS, ISRA/CERAAS and the Laboratory for Atmospheric and Ocean Physics (*Laboratoire de Physique de l'Atmosphère et de l'Océan-Siméon Fongang*) collaborate in multidisciplinary working teams through the AMMA project in order to improve the local/regional understanding of atmospheric processes and the application of the acquired knowledge in the adaptation of the local and regional population to drought, climate variability and long-term climate changes (this issue). The data from synoptic, climatic, agro-climatic, and pluviometric stations are assessed for quality and consistency. This was achieved through checking for erroneous values (e.g., negative precipitation); and outliers such as those above (below) a threshold of daily mean  $\pm 3$  standard deviations (thresholds/limits are set in terms of standard deviations from the 1950–2008 daily mean following Easterling et al. 2003; New et al. 2006). The generation of data plots enabled visual inspection. The local meteorological knowledge and experience was used in assessing outliers mostly caused by data entry typesetting errors. Considering the low density of raingauges (especially in the Central–East) and the spatial heterogeneity of daily rainfall, it is not recommended to interpolate the daily data when records are missing. Therefore, only the longest homogeneous time series, common to 83 sites (31 from 1950 to 2008 and 52 from 1987 to 2008) are retained for these analyses. The 1950–2008 station records are used in the combined Student's–Fisher's tests scheme (section 3). The 1987–2008 period of the 52 additional sites is used as back-up data to provide a space-time updates of estimated rain-based factors over Senegal (see section 4). Table 1 shows the number of sites per reference zone and the available daily rainfall records. The locations of the 83 selected sites are shown on Fig. 1. These rainfall recording stations/raingauges are unevenly distributed over the country, with the higher density found in Central–West part of Senegal, opposite to the Central–East agro-pastoral region (known as the “*Ferlo*” region).

Senegal has a relatively small land cover with stronger North–South (N–S) rainfall gradient (Fall et al. 2006; Dieng et al. 2008; Salack 2007) than the East–West (E–W) gradients seen on the Sahel at large (Lebel and Ali 2009). Sampling small sub-region with well distributed sites, for analysis of the average rainfall characteristics, can give a good image of what can be detected over the larger Western Sahel window. In the last 30 years (1979–2008), the mean

<sup>1</sup> The Technical Advisory Committee of the Consultative Group on International Agricultural Research

**Table 1** Daily rainfall times series and number of sites per reference zone as used in the study

Agro-climatic zone	1950–2008	1987–2008	Total
Northern zone	10	19	29
Central North zone	09	13	22
Central South zone	07	11	18
Southern zone	05	08	13
Grand total	31 <sup>a</sup>	52 <sup>b</sup>	83

<sup>a</sup> Used in the statistical significance check-up

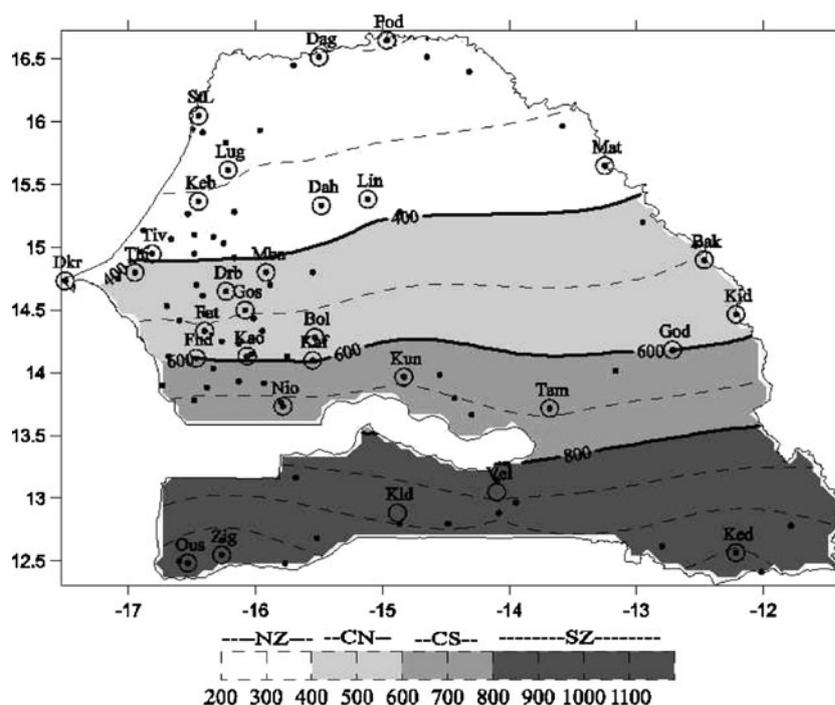
<sup>b</sup> Used as back-up data to update the rainfall regime

annual rainfall ranges from ~1,200 mm in the South to 200 mm in the North (Fig. 1). According to Moron et al. (2006), spatial coherence of interannual anomalies across stations is much stronger for seasonal rainfall amount and daily occurrence frequency. But each station conveys almost independent information on the daily mean intensity. This suggests a multi-site approach to the analysis of rainfall and rainfall related agro-climatic factors, in order to reduce the uncertainties due to high spatial gradient. For this study, the country was divided into four reference zones following an annual rainfall latitudes and agricultural features criterion rather than geo-references (Longitude x Latitude coordinates). On Fig. 1, the white, light grey, grey, and black color bands stand for the Northern Zone (NZ), Central North Zone (CN), Central South zone (CS), and Southern zone (SZ), respectively. The NZ is the area above the 400 mm isohyet extending up to 200 mm isohyets. In this zone rainfed agriculture is technically not possible

every year due to rainfall deficits. The CN and the CS are confined between the 400–600 mm and 600–800 mm isohyets, respectively. They globally cover the well-known “Groundnut Basin”, an area of high groundnut, millet, sorghum, and cowpea productivity. The SZ is south of the 800 mm isohyet. It has a more secured rainfed agriculture that uses cotton, maize and long lived cultivars including rice and Sanyo. This is the only zone in which E–W rainfall variability is also important. For example at Oussoye (Ous), Ziguinchor (Zig) further South-West, annual average rainfall is above 1,100 mm over the 1979–2008 period as compared with Kold, Velingara Casamance (Vel Cas) where annual records are below 1,000 mm.

These rainfall latitudes are relatively thin bands having a ~200–300 mm/annum intra-zonal gradient. Therefore, a well-spread site sampling along the longitude (as seen on Fig. 1) can help capture the spatial rainfall variability within each reference zone (sub-region, henceforth). The present agro-climatic zonation is very close to the natural zones of the country (Moron et al. 2006). Although this method of zonation is not sufficient for assign crop potentials as a general approach according to Sivakumar and Valentin (1997). But in the specific case of Senegal an ensemble of background factors is in favor of this approach. Most of these background factors are physical, as already stated (section 2.1) and others are related to the rain regime itself: (a) spatial coherence of rainfall at the seasonal time scale shown by previous studies (e.g., Moron et al. 2006); (b) the seasonal average potential evapotranspiration rate is approximately 5–7 mm day<sup>-1</sup> in JAS (Salack et al. personal communication, 2009a, 2009b). As a result, the average

**Fig. 1** Stations location, rainfall climatology, and reference rainfall zones. The circles identify the sites with longer daily records (1950–2008) and full dots are the set of sites with 1987–2008 daily records. The Isohyets are based on the 1979–2008 period (dashed lines) and the main rain bands represent the reference agro-climatic zones. The white, light grey, grey, and black color bands stand for the Northern zone (NZ), Central North zone (CN), Central South zone (CS), and Southern zone (SZ) respectively



ratio of 10-day rainfall to the potential evapotranspiration is hardly less than the threshold for crop water satisfaction, i.e., 0.33 (Cochemé and Franquin 1967); (c) All short term isohyets mapped for the country (set of maps issued before this analyses are done) have shown no major spatial shifts on the main period of interest (1970–2008). For example, maps of mean annual rainfall were issued for 1970–2008, 1970–1989, 1979–2008, 1961–1990, 1991–2008, and 2000–2008. Their inter-comparison did not show major spatial drift of isohyets. However there is a clear southward drift of the 1950–1969 isohyets compared with the recent years within the 1970–2008 time interval.

### 2.3 Determination of rain-based parameters

#### 2.3.1 Rain days and amount

The rainfall total needed for a day to be classified as a rainy day (RR) is fundamental to determine the dates of onset of rainy season, cessation, and dry spells (Stern et al. 2006; Segele and Lamb 2005). The amount used has been in the range greater or equal to 1.0 mm/day, in agricultural applications (Sivakumar 1992). This threshold is also used here to define a RR. The seasonal total number of rainy days (RD), the number of RR records  $\leq 10$  mm day<sup>-1</sup> (RD10), the number of RR records  $\geq 50$  mm day<sup>-1</sup> (RD50) and other thresholds are extracted on yearly basis from the first to the last record in the time series (they include  $10 < RR \leq 20$ ,  $20 < RR \leq 30$ ,  $30 < RR \leq 40$ , and  $40 < RR < 50$ ). Our interest in knowing their spatial distribution and historical patterns is indeed agronomic, but also resides in the fact that the frequency of extreme events has increased in some parts of West Africa (News et al. 2006) and may become severe in the nearest future climate according to the IPCC (2007) report. Likewise, the recurring flood events from the late 1990s (Sene and Ozer 2002) until nowadays draw our attention towards soil erosion and crop devastation. The seasonal cycle of rainfall is studied using a 5-day cumulated rainfall following Dieng et al. (2008). The annual total rainfall (AR) and 10-day (5-day) seasonal cumulated rainfall (DR) are computed by simple arithmetic summing of daily RR irrespective of threshold value. The values of AR, DR, 5-day, RD, RD10, RD50, and other classes of rainfall amounts from individual sites are area averaged to define the areal values (AAV) for each reference sub-region (cf. NZ, CN, CS, and SZ). The analyses are carried out with more emphasis on the rainy season period discussed below.

#### 2.3.2 Onsets/cessation and seasons' lengths

The onset of the monsoon system over West Africa and precipitation regime in Senegal are linked to the northward migration of the ITCZ and the associated westward-moving

disturbance lines (DL) during summer time (Sultan et al. 2005; Bell and Lamb 2006; Nicholson 2009; Fall et al. 2006; Dieng et al. 2008). On the average, the rainy season lasts from May to October. It begins in the South/South–East and spreads north in conjunction with the latitudinal migration of the ITCZ, bringing monsoonal moisture from the Gulf of Guinea; 99% of the seasonal rainfall total is found in this 6-month intra-seasonal period with 30–42% of the rainfall amount are recorded in the only month of August. Potential onset/cessation dates are bound to this period of the year (Gueye and Sivakumar 1992; Camberlin and Diop 2003).

Two agro-meteorological criteria are used to determine onset and cessation dates. The first method was established from empirical study on millet at the International Crop Research Institute for Semi-Arid Tropics for some Sudanian and Sahelian stations. It was applied to a large part of the Senegal, Niger, Mali, Burkina Faso rainfall networks (Sivakumar 1988, 1992; Gueye and Sivakumar 1992; Ozer et al. 2005; Balme et al. 2004 among others). With this method, the sowing date (CS<sub>a</sub>) is that date after 01 May when rainfall cumulated over 3 consecutive days is at least 20 mm and when dry spell, within the following 30 days, does not exceed 7 days. The cessation date (CE) is the day after the 01 of September when no rainfall is recorded for 20 consecutive days. It is a site-by-site approach that associates water availability and stress factors such as dry spell, classically known as the “*Sivakumar method*”. In this study, this method is referred to as the “*Successful Sowing Date*”. The cropping season (CL<sub>a</sub>) is computed by subtracting CS<sub>a</sub> from CE. The second is also a classical rainfall-based criterion used by the Famine and Early Warning System (FEWS) given in AGRHYMET (1996) and also used by Hachigonta et al. (2008) for maize applications in Zambia. The first dekad (10-day period) should have a total rainfall of 25 mm and this should be followed by two dekads with a total of at least 20 mm of rain. The onset date is then taken as the first day of the first dekad. The CE of this method is taken as the same as in the *Sivakumar method*. This method (*Agrhymet-FEWS method*) exhibits a strong spatial coherence of rainfall occurrence per zone (Salack et al. personal communication, 2009a). Henceforth, it is taken as the method of “*Onset of Rainy Season*” (CS<sub>b</sub>). The length of rainy season (CL<sub>b</sub>) is obtained by subtracting CE from CS<sub>b</sub>. The quality of CL<sub>b</sub> is more or less dependent on the intra-seasonal distribution of dry spells as discussed in the next subsection.

#### 2.3.3 Dry spells

Dry spells (DSs) are the dominating adverse factors affecting crops development and production in the intra-seasonal time scale. They may occur at the vegetative or

reproductive phase of crops leading to a tremendous loss in the seasonal yield of millet, sorghum, maize and groundnut the basic food and cash crops.

A preliminary task, when looking at DS, is to define a “*dry day*”. In this analysis a day is considered DD at site level, when the daily rainfall amount is less than 1 mm. The sum of consecutive *dry days* between two rainy days is referred to as a DS or dry episode (Sivakumar 1992; Lanà et al. 2008; Salack et al. personal communication, 2009b). The number of DSs, at individual sites is estimated from the onset of the CS<sub>b</sub> to the CE. All DS types found are classified in ascending order, according to their frequency of occurrence and potential threats they cause to rainfed millet, sorghum and maize. The 1–7 days (DS1) class is the short category. It has the highest average seasonal frequency of occurrence and contains about 60% of 1–3 days sub-class (Sane et al. 2008; Salack et al. 2009b). The distribution of DS1 is a proxy to rainfall occurrence especially in the northern regions, because it is correlated to high frequency of rainfall events. The class of DS1 is followed by the 8–14 days category (DS2). This is the medium type of DS in this region. 15–21 days (DS3) and more than 21 days (DS4), make the third and fourth categories respectively. They are the main sources of water stress to rainfed crops. The seasonal mean frequency of each category of DS, at individual sites, is area averaged to obtain the sub-regional values for each zone (cf. NZ, CN, CS, and SZ zones).

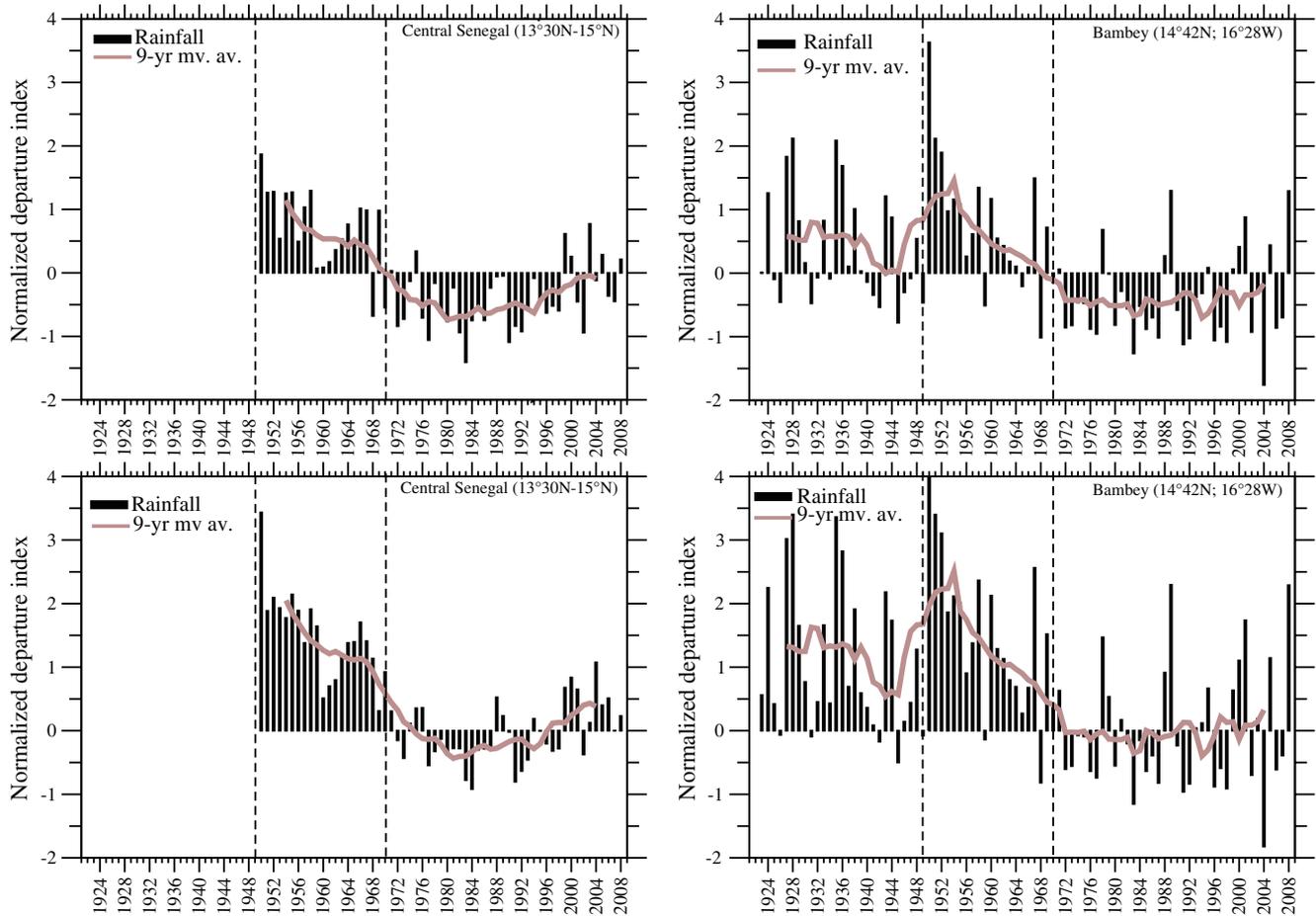
### 3 Statistical algorithm for magnitude, sign and start of observed changes

What is the most pertinent scale to consider for an agro-climatic investigation of changes: individual station data (local) or AAV? Figure 2 illustrates the seamless discrepancy that usually appears in issues related to rainfall analyses. A standardized precipitation anomaly index (SPI) is computed with respect to the 1950–2008 period (upper panels) and 1979–2008 (lower panels) for Central Senegal (including both central north and central south reference zones) and Bambey (a site in the local network). Looking at the 9-year moving average centered on the 5th (grey thick line), there are different perceptions of the recovery at local and sub-regional scales. This is imputable to the sensitivity of the SPI to both the number of stations used to compute it, their locations and the reference period considered (Ali and Lebel 2009). Although, many versions of the SPI were given and extensively used to describe rainfall (Nicholson 1983; Katz and Glantz 1986; Dai et al. 2004; Ali and Lebel 2009), none of them can alone describe the rainfall pattern of the Sahel (Moron et al. 2006). Nevertheless, Fig. 2 helps show that the characteristics of the rainfall anomalies depend on both time and space

scales. Are there abrupt and significant changes in the rainfall regime? What are their magnitudes and time of start? What are the scale issues related to these changes? Do they concern other features of the rainy season that influence agriculture? To answer these questions, the SPI can only be an indicator and more often climate impact assessment studies use raw station data (rainfall, temperature, etc.) rather than the SPI. It is, therefore, necessary to assess the internal structure of the true values of both local (individual sites) and AAV of smaller areas that could be considered climatologically homogenous using statistical tests (Sene and Ozer 2002). The following statistical assessments are based on the site sampling and zonation discussed in section 2.2.

We use a scheme that combines the Fisher Snedecor ( $F$  test) for variability, the Student’s ( $t$  test) for trend detection and a simple relative percent difference estimate for magnitude and sign (Student’s–Fisher’s tests scheme or SFS, henceforth) on station/raingauge data (Local) and zonal AAV. The scheme was applied on the annual and 10-day cumulated rainfall (AR and DR), the total number of rainy days (RD), the number of daily rain records  $\leq 10$  and  $\geq 50$  mm (RD10 and RD50), dates of onsets of seasons (CS<sub>a</sub> and CS<sub>b</sub>), CE, the cropping period durations (CL<sub>a</sub> and CL<sub>b</sub>), and the annual frequency of the four categories of dry spell (DS1, DS2, DS3, and DS4) as defined earlier. Previous studies of this type used the Pettit test and focused only on rainfall amount (Ozer et al. 2003; Ozer et al. 2005). However it has been demonstrated by Yue and Pilon (2004) that the Student’s  $t$  test has the highest power in trend detection as compared with other tests. This same parametric test was used by Bell and Lamb (2006) to investigate the significance of the inter-decadal differences of rainfall amount over the 1950–1987. Lebel and Ali (2009) also used it to investigate the level of significance of the difference between the Western and Eastern Sahel rainfall index. Details on these tests and their application in meteorology and hydrology can be taken from Der Megreditchian (1992) and Hirsch et al. (1993). We use the word “change” in this study for any 11–38 years trend that is statistically rated as significant by the SFS.

The pre-requisites in the use of the SFS are described in the following ways. The 1950–2008 period is subjected to the Lilliefors test for normality, which is a modification of the Kolmogorov–Smirnov test of goodness of fit (Lilliefors 1967; Abdi and Molin 2007). Where the normality test is not accepted, the Box–Cox (1964) method of normalization is used. An example of the results of this test is given in Table 2. Then the sample is fragmented into three sub-periods (P1, P2, and P3, respectively). The 1950–1969 period (P1), which appears uniformly humid (i.e., positive anomalies, see Fig. 2) all over the 31 sites, is separated from the 1970–2008 period. It is also defined as



**Fig. 2** Area average (Central Senegal) and local (Bambeey) standardized precipitation anomalies index (SPI according to Katz and Glantz 1986; Moron et al. 2006) relative to 50–2008 mean (top panels) and

1979–2008 mean (bottom panels). The vertical dash lines define the humid period of reference 1950–1969

humid in other parts of the Sahel according to Lebel and Ali (2009). P1 stands for the *standard* period. The two other sub-periods P2 and P3 are found by means of a systematic checkup for statistical significance over 1970–2008.

From the assumption that the limits of P2 and P3 are not known over 1970–2008. We therefore consider two indepen-

dent intervals  $P_{sty}$  and  $P_{sty-1}$ . The interval  $P_{sty}$ =[starting year (STY), 2008] (with a mean  $\bar{P}_{sty}$  a variance  $\sigma_{sty}^2$  and length  $n_1$ ) is compared with  $P_{sty-1}$ =[1970, (STY-1)] (with a mean  $\bar{P}_{sty-1}$  variance  $\sigma_{sty-1}^2$  and length  $n_2$ ). The value STY (STY-1) is the upper (lower) bound of the interval, denoting the starting (ending) year of  $P_{sty}$  ( $P_{sty-1}$ ). We continue the

**Table 2** Some results of the Lilliefors test for normality ( $\alpha=5\%$ ) of the 1950–2008 time series

Parameter	Northern zone		Central North zone		Central South zone		Southern zone	
	D	p value	D	p value	D	p value	D	p value
Rain	0.11	0.73	0.17	0.22	0.16	0.29	0.16	0.26
Rainy days	0.09	0.89	0.10	0.87	0.09	0.90	0.06	0.99
Onset/rainy seas	0.09	0.91	0.08	0.95	0.11	0.76	0.12	0.64
Sowing date	0.07	0.98	0.10	0.88	0.10	0.86	0.11	0.68
Length of seas	0.14	0.45	0.13	0.53	0.11	0.76	0.11	0.72
Cropping seas	0.10	0.87	0.14	0.44	0.11	0.72	0.14	0.39
Cessation date	0.15	0.36	0.21	0.07	0.18	0.17	0.25	0.02 <sup>a</sup>
Short dry spells (1–7 days)	0.08	0.95	0.12	0.65	0.09	0.90	0.08	0.95

<sup>a</sup> normalized parameter using Box-Cox (1964) method

comparison by increasing (decreasing) STY by 1 over 1988–1999. But, is the interannual variability between  $P_{\text{sty}}$  and  $P_{\text{sty}-1}$  homogeneous? The reason for this question is that statistical analyses on raw climate data can overwhelm substantial variability within mean term scale (Ward 1998). In order to answer this question, we use a bilateral  $F$  test under the hypothesis that it is an alternative and strong complementary condition to a bilateral  $t$  test. The aim of this approach is to explicitly rate the internal homogeneity of variances of the two independent sub-periods (cf.  $P_{\text{sty}}$  and  $P_{\text{sty}-1}$ ) prior to trend detection in each comparison. The null hypothesis of the  $F$  test is input to the null hypothesis of the homoscedastic Student's  $t$  test on local and AAV. This condition is only relaxed for local values where the null hypothesis of the  $F$  test is not *accepted* (i.e., sample variances not equal). In such case, an unequal variances  $t$  test is applied.

The SFS works in the following steps. On the first, it tests the equality of variances  $\sigma_{\text{sty}}^2$  and  $\sigma_{\text{sty}-1}^2$  using the  $F$  test (ratio of  $\sigma_{\text{sty}}^2$  to  $\sigma_{\text{sty}-1}^2$ ) as stated earlier. The success of this test implies, hypothetically, that the interannual variability between periods  $P_{\text{sty}}$  and  $P_{\text{sty}-1}$  can be assumed homogeneous. On the second step, if the hypothesis of equal variances is accepted at a 95% confidence level, the scheme compares the mean value  $\bar{P}_{\text{sty}}$  to  $\bar{P}_{\text{sty}-1}$  using a bilateral  $t_{\text{sty}}$  (Equation 1).

$$t_{\text{sty}} = \frac{\bar{P}_{\text{sty}} - \bar{P}_{\text{sty}-1}}{\sqrt{\frac{\sum_{j=0}^{n_1-1} (P_{\text{sty}} - \bar{P}_{\text{sty}})^2 + \sum_{j=0}^{n_2-1} (P_{\text{sty}-1} - \bar{P}_{\text{sty}-1})^2}{n_1 + n_2 - 2}} \cdot \left( \frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)} \quad (1)$$

The SFS compares systematically the samples  $P_{\text{sty}}$  and  $P_{\text{sty}-1}$  through their variances and mean values by sequentially varying STY from 1988 to 1999. Each time the two sample periods remain independent. The degrees of freedom (d1 and d2) of the  $F$  test vary in opposite sense and the degree of freedom of the bilateral  $t$  test is always constant ( $df=37$ ). An output of the scheme is a probability value  $p_{\text{sty}}$  ( $T \leq t$ ) associated to the  $t_{\text{sty}}$  statistics. The difference of the sub-periods  $P_{\text{sty}}$  and  $P_{\text{sty}-1}$  is significant, if  $p_{\text{sty}} \leq 0.05$  ( $\alpha=5\%$ ). When a significant probability is achieved, the scheme computes the corresponding relative percent difference (RPD<sub>sty</sub>) (Eq. 2).

$$\text{RPD}_{\text{sty}} = \left( \frac{\bar{P}_{\text{sty}} - \bar{P}_{\text{sty}-1}}{\bar{P}_{\text{sty}-1}} \right) \times 100 \quad (2)$$

This is a quantitative indicator of the difference between the two means resulting from the tendency. Dividing the difference by  $\bar{P}_{\text{sty}-1}$  insures that the rate of change in the recent period is weighted with respect to the previous period. The magnitude and the sign of the changes are given by the RPD<sub>sty</sub>. The absolute value of the RPD<sub>sty</sub> is the magnitude and its negative or positive sign denotes the increase or decrease of the observed changes at each significant

probability. If no significant probability is found at the end of the diagnostic period (1988–1999) then RPD<sub>sty</sub> is not available (NA). Alternatively, RPD is computed instead by comparing 1970–2008 to 1950–1969 period using the same Eq. 2. A STY is considered as a change point i.e. the starting year of significant change, if and only if the  $p$  value of the period starting from that year is significantly different from the previous period and the significance persists till the end of the statistical check-up. At each STY, the scheme also computes the proportion of significant  $p$  values at local scale. This is given as the fraction of the number of  $p$  values  $\leq 0.05$  at individual sites to the total number of the sites in the zone. This ratio ( $p_{\text{local}}$ ) is seen here as the empirical relationship between the large (sub-regional) and small (local) scales.

Some sensitivity assessments are also included in the SFS to account for the effect of local variability on the AAV. For example, if the  $F$  test is *rejected* at a site (i.e., null hypothesis is not accepted), the values of the rain-based factor of that site are removed from the AAV. Another AAV is computed and tested. Afterward, if the second results of the SFS on the AAV are still unaffected (especially if the statistical significance is unchanged) then this case is considered as a trivial internal variability inherent to that particular site. At such site, the unequal variance  $t$  test is used to rate the local trend. This situation is only encountered at particular sites such as Dakar (for its land-ocean interface), Kaffrine, and Boulel (transition sites between the CN and the CS). The total statistical parameters resulting from the whole process of the Student's–Fisher's tests scheme include: the STY, the fraction or ratio of  $p_{\text{sty}}$  at local and the  $p$  values of zonal scales ( $p_{\text{local}}$  and  $p_{\text{AAV}}$  respectively), the relative differences (RPD<sub>sty</sub> or RPD). The results of this statistical assessments are discussed in the section below.

#### 4 Is there any noticeable evolution of the rain-based agro-climatic factors from 1970 to 2008?

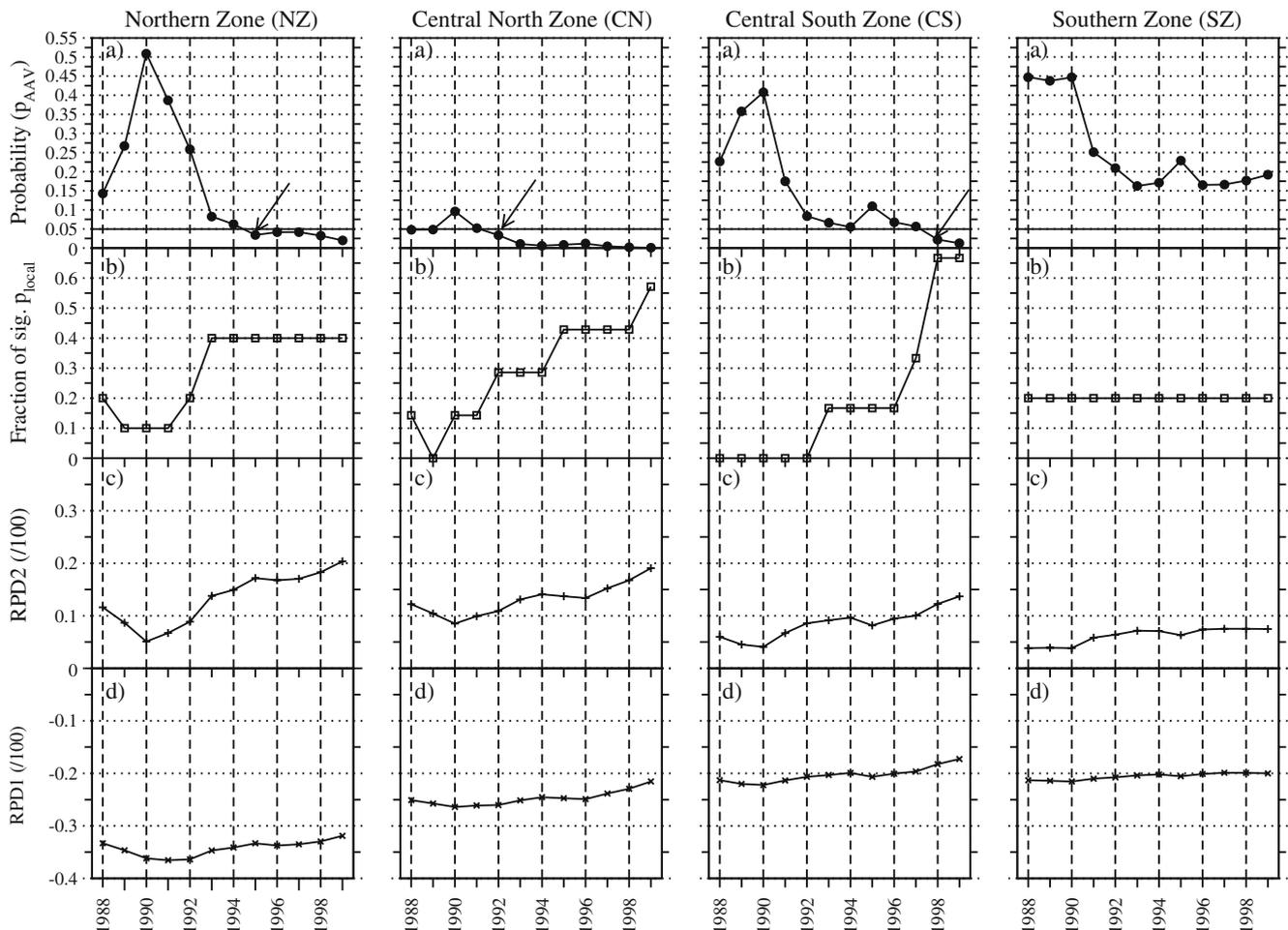
##### 4.1 Rainfall amounts

The evolution of the interannual rainfall total (AR) has been debated over time. Especially the issue of recovery or no recovery has been a subject of controversy between groups of authors (L'Hôte et al. 2002 and Ozer et al. 2003). Later, supporting arguments of *modest* recovery were given by Nicholson (2005) and Bell and Lamb (2006). Following the recent findings over the larger domain of the Western Sahel on this issue (Ali and Lebel 2009; Lebel and Ali 2009), details about Senegal are hereby provided. This is a contribution to complement the previous studies and update our state of knowledge about the pattern of rainfall amounts in this part of the Sahel.

Figure 3 is an example of the results from the aforementioned Student's–Fisher's tests scheme, applied for significance check-up between the years 1988 to 1999 on AR. The evolution patterns of AR are unevenly distributed over Senegal. In the northern zone (NZ), the AAV results show that the test is significant starting from 1995. In the central north zone (CN) significant test is found from 1992 and in the Central South zone (CS) from 1998 (ensemble Fig. 3a). This statistical characteristic persisted over the following years till the end of the diagnostics. At local scale, about 2:5 (40%) sites reported significant probability ( $p_{local}$ ) in the NZ, but the STYs are different. Hence at Kebemer the STY is 1988, at Matam it is 1992, at Podor and Saint-Louis it is 1993 (Table 4). From 1992 in the CN, only a ratio of 1:3 (33%) sites reported significant tests. The persistent significance of  $p_{AAV}$ , up to 1999, is followed by an increasing proportion of significant  $p_{local}$  from 40% to 60%. This means that more than half of

the observation network in the zone is affected (Fig. 3b). Exceptionally, stations such as Bakel and Boulel showed significant probabilities as early as 1988 persistently. From 1998, the CS shows significant  $p_{AAV}$ . This is followed by a ratio of 2:3 (65%) significant local probabilities ( $p_{local}$ ) (Fig. 3c). The sites at which the change points (the starting years) were found earlier than 1998 include Foundougne (1995), Kaffrine and Niore Du Rip (1997). In the SZ, no significant  $p_{AAV}$  was reported by the Student's–Fisher's tests scheme. However, at local scale Kolda reported significant probabilities since 1988 and Zig from 1997. This corresponds to 22% of the local network (Fig. 3d).

From the above analysis, we can say that the forenamed STYs mark the beginning of noticeable recovery of the annual total rainfall amount (AR) at local and sub-regional scales. The recovery is persistent throughout the years after 1990. This is particularly observed in the regions which annual records are less than 800 mm/year (CS, CN, and



**Fig. 3** Results of the Student's–Fisher's tests scheme for annual rainfall amount. **a** Probability of area average values ( $p_{AAV}$ ); **b** fraction of significant probability at local scale ( $p_{local}$ ); **c** relative difference between the recovery period and the previous dry period ( $RPD2$ ); **d** relative difference between the recovery period and the humid 1950–

1969 period ( $RPD1$ ) at each sub-region in Senegal. Error of the first type,  $\alpha$ , is indicated by the bottom line on the **a** line figures (top panel). Periods of significant probability are indicated by the arrow. They mark the starting year of the recovery period

NZ). These sub-regions are under the classical umbrella of Sudan–Sahel and Sahel regions of the country. Although, the zonal AAV did not markedly show abrupt shift for the SZ sub-region. This can be justified by the small number of stations used in the check-up (five sites). It is a potential source of uncertainty in the results for the sub-region. Although these sites are well spread to capture the spatial variability in the zone, the computation of the AAV for SZ may be influenced by individual site differences. For instance exceptional local cases are found for Kolda and Ziguinchor (Table 3).

The percent differences between the recovery period and the humid 1950–1969 period (RPD1), and the dry period (RPD2) also vary per zone (see the ensemble Fig. 3b). From the starting years, the signs of the changes are all negative for RPD1 (P1 vs P3) and positive for RPD2 (P2 vs P3, Fig. 3d). In the NZ zone the rate of the significant changes over the last period (1995–2008) is +17%. In the CN zone the rate of the significant changes observed over 1992–2008 is +10%. In the CS the rate of the significant changes observed over the 1998–2008 period is +12%. The magnitudes are still increasing towards the beginning of the 2000 s. These positive changes are found with respect to the dry periods, on the area average values (sub-regional scales), and they are statistically significant. They are rated as significant recovery. At local scale, the rates are higher in magnitude (+16 to +32%). This is detailed on Table 3. Sometime, the relatively small perceptions of the changes on the areal values hide greater cases at some individual sites. Therefore aggregated or area average values tend to hide important local patterns (Baron et al. 2005). On the other hand, we can say that short term changes, which absolute value is less than 10%, are not significant. This was the case of all other local and AAV which  $RDP_{sty}$  are not associated with significant probabilities in the SFS. Countrywide updated details of this type may not be found in the literature for Senegal. But the general argument of

local recovery of rainfall amount (AR) is, hereby, supported and evidence is established. Similar results were also given by Ozer et al. (2003). Even though actual AR values are below the 1950–1969 period's as already pointed out by Lebel and Ali (2009), the magnitude of some local changes exceeds both the humid and dry years. Other results of this type were found by New et al. (2006) at other locations in West Africa and Frappart et al. (2009) for the Gourma region in the Central Sahel. In the recovery time interval, the intra-seasonal 10-day (dekad) cumulated rainfall (DR) shows higher peaks. From the 1st dekad of August (DR21) to the 2nd of September (DR26) DR outweighs the previous dry period in the NZ, CN, and CS zones. The difference between their means is statistically significant according to a classical *t test*. However, average DR is lower than that of humid period, P1 (1950–1969) in the NZ and approximately equal to it in the CN and CS. In the SZ, the average of DR, is not statistically different from the dry period but the single peak value of DR22 (2nd dekad of August) is equal that of P1. This implies that the maximum rainfall amount is observed in the 2nd dekad of August (not shown).

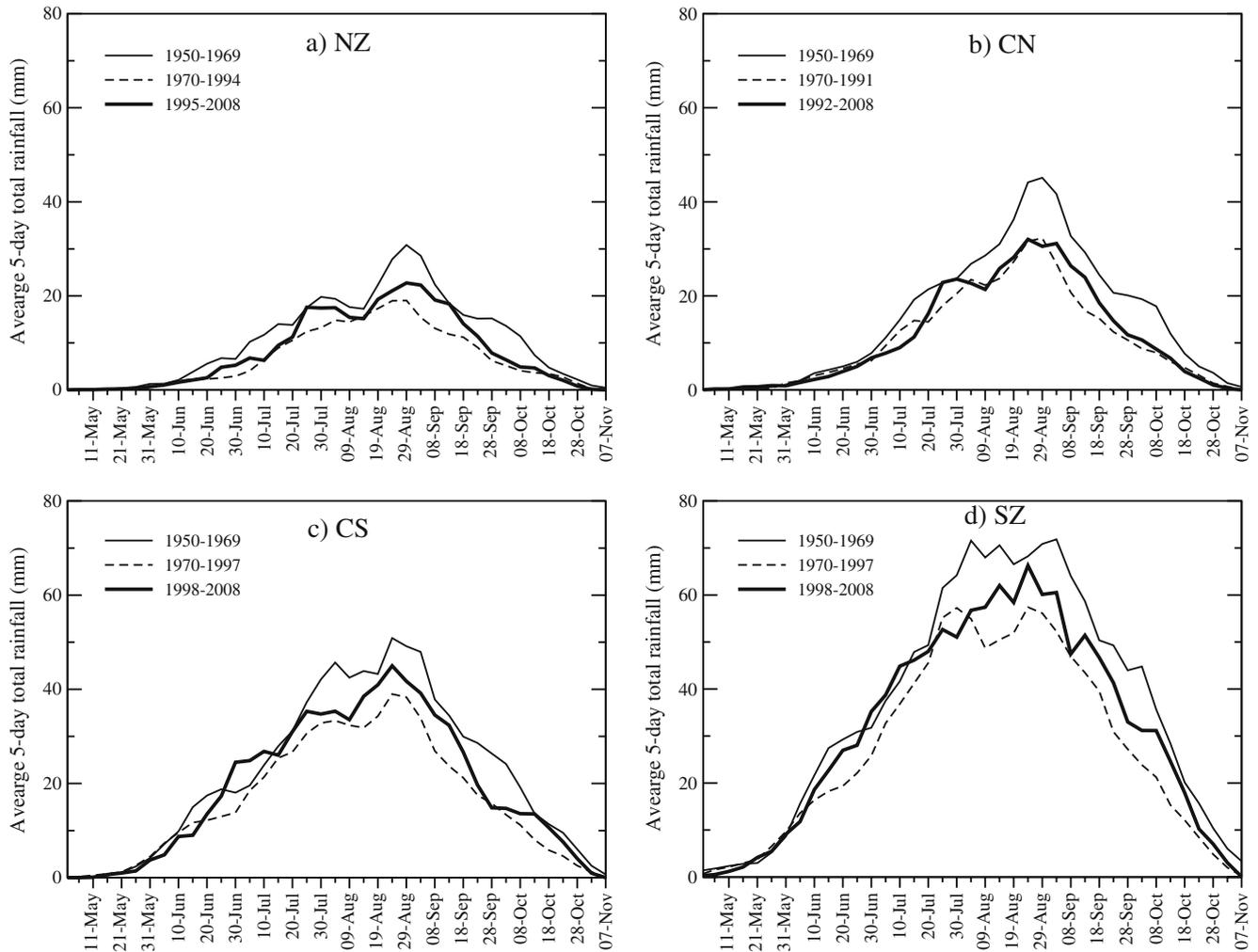
To describe the seasonal cycles of rainfall, the 5-day cumulated rainfall of individual sites in each zone (10, 09, 07, and 05 sites in NZ, CN, CS, and SZ respectively) was area averaged and smoothed (3-point centered running mean) for each reference period. The smoothed signals are presented on Fig. 4 to depict the differences in between the zonal areal signals and the difference in between the reference periods over Senegal (cf. P1, P2, and P3). As for the seasonal cycle of 5-day rainfall (just like the 10-day rainfall), two opinions are to be made. In the Sudan and Sahel regions of the country (where annual total rainfall is less than 800 mm), the description is similar to that given by Lebel and Ali (2009) for the Sahel as depicted by Fig. 4a–c. The first break (appearing as a plateau on the graphs) around 10 July corresponds to the monsoon jump

**Table 3** Output of the Student's–Fisher's tests scheme on total rainfall amount (1950–2008)

Sub-region	STY on AAV	AAV RPD1 (%)	AAV RPD2 (%)	AAV RPD <sup>a</sup> (70-08/50-69) (%)	Ratio of sig. $p_{local}$	Significantly affected sites (STY, RPD1, and RPD2)
NZ	1995	–32	+17	NA	2:5	Keb (1988, –29 and +28); Mat (1992, –22 and +26) Pod and StL (1993, –20 and +32)
CN	1992	–25	+10	NA	1:3	Bak and Bol (1988, –17 and +23)
CS	1998	–19	+12	NA	2:3	Kaf and NiR (1997, –16 and +16); Fnd (1995, –21 and +22)
SZ	NA	NA	NA	–23	2:9	Kld (1988, –23 and +5) Zig (1997, –16 and +16)

STY starting year of recovery, AAV area average value, NZ Northern zone, CN Central North, CS Central South, SZ Southern zone

<sup>a</sup> STY is not available (NA), and the RPD is statistically significant



**Fig. 4** A three-pt centered running mean of the average 5-day cumulated rainfall per zone over Senegal. An inter-comparison of the major periods and the reference zones. The peak of the rainy season

experiences most of the increase in 5-day cumulated rainfall. The monsoon breaks (Sultan and Janicot 2004; Dieng et al. 2008) are clearly shown by the NZ, CN, and CS zones

(Sultan and Janicot 2004). The second break seen around 9 August is referred to as the monsoon dry spell (Dieng et al. 2008). It is a period of reduced rainfall intensity preceding the active phase of the monsoon in these regions. These two breaks are well pronounced in the recent recovery period. However, in the extreme south (SZ) where annual rainfall is above 800 mm (north Guinean rainfall-type regions of the country), the timing of the 5-day rainfall is as early May and lasts up to early November (Fig. 4d). The breaks (the monsoon jump and the monsoon dry spells) are missing in the last decade (1998–2008) just like in the humid period (1950–1969). Only a break in the early August is found in the 1970–1997 period (dry period). Although in this zone, no statistically significant change was found on areal rainfall values but the weak or absence of the major break of July is a key point to notify. The monsoon jump is very weak or quasi-inexistent in the extreme southern part of the country. This is justified by the fact that in summer, the

settlement of the monsoon flux over Senegal starts from the SZ sub-region with a South/South–East progression toward the north of the country and majority of the meso-scale convective systems responsible for rainfall in the sub-region originate from the Fouta-Djalon mountains further south in the Guinean country.

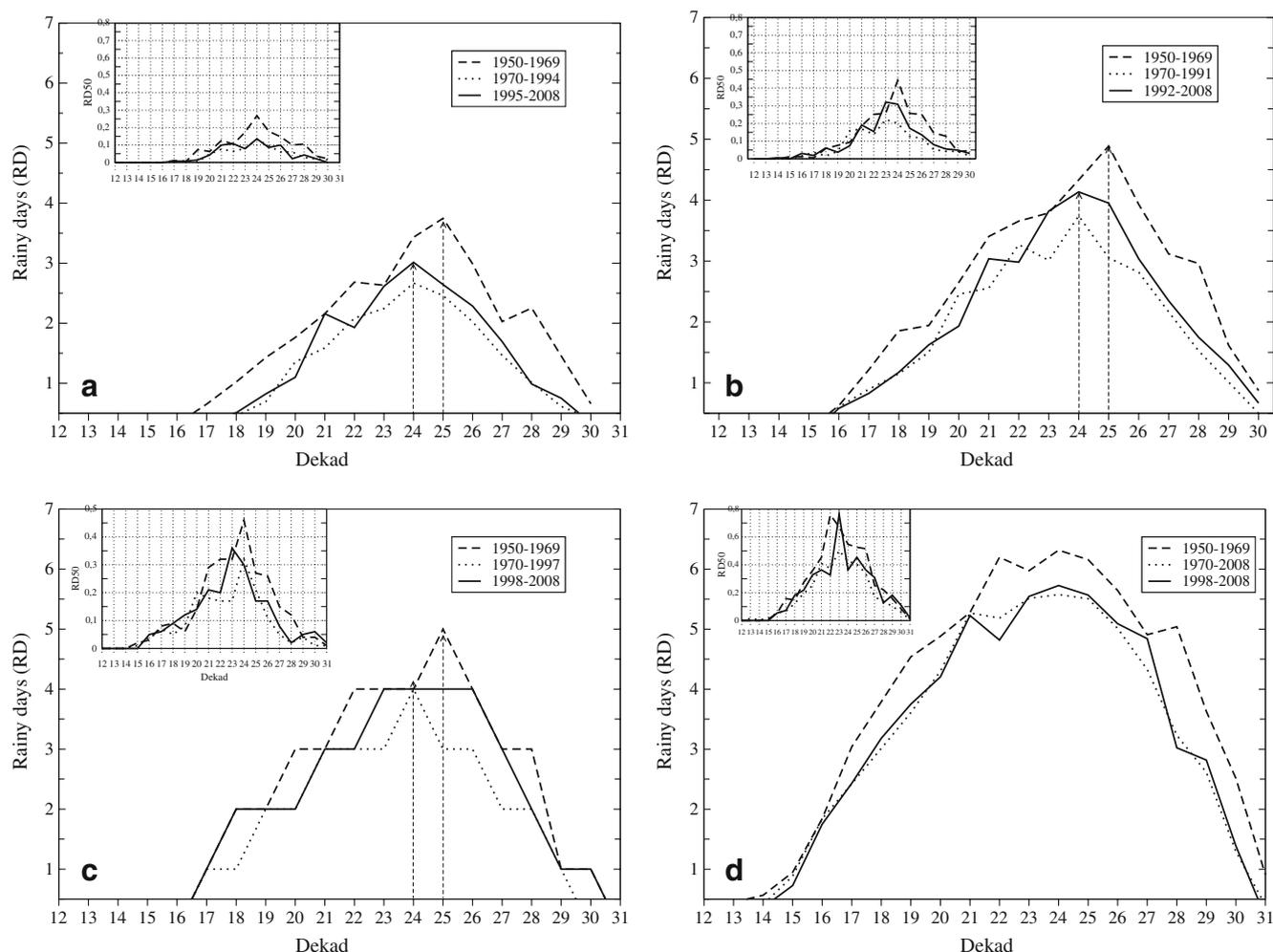
#### 4.2 Rainy days and dry spells

Particular results found on the number of rainy days (RD), the number of rain days of 50 mm or more (RD50) and dry spells DS1 are summarized in Table 5. Significant probabilities are also unevenly observed in the NZ, CN and the CS sub-regions. The periods usually include the sub-periods in which AR has shown some recovery. RPD1 is decreasing and RPD2 is increasing from the first year of recovery (STY) to the end of statistical checkup. The increase of RD with respect to the dry period shown by

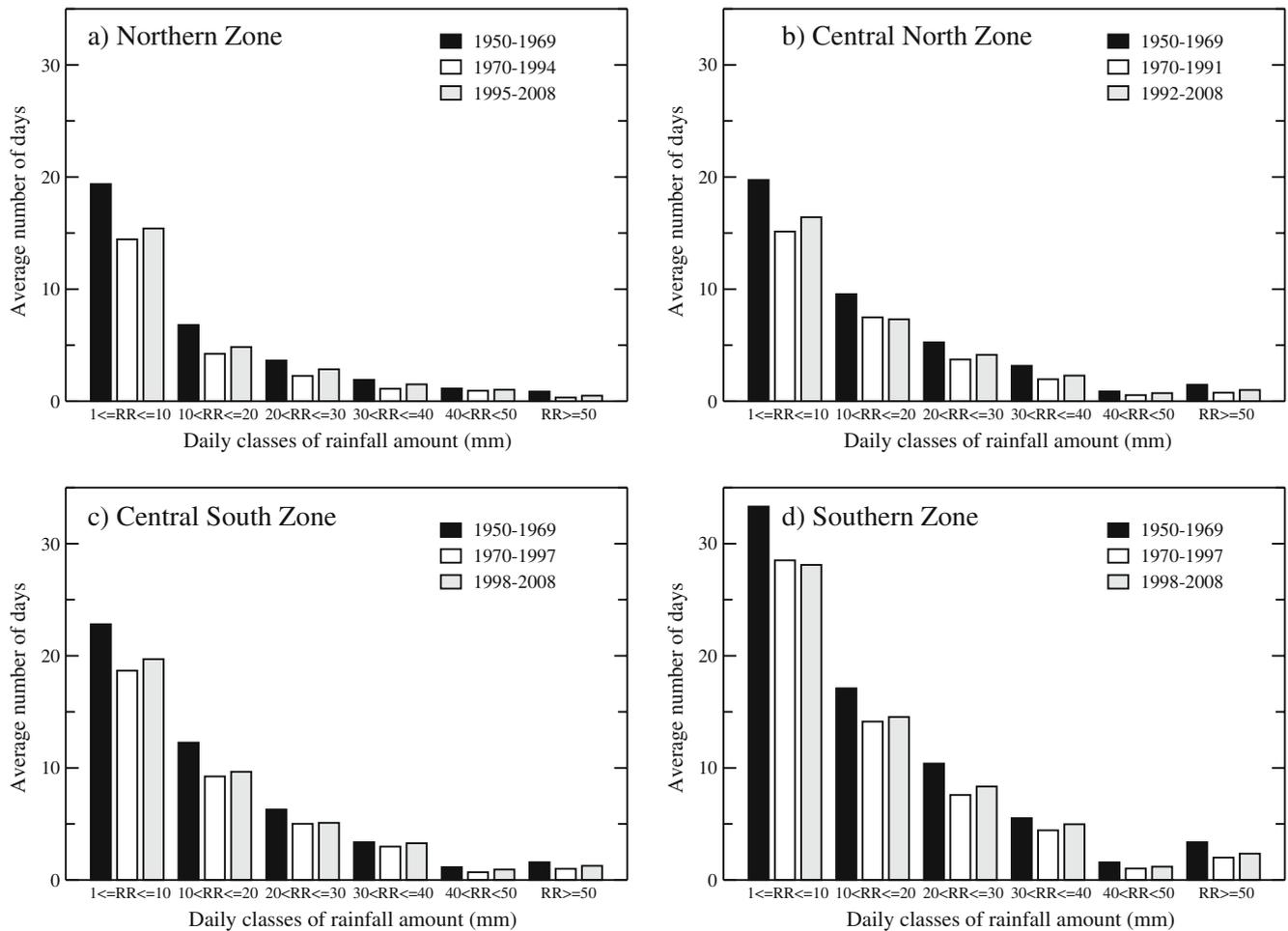
RPD2 in the NZ is supported by its intra-seasonal distribution. It is seen on Fig. 5 that the mean 10-day cumulated number of rainy days of 1995–2008 (P3) is above that of 1970–1994 (P2) but is less than that of 1950–1969 period (P1). When subjected to a classical Student's  $t$  test, the DR21–DR26 mean of P3 is significantly greater than that of P1. In the CN and the CS, the case is a little different. Both the intraseasonal (DR21–DR26) average of RD and RD50 are greater than the P2 period and statistically significant. In the SZ, no changes are found in both seasonal and intra-seasonal cycles of RD and RD50. Other important finding includes the shift in the position of the peak frequency of RDs from the 25th dekad in the 1950–1969 period back to the 24th dekad (2nd dekad of August) in the recent periods. This peak coincides with the shift in the peak of rainfall amount unveiled by Lebel and Ali (2009) for the Western Sahel.

The average number of some seasonal threshold classes of daily rainfall values has also changed (Fig. 6). It appears

there that the number of high daily rainfall values has increased in the Sudan–Sahel and Sahel regions of the country. Evidence can be taken from the results of a classical Student's  $t$  test shown on Table 4. They are derived from a comparison between the periods of recovery and the periods of drought, suggesting the “return” of some high daily cumulated rainfall. The frequency of occurrence of short dry spell category has also increased. In fact, DS1 (1–7 days) is +40% of P2 (against –45% with respect to P1). As stated earlier, the short dry spell category is dominated at ~60% by the 1–3 days sub-class. The rate of prevalence of 1–3 days dry spells in the northern regions is lesser compared with the southern regions (Sane et al. 2008; Salack et al. 2009a, 2009b) due to the difference in rainfall frequency in those regions. An increase in DS1 category of dry spells in the northern regions is synonymous to increase in rainfall frequency. Therefore the increase in annual rainfall amount is explained by the increase of both the frequency and amounts of rainfall. The



**Fig. 5** Average 10-day (dekad) cumulated number of rainy days in the reference rainfall zones. The windows depict the average number of rainy days having rainfall  $\geq 50$  mm/day in the NZ (a), CN (b), CS (c), and SZ (d)



**Fig. 6** Average seasonal number of daily classes of rainfall amounts. An inter-comparison of the humid (black), dry (white), and recovery (grey) periods per reference zone in Senegal. The *p* values are given in Table 4

other categories of dry spells such as DS2 (8–14 days), DS3 (15–21 days), and DS4 (>21 days) have shown no significant changes in the short term assessments considering the periods post-1990. Only significant F-test results were found, especially at local scales, suggesting high variability. However, DS2 and DS4 tend to show abrupt shifts in the long term assessment of the 1970–2008 time series (Table 5).

### 4.3 Onset/cessation and seasons' length

Onset of CS<sub>b</sub>, successful CS<sub>a</sub>, CE, CL<sub>b</sub>, and cropping season length (CL<sub>a</sub>) are the most stable factors in the short term statistical assessments (Table 6). On the zonal AAV, no significant changes are observed in the period post-1990 using the Student's–Fisher's tests scheme. Therefore RPD1 and RPD2 are NA. A further assessment considering the entire 1970–2008 period with respect to the 1950–1969 period (P1) reveals different rates of abrupt shifts. The results of the percent rates are directly converted into “days” for easy reading and are reported on Table 6. A

positive RPD implies a late onset date for both CS<sub>a</sub>, and CS<sub>b</sub>. A negative RPD signifies an early cessation date and reduced season lengths. The results found in the CS and the SZ are not statistically significant for CS<sub>b</sub>. Therefore, the onset of rainy season did not change from its previous 1950–1969 (P1) values in these zones. On the other hand, a 7-day late onset is found in the CN and the NZ. This is equivalent to 9–20 days lateness at local scale in the same sub-regions. Likewise, on the AAV, the average successful sowing dates, CS<sub>a</sub> of the 1970–2008, are significantly different from the humid P1 dates, by 8–10 days, in all reference zones. The particular sites that are significantly affected by these changes include Tambacounda (Tam), Ous, and Vel Cas.

There is a statistically significant decrease in season lengths on zonal AAV, as a result of shifts in onset/cessation dates. This is in accordance with previous studies (Camberlin and Diop 2003). The highest local rate of significant, *p*<sub>local</sub>, is found in the SZ and CN zones (100% and 50% respectively) and the lowest (30%) is found in the CS and the NZ. Most of the time, this rate is the contribution of the same sites where

**Table 4** *p* values of a classical Student's *t* test applied on daily classes of rainfall amounts (RR), comparing the differences between the "recovery" periods (P3) and the dry periods (P2) over Senegal

Class of rainfall (mm/day)	Northern zone	Central North zone	Central South zone	Southern zone
1≤RR≤10	0.14	0.08	0.14	0.35
10<RR≤20	<u>0.04</u>	0.33	0.23	0.29
20<RR≤30	<u>0.004</u>	<u>0.04</u>	0.34	0.13
30<RR≤40	<u>0.01</u>	<u>0.03</u>	0.28	0.14
40<RR<50	0.22	<u>0.03</u>	<u>0.04</u>	0.14
RR≥50	<u>0.02</u>	<u>0.02</u>	<u>0.04</u>	0.12

The average values are given in Fig. 6. The significant *p* values are underlined ( $\alpha=5\%$ ) identifying higher values in P3

a relative recovery is found for rainy days (RD and RD50), except in the SZ where all the analyzed sites are concerned. These results show that the recovery perception on rainfall amount and number of rainy days is embedded with shorter cropping season durations.

#### 4.4 Reviews and updates

From the late 1960s, there is a well-known decrease in annual rainfall amount (AR) across the Sahel (Dai et al. 2004; Ali and Lebel 2009), Senegal being no exception. In terms of changes in the seasonal cycle of rainfall and rain events distribution at local scale, new features need to be taken into consideration starting from the beginning of the 1990s. An analysis of the seasonal rain events reveals high correlations between AR, RD, and daily rainfall intensity (RR) (Moron et al. 2006; Lebel and Ali 2009). There are high negative correlations between onset dates and rainfall amount (Gueye and Sivakumar 1992). Other important patterns include the seasonal (intra-seasonal) north–south gradients in rainfall events influencing crops development and yield (Salack 2007; this issue). Even in a small area, thought climatologically homogeneous, spatial rainfall coherence is exceptionally missing in the intra-seasonal time scale.

For more than one and half decade, rainfall totals (annual and intra-seasonal), the total number RD, high daily rainfall types and the frequency of short duration dry spells (DS1) have known some significant changes in the recent years. The +10% to +17% area average recoveries of AR, found in the regions recording less than 800 mm/year from the 1990s, is on the increase up to date and includes an intra-seasonal August–September (21st to 26th dekad) higher frequency of daily rainfall. The average threshold values that are more frequent include the 20–40 mm/day and some extreme cases beyond 50 mm/day, in the northern and central parts of the country. The onset of the rainy season is followed by extreme dry spell events (e.g., more than 15 days) especially in the May–June–July intra-seasonal time period all over the country. This suggests frequent "false starts" of season that contribute to dry up the top soil

and cause seed abortion. The 1.5 frequency isopleth, which represents the average frequency of DS4, has shifted southward from its 1950–1969 position (as seen on Fig. 7) in the center and Central–West. This feature is putting the regions north of the 14° latitude under high agro-climatic risks. The 1991–2008 average seasonal dry spells typology and spatial distribution can be seen on Fig. 8. DS1 and DS4 categories have an opposite sign of N–S gradient and DS3 has an E–W pattern. Only DS2 exhibits no particular distribution pattern countrywide.

Figure 9 depicts the nowadays intra-seasonal distribution of potential successful CS<sub>a</sub> at all reference zones (full line), compared with the humid period 1950–1969 (dotted line). The mean CS<sub>a</sub> appears not later than June 25th ( $\pm 16.2$  days) in the SZ with a 14-day inter-zonal time lag. Late successful sowing dates are generally observed all over the country with a high inter-seasonal variability; leading to a shortening of the cropping season. A state-of-matter is provided, on Fig. 10, for the 1991–2008 period. The dashed contour lines are the empirical 3<sup>rd</sup> quartile successful sowing dates (contours) associated with the corresponding cropping season length (colors). A synopsis of rain-based factors essential to agricultural applications is provided in Table 7 for historical reviews and updates. It provides the area average values and standard deviations of the variables at some reference periods including the most recent. This is a provision in the perspectives of impact assessments and research applications for agronomists in the local network.

The differences in the frequency of occurrence, amount of daily rainfall and types of rainy days found between the recent decades and previous dry decades may be justified by the increase in the size and organization of the meso-scale convective systems after the mid 1980s. The evidence can be taken from Bell and Lamb (2006). These authors assessed station and Satellite rainfall data, for Niger, Burkina-Faso, Mali, and Senegal, using some statistical indices that define the ground imprint of DL trajectories in summer. They noticed an increase of the size/organization and intensity of these systems after the mid-1980s over Senegal. These systems are responsible for more than 90% of rainfall in this

**Table 5** Output of the Student's–Fisher's tests scheme on total rainy days and dry spell categories (1950–2008)

Parameter	Sub-region	STY in AAV	AAV RPD1 (%)	AAV RPD2 (%)	AAV RPD <sup>a</sup> (70–08/50–69 (%))	Ratio of sig. $p_{local}$	Significantly affected sites (STY, RPD1, and RPD2)
Total rainy days/season	NZ	1995	-30	+12	NA	2:5	Keb (1988, -25 and +12); Mat (1994, -25 and +11); Pod and StL (1993, -20, +32)
	CN	1993	-20	+10	NA	1:4	Bol (1998, -26 and +14); Kid (1988, +13 and +30)
	CS	1998	-15	+10	NA	1:3	Fnd (1998, -15 and +17); Kaff (1998, -5 and +17)
	SZ	NA	NA	NA	-17	1:5	Zig (1993, -15 and +11)
Number of rainy days With less than 10 mm/day (RD10)	NZ	NA	NA	NA	-23	0	NA
	CN	NA	NA	NA	-20	1:9	Kid (1993, +75 and +45)
	CS	NA	NA	NA	-16	0	NA
	SZ	NA	NA	NA	-14	0	NA
Number of rainy days greater/equal 50 mm/day (RD50)	NZ	1993	-49	34	NA	2:7	Dag (1993, -61 and +320); Lug (1993, +17 and +171)
	CN	1998	-36	26	NA	1:3	Bak (1998, +47 and +250); Bol (1998, +8 and +48)
	CS	1998	-34	18	NA	2:3	Fnd (1998, +17 and +119); Kaf (1998, -20 and +64); Kng (1998, -9 and +41)
	SZ	NA	NA	NA	-37	0	NA
Short dry spells category (DS1, 1–7 days)	NZ	1998	-45	40	NA	2:9	Dag (1992, -36 and +72); Mat (1990, -31 and +50)
	CN	NA	NA	NA	-17	0	NA
	CS	1998	-15	+10	NA	1:3	Fnd (1998, -15 and +17); Kaff (1998, -5 and +17)
	SZ	NA	NA	NA		1:5	Zig (1993, -15 and +11)
Medium dry spells category (DS2, 8–14 days)	NZ	NA	NA	NA	00	0	NA
	CN	NA	NA	NA	+15	0	NA
	CS	NA	NA	NA	+07	0	NA
	SZ	NA	NA	NA	-11	0	NA
long dry spells category (DS3, 15–20 days)	NZ	NA	NA	NA	-05 <sup>b</sup>	0	NA
	CN	NA	NA	NA	-07 <sup>b</sup>	0	NA
	CS	NA	NA	NA	-07 <sup>b</sup>	0	NA
	SZ	NA	NA	NA	+05 <sup>b</sup>	0	NA
Very long dry spells category (DS4, ≥21 days)	NZ	NA	NA	NA	00	0	NA
	CN	1997	+16	+2	NA	0	Fat (1993, +12 and +14); Kao (1996, -02 and -05)
	CS	NA	NA	NA	+07	0	NA
	SZ	NA	NA	NA	-11	0	NA

<sup>a</sup> STY is not available (NA) and the RPD is statistically significant

<sup>b</sup> Not statistically significant

region (Gaye et al. 2005). Nevertheless, there are other complex factors associated with the local/regional dynamics which coupling with the atmospheric DLs is not well understood. Additional to the form of its terrain (no major orography), the weather over Senegal is influenced by factors such as Saharan Air Layer from the northern borders with Mauritania, ocean-content-atmosphere interface on the

West, the Fouta-Djalón orography (in Guinea) where originate most of the squall lines from the South/South-East and the long lived meso-scale convective systems that come from the Central Sahel (Smith et al. 2011). Therefore, the dynamical and environmental mechanisms (both internal and external) controlling these new and locally important changes of the rainfall regime are still opened questions.

**Table 6** Same as Table 5. For onset/cessation/successful sowing dates and seasons' duration

Parameter	Sub-region	STY on AAV	AAV RPD1 (days)	AAV RPD2 (days)	AAV RPD <sup>a</sup> (70–08/50–69 (days))	Ratio of sig. $p_{local}$	Significantly affected sites (STY, RPD1, and RPD2)
Onset of rainy season (CS <sub>b</sub> )	NZ	NA	NA	NA	+7	2:7	Dar (1970, +18 and –); Mat (1970, +14 and –); Tiv (1970, +11 and –)
	CN	NA	NA	NA	+7	4:9	Bol (1970, +10 and –); Dor (1970, +20 and –); Kao (1970, +9 and –); Mba (1970, +17 and –);
	CS	NA	NA	NA	+2 <sup>b</sup>	0	NA
	SZ	NA	NA	NA	+4 <sup>b</sup>	1:5	Ous (1970, +8 and –)
Successful sowing date (CS <sub>a</sub> )	NZ	NA	NA	NA	+10	0	NA
	CN	NA	NA	NA	+5 <sup>b</sup>	0	NA
	CS	NA	NA	NA	+10	1:6	Tam (1970, +14 and –)
	SZ	NA	NA	NA	+8	2:5	Ous (1970, +9 and –); Vel Cas (1970, +14 and –)
Cessation date (CE)	NZ	NA	NA	NA	–6	1:9	Dag (1970, –10 and –)
	CN	NA	NA	NA	–7	2:9	Fat (1970, –8 and –); Kao (1970, –14 and –)
	CS	NA	NA	NA	–7	2:6	Gou (1970, –15 and –); Kon (1970, –10 and –)
	SZ	NA	NA	NA	–5 <sup>b</sup>	4:5	Ked (1970, –12 and –); Kld (1970, –11 and –); Ous (1970, –8 and –); Zig (1970, –13 and –)
Length of rainy season (CL <sub>b</sub> )	NZ	NA	NA	NA	–10	1:3	Dar (1970, –25 and –); Lin (1970, –15 and –); Mat (1970, –19 and –)
	CN	NA	NA	NA	–14	4:8	Fat (1970, –18 and –); Kao (1970, –25 and –); Mba (1970, –23 and –); Thi (1970, –20 and –)
	CS	NA	NA	NA	–9	2:6	Gou (1970, –15 and –); Kon (1970, –15 and –)
	SZ	NA	NA	NA	–16	3:5	Kld (1970, –12 and –); Ous (1970, –16 and –); Zig (1970, –15 and –)
Cropping season (CL <sub>a</sub> )	NZ	NA	NA	NA	–11	0	NA
	CS	NA	NA	NA	–12	1:2	Dor (1970, –17 and –); Koa (1970, –25 and –); Mba (1970, –14 and –)
	CS	NA	NA	NA	–14	0	NA
	SZ	NA	NA	NA	–18	1:1	NA

STY starting year of recovery, AAV area average value, NZ Northern zone, CN Central North, CS Central South, SZ Southern zone

<sup>a</sup> STY is not available (NA) and the RPD is statistically significant

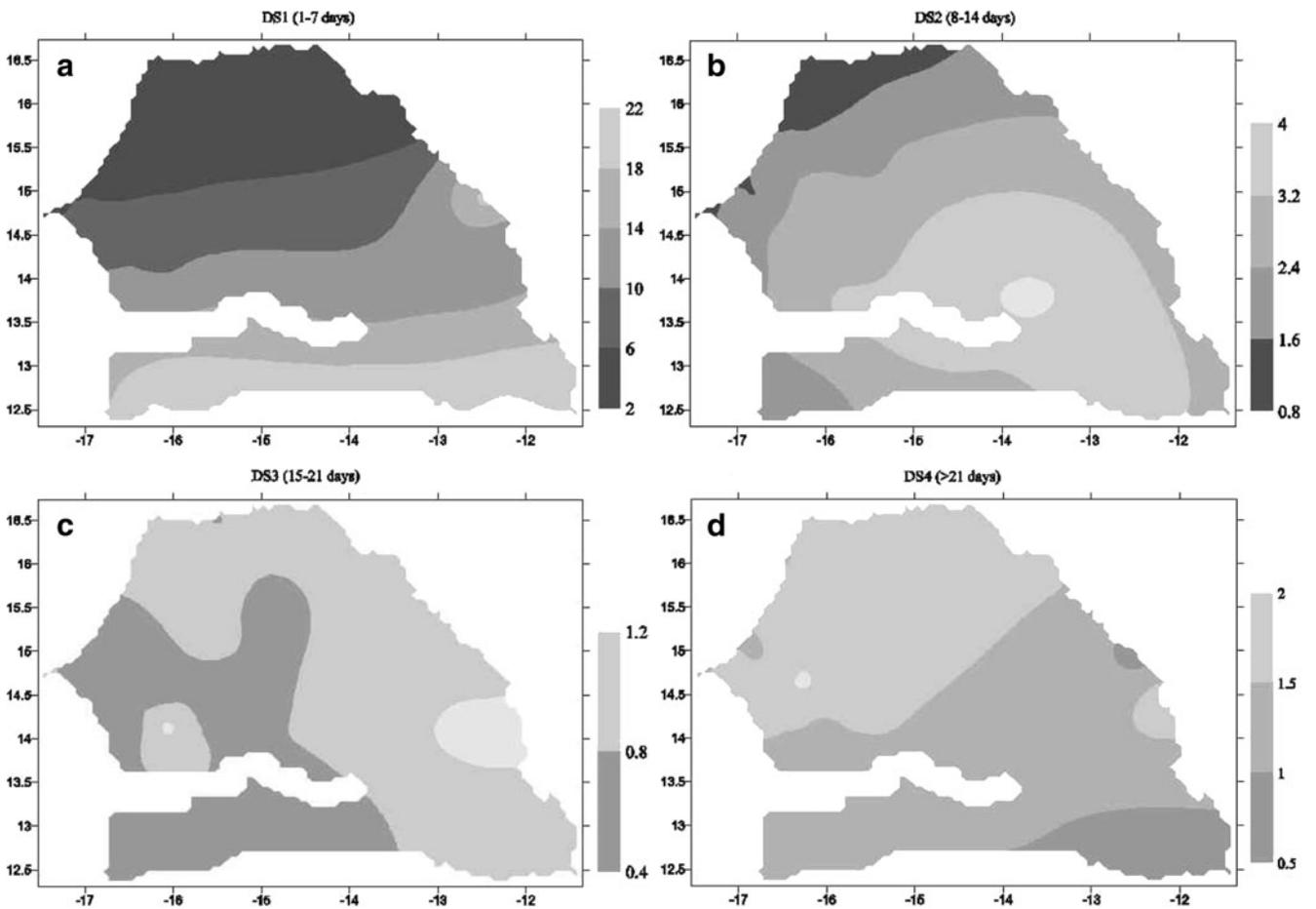
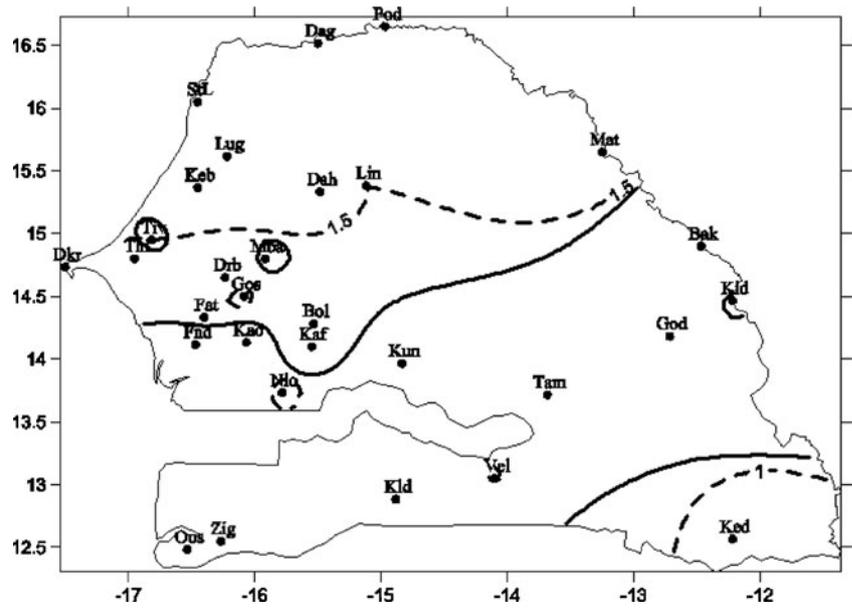
<sup>b</sup> Not statistically significant

## 5 Concluding remarks and perspectives

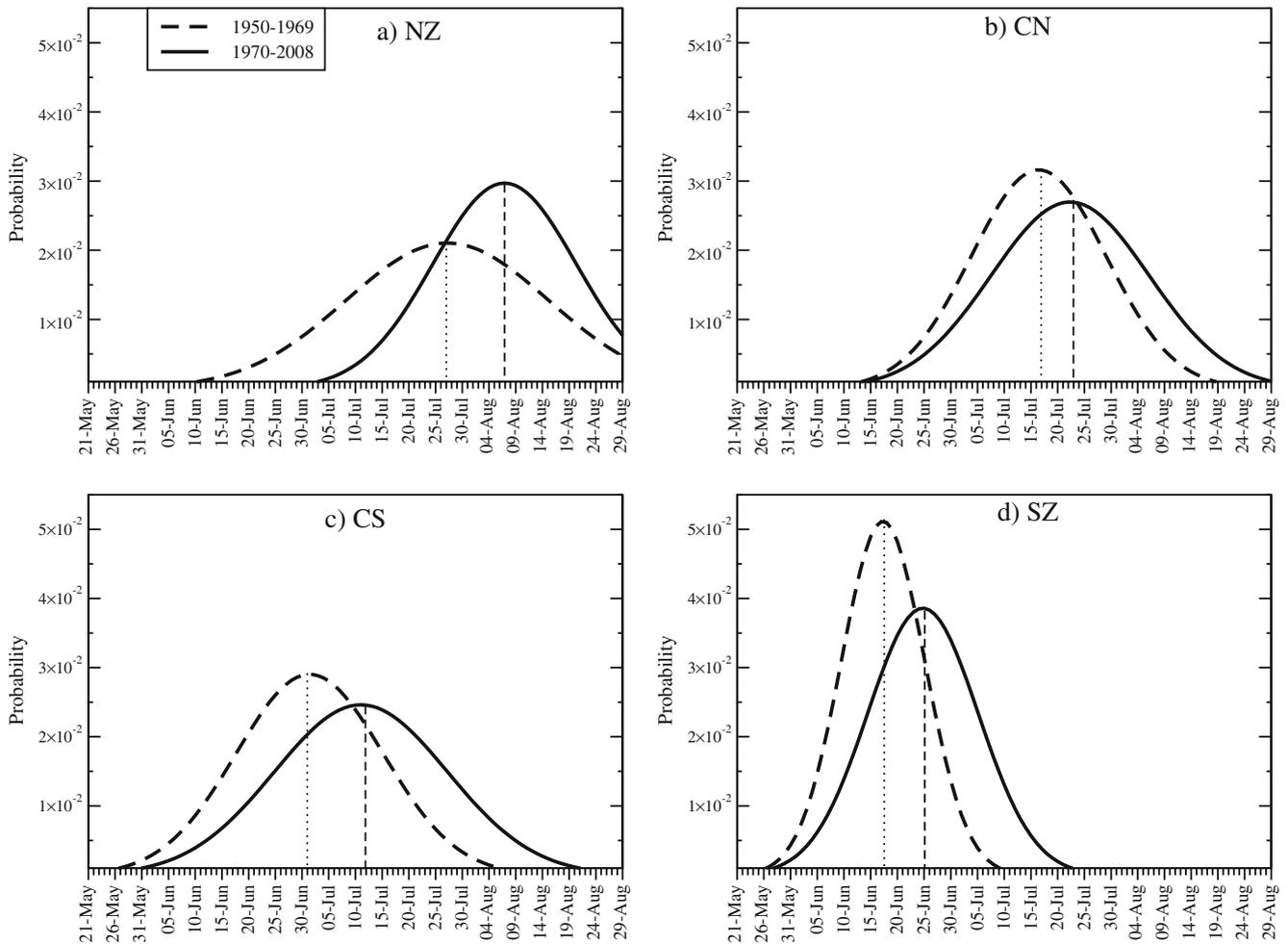
Knowing the internal variability of sub-periods prior to trend detection provides a strong basis for rating the significant shifts in the records of rainfall components. By a systematic exploration in the mean, the variance and the

relative percent difference, the SFS led to the identification of three sub-periods of different rainfall characteristics over the last 59 years over Senegal. The first is the 1950–1969 period, humid at all scales, all over the country. The dry and recovery periods are unevenly distributed. In the Sudan-Sahel regions of the country (regions recording less than

**Fig. 7** Spatial drift of dry spells. Here is an inter-comparison of dry spells category DS4 ( $DS \geq 21$  days) at different periods. The 1950–1969 isopleths is shown by the dashed contours and the 1970–2008 by the line contour

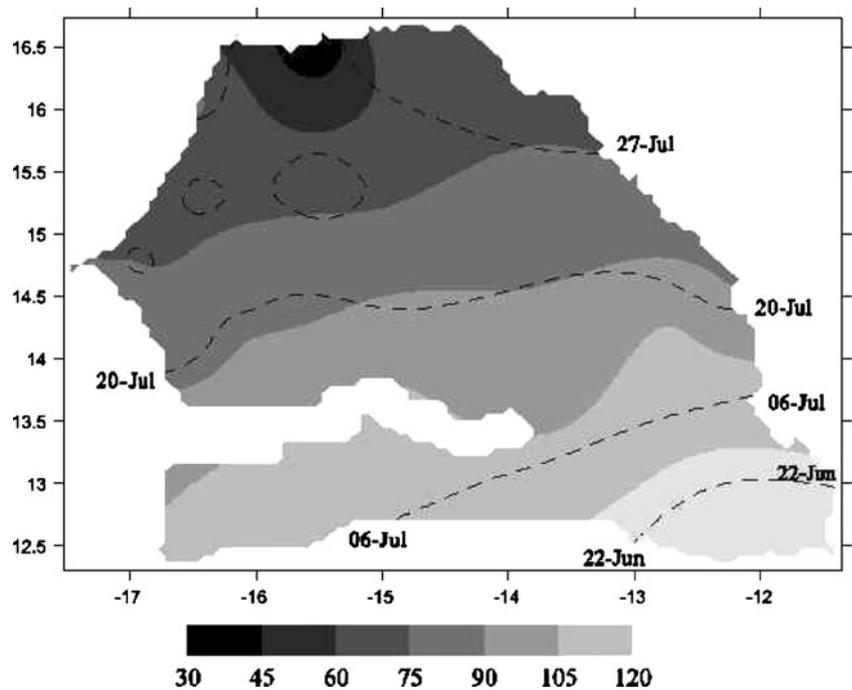


**Fig. 8** Average absolute frequency distribution of the observed dry spell categories in 1991–2008 period. The DS1 category has about 60–80% of 1–3 days sub-class and are correlated to N–S rainfall gradients (Sane et al. 2008; Salack et al. 2009b)



**Fig. 9** Observed shifts in the Average successful sowing dates. An inter-comparison between 1970 and 2008 (*full line*) and the humid 1950–1969 (*dashed line*)

**Fig. 10** Distribution of the 3rd quartile successful sowing dates (*contours*) computed using the classical *Sivakumar method* and the length of the cropping season (*colored bands*) as observed in the 1991–2008 period. The cropping season is quoted in “days after sowing” (*DAS*)



**Table 7** Reviews and updates of factors affecting crops development and yield

Parameter	1950–1969 (humid period)		1970–1989 (dry period) <sup>a</sup>		1961–1990 (baseline) <sup>b</sup>		1971–2000 (WMO update)		1979–2008 (actual)		1995–2008 (recovery period)	
	Mean	STD deviation	$\mathcal{P}$	$\sigma$	$\mathcal{P}$	$\sigma$	$\mathcal{P}$	$\sigma$	$\mathcal{P}$	$\sigma$	$\mathcal{P}$	$\sigma$
For the Northern Zone												
Tot rainfall (mm/seas.)	477.3	142.6	290.8	16.2	333.3	79.5	291.0	100.7	301.6	67.3	312.7	110.4
Rainy days (#/seas.)	31	7	21	1	23	7	20	5	21	6	23	6
Short dry sp (#/seas.)	7.1	3.5	3.6	2.4	4.3	2.9	3.6	2.4	4.0	2.8	4.3	2.8
Med dry sp. (#/seas.)	2.4	1.3	1.6	1.3	1.8	1.3	1.6	1.3	1.6	1.3	1.8	1.3
Lon. dry sp. (#/seas.)	0.8	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9
V. l. dry sp. (#/seas.)	1.7	0.8	1.7	0.9	1.7	0.9	1.7	0.9	1.6	0.9	1.7	0.8
Sowing date (day, Mon.)	29 Jul	25	14 Au	23	7 Aug	27	9 Aug	22	7 Aug	20	3 Aug	17
Cessation (day, Mon.)	10 Oct	14	8 Oct	16	8 Oct	14	4 Oct	22	30 Sept	17	29 Sept	19
Crop. period (DAS)	89	27	77	32	78	30	76	32	73	27	76	25
For the Central North zone												
Tot rainfall (mm/seas.)	717.3	193.7	490.8	22.9	538.8	166.6	498.0	128.2	512.0	132.7	536.2	135.2
Rainy days (#/seas.)	42	8	31	1	34	8	32	6	32	7	34	6
Short dry sp (#/seas.)	13.6	4.7	9.0	3.8	10.0	4.1	9.1	3.5	9.4	3.6	10.0	3.3
Med dry sp. (#/seas.)	3.0	1.6	2.2	1.5	2.4	1.6	2.3	1.5	2.5	1.6	2.7	1.6
Lon. dry sp. (#/seas.)	0.8	0.8	0.7	0.8	0.7	0.8	0.8	0.9	0.7	0.8	0.8	0.9
V. l. dry sp. (#/seas.)	1.3	0.6	1.4	0.8	1.4	0.8	1.5	0.9	1.5	0.9	1.6	0.9
Sowing date (day, Mon.)	16 Jul	15	23 Jul	21	21 Jul	20	23 Jul	21	23 Jul	21	22 Jul	21
Cessation (day, Mon.)	14 Oct	15	10 Oct	14	9 Oct	13	8 Oct	13	3 Oct	14	2 Oct	14
Crop. period (DAS)	94	24	88	25	88	24	84	24	78	29	74	28
For the Central South zone												
Tot rainfall (mm/seas.)	853.2	177.3	632.2	24.7	673.6	166.0	636.0	141.6	649.0	155.1	665.0	158.3
Rainy days (#/seas.)	50	8	40	1.0	42	8.0	40	8.0	40	8.0	41	8.0
Short dry sp (#/seas.)	15.7	4.5	11.2	4.3	12.4	4.4	11.2	4.4	11.4	4.4	11.8	4.1
Med dry sp. (#/seas.)	2.8	1.4	2.4	1.6	2.6	1.6	2.8	1.7	3.0	1.8	3.4	1.7
on. dry sp. (#/seas.)	0.9	0.9	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.8
V. l. dry sp. (#/seas.)	1.3	0.6	1.4	0.8	1.3	0.7	1.3	0.8	1.4	0.8	1.4	0.7
Sowing date (day, Mon.)	01 Jul	22	8 Jul	21	6 Jul	23	10 Jul	24	9 Jul	25	10 Jul	25
Cessation (day, Mon.)	15 Oct	15	9 Oct	15	10 Oct	14	9 Oct	13	6 Oct	8	6 Oct	8
Crop. period (DAS)	104	23	90	27	93	26	88	26	85	25	84	23
For the Southern zone												
Tot rainfall (mm/seas.)	1390.6	275.5	1055.8	572.0	1129.6	262.5	1,073.0	219.5	1,060.0	225.5	1,094.2	233.8
Rainy days (#/seas.)	75	10	62	4	64	10	62	8	61	8	62	9
Short dry sp (#/seas.)	23.6	4.6	19.2	4.6	20.2	4.8	19.5	4.6	19.7	4.8	20.4	4.5
Med dry sp. (#/seas.)	2.7	1.4	2.4	1.6	2.5	1.5	2.5	1.5	2.7	1.5	2.8	1.4
Lon. dry sp. (#/seas.)	0.6	0.7	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7	0.8	0.6	0.8	0.6	0.8
V. l. dry sp. (#/seas.)	1.1	0.6	1.0	0.6	1.0	0.6	1.0	0.6	1.0	0.6	1.1	0.6
Sowing date (day, Mon.)	15 Jun	13	21 Jun	16	19 Jun	15	22 Jun	15	23 Jun	16	23 Jun	15
Cessation (day, Mon.)	22 Oct	14	15 Oct	14	16 Oct	14	13 Oct	12	11 Oct	8	10 Oct	6
Crop. period (DAS)	141	19	131	20	132	20	128	20	126	17	125	15

DAS days after sowing

<sup>a</sup> Dry period relative to the Western Sahel (Lebel and Ali 2009)<sup>b</sup> Baseline relative to climate change assessment studies (Sarr et al. 2006; Ben Mohamed 2010)

800 mm/year), rainfall amount has recovered +10% to +17% from the previous dry decades as proven by the areal zonal values. This started in 1992–1998, at sub-regional scale (cf. NZ, CN, CS zones). It is statistically significant and is on the increase until recent but still below the humid period (1950–1969) in confirmation of previous studies. Mostly at local scale larger changes are found (about 16–32%) which started as early as 1988 at some individual sites (e.g. Bakel, Boulel and Kebemer). Beside the 1950–1969 major breaks in the rainfall regime, these are also important internal variability patterns of rainfall to consider in a multi-decadal work over the 1970–2008 period for this region at both local and sub-region scales.

The new perceptions include the increase in the frequency of daily heavy rainfall types, shift in the peak number of rainy days and the frequency of short dry spells (especially in the North). In the extreme south (regions recording more than 800 mm/year) drought state still prevalent in the past one and half decade according to the tested area average values. This suggests a North–south “dipole” of rainfall evolution over the country. Significant trends on agricultural calendar such as onset of rainy season, successful sowing dates and cropping periods are only found on the 1970–2008 time series and have shifted by more than a week from their 1950–1969 levels. These factors did not show statistical significant trends over the periods post-1990. They are rather embedded with an increased spatio-temporal variability in a larger portion of the northern and central zones of Senegal. Each time significant changes are observed, their magnitude on the areal values is not less than 10%. In most cases, a relatively small sub-regional scale change implies a more severe local perception in the same direction (negative or positive). This observation is true for at least one third fraction of the observation network. This is evidence that area average or aggregated analyses of trends and variability may underrate the locally significant and relevant patterns. These scale issues are very important in linking crop and climate models for in situ, short and/or long term climate impact assessments. The detailed results of this work contribute to complement previous analyses of rainfall regime over this region. They foster a strong background evidence of local and sub-regional recovery in this region. Even though their signal is weak, the new tendencies at the sub-regional scales are important internal variability to take into consideration in a multi-decadal model validation, impact and vulnerability assessments on traditional agriculture. The periodic reviews and updates (included in the synopsis) provided with these analyses are provisions for operational research and applications.

The updates especially show that the rainy season has become potentially hazardous (significant variability) with higher frequency of extreme dry spells. The highest number

of rainy days in the season has shifted by a dekad. Shorter cropping seasons are also persistent. The implications of these changes to local agriculture are relevant and challenging questions to address for a better understanding and decision making.

**Acknowledgments** The authors are indebted to *Centre Régional pour l'Amélioration de l'Adaptation à la Sécheresse* (CERAAS) and *Agence Nationale de la Météorologie du Sénégal*, (ANAMS) for providing rain gauge data. Special regards to the various persons who manage and update the CERAAS database: Moustapha Fall, COUNA Sylla, Cheikh Dramé, Benoit Sarr, Mbaye Diop, and Ndongo Ngom.

The first author acknowledges the German Academic Exchange Service (DAAD) for the In-Regions Scholarship through CERAAS (#A/09/04677). Fruitful discussions were held with Frédéric Hourdin. Comments and suggestions from Serge Janicot and an anonymous reviewer helped greatly improve the quality of this paper. Financial support was also provided by CIRAD and AMMA-EU in the framework of the AMMA project. Based on a French initiative, AMMA was built by an international scientific group and is currently funded by a large number of agencies, especially from France, UK, US, and Africa. It has been the beneficiary of a major financial contribution from the European Community's Sixth Framework Research Program. Detailed information on scientific coordination and funding is available on the AMMA International web site. <http://www.ammainternational.org>.

## References

- Abdi H, Molin P (2007) Lilliefors/Van Soet's test of normality. In: Neil Salkind (Ed.) (2007), *Encyclopedia of Measurement and Statistics*. Available at: <http://www.utdallas.edu/~herve/Abdi-Lillie2007-pretty.pdf>
- AGRHMET (1996) *Méthodologie de suivi des zones à risque*. AGRHYMET FLASH, Bulletin de Suivi de la Campagne Agricole au Sahel. Centre Régional AgrhyMET, B.P. 11011, Niamey, Niger, vol. 2, No. 0/96. p. 2
- Ali A, Lebel T (2009) The Sahelian standardized rainfall index revisited. *Int J Climatol* 29(12):1705–1714. doi:10.1002/joc.1832
- Balme M, Galle S, Lebel T (2004) Démarrage de la saison des pluies au Sahel: variabilité aux échelles hydrologique et agronomique, analysée à partir des données EPSAT-Niger. *Sécheresse* 16(1):15–22
- Baron C, Sultan B, Balme M, Sarr B, Traore S, Lebel T, Janicot S, Dingkuhn M (2005) From GCM grid cell to agricultural plot: scale issues affecting modeling of climate impact. *Phil Trans R Soc B* 360(1463):2095–2108. doi:10.1098/rstb.2005.1741
- Bell MA, Lamb PJ (2006) Integration of weather system variability to multidecadal regional climate change: the West African Sudan–Sahel Zone, 1951–98. *J Climat* 19:5343–5365
- Ben Mohamed A (2010) Climate change risks in Sahelian Africa. *Reg Environ Change*. doi: 10.1007/s10113-010-0172-y
- Box GEP, Cox DR (1964) *An Analysis of Transformations*. *J Royal Stat Society* 127:211–252
- Camberlin P, Diop M (2003) Application of daily principal component analysis to the assessment of the rainy season characteristics in Senegal. *Clim Res* 23:159–169
- Catherinet MD, Dumont S, Mayaki AA (1963) Millet and sorghum in Niger. Cultivation water requirements, soil and climate, limiting factors. *L'Agronomie Tropicale* 18:108–113
- Cochemé J, Franquin P (1967) An agroclimatological survey of a semi-arid area in Africa south of the Sahara. *Technical note* No. 86. World Meteorological Organization, Geneva

- Dai A, Lamb PJ, Trenberth KE, Hulme M, Jones PD, Xie P (2004) The recent Sahel drought is real. *Int J Climatol* 24:1323–1331
- Der Megreditchian G (1992) Le traitement statistique des données Multidimensionnelles. Application à la météorologie. *Cours et Manuel* No 8. Tome 1. Météo France, France. p. 287
- Diedhiou A, Janicot S, Viltard A, de Felice P, Laurent H (1999) Easterly wave regimes and associated convection over West Africa and the tropical Atlantic: results from NCEP/NCAR and ECMWF reanalyses. *Clim Dyn* 15:795–822
- Dieng O, Roucou P, Louvet S (2008) Variabilité intra-saisonnière des précipitations au Sénégal (1951–1996). *Sécheresse*, 19 (2):87–93
- Easterling RD, Alexander LV, Mokssit A, Determmerman V (2003) CCI/CLIVAR workshop to develop priority climate indices. *Bull Am Meteorol Soc* 8:1403–1407
- Fall S, Niyogi D, Semazzi FHM (2006) Analysis of mean climate conditions in Senegal (1971–1998). *Earth Interact* 10(5):1–40
- FAO (Food and Agriculture Organization) (1978) Report on the agroecological zones project. *World Soil Resource Report* N° 48. Rome. FAO.
- Frappart F et al (2009) Rainfall regime across the Sahel band in the Gourma region, Mali. *J Hydrol*. doi:10.1016/j.jhydrol.2009.03.007
- Gaye A, Viltard A, De Félice P (2005) Lignes de grains et pluies en Afrique de l'Ouest: part des lignes de grains à la pluie totale des étés 1986 et 1987. *Sécheresse* 16(4):269–273
- Grist PJ, Nicholson ES (2001) A study of the dynamical factors influencing rainfall variability in the West African Sahel. *J Clim* 14:1337–1359
- Gueye M, Sivakumar MVK (1992) Analyse de la longueur de la saison culturale en fonction de la date de début des pluies au Sénégal. *Compte rendu des travaux* No 2. Niamey (Niger) : Centre sahélien de l'ICRISAT, 1992. Available at: [http://library.wur.nl/isric/fulltext/ISRIC\\_13235.pdf](http://library.wur.nl/isric/fulltext/ISRIC_13235.pdf)
- Hachigonta S, Reason CJC, Tadross M (2008) An analysis of onset date and rainy season duration over Zambia. *Theor Appl Climatol* 91:229–243. doi:10.1007/s00704-007-0306-4
- Hirsch RM, Helsel DR, Cohn TA, Gilroy EJ (1993) Statistical analysis of hydrologic data. In: Maidment DR (ed) *Handbook of hydrology*. McGraw-Hill, New York, pp 17.1–17.55
- IPCC (2007) *Climate change: the physical science basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge. p. 996
- Janicot S, Mounier F, Diedhiou A (2008) Les ondes atmosphériques d'échelle synoptique dans la mousson d'Afrique de l'Ouest et centrale: ondes d'est et ondes de Kelvin. *Sécheresse* 19(1):13–22. doi:10.1684/sec.2008.0115
- Katz RW, Glantz MH (1986) Anatomy of a rainfall index. *Mon Weather Rev* 114:764–771
- L'Hôte Y, Mahé G, Somé B, Triboulet JP (2002) Analysis of Sahelian rainfall index from 1896 to 2000; the drought continues. *J Hydrol Sci* 47(4):563–572
- 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. *Theor Appl Climatol* 91:99–116
- Laurent H, D'Amato N, Lebel T (1998) How important is the contribution of the mesoscale convective complexes to the Sahelian rainfall? *Phys Chem Earth* 23(5-6):629–633. doi:10.1016/S0079-1946(98)00099-8
- Le Barbé L, Lebel T, Tapsoba D (2002) Rainfall variability in West Africa during the years 1950–90. *J Climate* 15(2):187–202
- Le Houerou HN (1992) Relations entre la variabilité des précipitations et celle des productions primaires et secondaires en zone aride. In: *L'aridité, une contrainte au développement*. Didactiques. Orstom éditions, Paris
- Lebel T, Ali A (2009) Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990–2007). *J Hydrol*. doi:10.1016/j.jhydrol.2008.11.030
- Lebel T, Parker D J, C Flamant et al. (2009) The AMMA field campaigns: Multiscale and multidisciplinary observations in the West African region. *Q J R Meteorol Soc*. doi: 10.1002/qj.486
- Lilliefors H (1967) On the Kolmogorov-Smirnov test for normality with mean and variance unknown. *J Am Stat Assoc* 62:399–402
- Misra AN, Misra M (1991) Physiological responses of pearl millet to agroclimatic conditions determining grain formation and yield. *Environmental Contamination and Hygiene* 165–175
- Moron V, Robertson, Ward MN (2006) Seasonal Predictability and spatial coherence of rainfall characteristics in the tropical setting of Senegal. *Mon Weather Rev* 134:3248–3262
- Mounier F, Kiladis G, Janicot S (2007) Analysis of the dominant mode of convectively coupled Kelvin waves in the West African Monsoon. *J clim* 20:1487–14503
- New M, Hewitson B, Stephenson DB et al (2006) Evidence of trends in daily climate extremes over southern and west Africa. *J Geophys Res* 111:D14102. doi:10.1029/2005JD006289
- Nicholson SE (1983) Sub-Sahara rainfall in the year 1976–1980: evidence of Continued drought. *Mon Weather Rev* 3:1646–1654
- Nicholson SE (2005) On the question of the “recovery” of the rains in the West African Sahel. *J Arid Environ* 63:615–641
- Nicholson SE (2009) On the factors modulating the intensity of the tropical rainbelt over West Africa. *Int J Climatol* 29:673–689
- Nzeukou A, Sauvageot H (2002) Distribution of rainfall parameters near the coasts of France and Senegal. *J Appl Meteorol* 41:69–82
- Oladipo EO, Kyari JD (1993) Fluctuations in the onset, termination, and length of the growing season in northern Nigeria. *Theor Appl Climatol* 47:241–250
- Ozer P, Erpicum M, Demarée G, Vandiepenbeeck M (2003) The Sahelian drought may have ended during the 1990s. *Hydro Sci J* 48:489–492
- Ozer P, Bodart C, Tychon B (2005) Climatic analysis of the Gouré area, eastern Niger: recent changes and environmental impacts. *Cybergeog, Environnement, Nature, Paysage*, article 308. Available at: <http://www.cybergeog.eu/index3338.html>.
- Redelsperger J-L, Thorncroft C, Diedhiou A, Lebel T, Parker D, Polcher J (2006) African monsoon, multidisciplinary analysis (AMMA): an International research project and field campaign. *Bull Am Meteorol Soc* 87(12):1739–1746
- Reed RJ, Norquist DC, Recker EE (1977) The structure and characteristics of African easterly wave disturbances as observed during Phase III of Gate. *Mon Weather Rev* 105:317–333
- Salack S (2007) Intra-seasonal to seasonal variability of simulated rainfall in the perspectives of agricultural impact assessment studies for the Sahel. M. Sc. Research Dissertation, University Cheikh Anta Diop of Dakar, Senegal. p. 60
- Salack S, Muller B, Gaye A T, Sylla C, Fall M (2009a) Updated space-time rainfall regimes and agro-climatological features in Senegal. Work presented at the 3rd International AMMA Conference, Ouagadougou, 20–24 July 2009
- Salack S, Muller B, Gaye A T, Hourdin F (2009b) Multi-scale intra-seasonal characterization of dry spells in Senegal and their implication in the rainy season attributes. Work presented at the 3rd International AMMA Conference, Ouagadougou, 20–24 July 2009
- Sane T, Diop M, Sagna P (2008) Etude de la variabilité de la saison pluvieuse au Sud en Haute-Casamance (Sud-Sénégal). *Sécheresse* 19(1):23–28
- Sarr B, Traoré S, Salack S (2006) Evaluation de l'incidence des changements climatiques sur les rendements des cultures céréalières en Afrique soudano sahélienne. *Centre Régional Agrhymet, CILSS, Niamey*. p. 100
- Segele ZT, Lamb PJ (2005) Characterization and variability of Kiremt rainy season over Ethiopia. *Meteorol Atmos Phys* 89:153–180

- Sene S, Ozer P (2002) Evolution pluviométrique et relation inondations—événements pluvieux au Sénégal. *Bull-Soc géogr LieÂge* 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. *Agric Fores Meteor* 42:295–305
- Sivakumar MVK (1992) Empirical analysis of dry-spells for agricultural applications in West Africa. *J Climate* 5:532–539
- Sivakumar MVK, Valentin C (1997) Agroecological zones and the assessment of crop production potential. *Phil Trans R Soc Lond B* 352:907–916
- Smith JW, Reynolds AE, Pratt AS, Salack S et al (2011) Observations of an 11 September Sahelian Squall Line and Saharan Air Layer Outbreak during NAMMA-06. *Atmos Chem Phys* (in press)
- Stern R, Rijks D, Dale I, Knock J (2006) *Instat Climatic Guide*. University of Reading, Reading, p 330
- Sultan B, Janicot S (2004) La variabilité climatique en Afrique de l'Ouest aux échelles intrasaisonnières. I: mise en place de la mousson et variabilité intra-saisonnière de la convection. *Sécheresse* 15:321–330
- Sultan B, Baron C, Dingkhun M, Sarr B, Janicot (2005) Agricultural impacts of large-scale variability of the West African monsoon. *Agric For Meteorol* 128(1–2):93–110
- Viltard A, de Félice P (1979) Statistical analysis of wind velocity in an easterly wave over West Africa. *Mon Weather Rev* 107:1320–1327
- Ward MN (1998) Diagnosis and short-lead time prediction of summer rainfall in tropical North Africa at interannual and multi-decadal time scales. *J Climate* 11:3167–3191
- Yue S, Pilon P (2004) A comparison of the power of the t test, Mann–Kendall and bootstrap tests for trend detection. *Hydrol Sci J* 49(1):21–36

# Chapitre 4

## Prévisibilité potentielle des pauses pluviométriques extrêmes (extDS)

### 4.1 La prévisibilité potentielle

Dans les régions semi-arides Ouest africaines, la croissance, le développement et la stabilité de la production des cultures pluviales dépendent de la quantité des pluies, du démarrage tardif ou fin précoce de la saison, de la demande climatique et de la répartition des jours pluvieux (Catherinet *et al.*, 1963; Misra et Misra, 1991; Le Houerou, 1992; Sivakumar, 1992; Oladipo et Kyari, 1993; Sultan *et al.*, 2005, Marteau, 2011). De plus en plus les évènements pluviométriques deviennent irréguliers et aléatoires. Au Sénégal, par exemple, cet état de fait est également présent avec une certaine disparité selon les zones agro-climatiques selon les résultats du chapitre 3. Cependant, une étude plus détaillée de ces facteurs montre que les pauses pluviométriques (DS) sont les plus déterminantes pour le mil en milieu paysan (Winkel et DO, 1992). En effet, Sultan *et al.* (2008) montrent qu'il peut y avoir une variabilité de l'ordre de 50 % sur les rendements du mil à Niamey, si l'on considère la date de mise en place de la mousson. Une des raisons qui peuvent justifier une telle baisse de rendement est le fait que cette date peut faire l'objet de *faux départs* dus aux DS qui pourront survenir après. Même si la date idéale de semis est choisie, pas moins de 30 % de variabilité est observée sur les rendements en raison de la qualité du cumul saisonnier. Quelles relations existent-t-ils entre la qualité du

cumul saisonnier et l'occurrence des pauses pluviométriques (DS) ?

Il est généralement accepté que la persistance des facteurs dynamiques dans les basses couches de l'atmosphère permet la bonne réalisation d'une prévision climatique à court terme. C'est pour cela que la prévisibilité potentielle est souvent estimée à partir de l'analyse de la variance dans le domaine temporel et sa cohérence spatiale (Madden, 1976 ; von Storch et Zwiers, 2003 ; Moron *et al.*, 2006, Marteau, 2011). Ces considérations supposent que la variabilité saisonnière d'un paramètre climatique (vent, températures, pluie etc.) provient de deux sources : (i) la situation journalière des processus atmosphériques tels que le déplacement de la ZCIT (Sultan *et al.*, 2003), les activités des ondes et les vortex cycloniques associés (Red *et al.*, 1977 ; Janicot *et al.*, 2008), la dynamique de l'AEJ/TEJ (Grist et Nicholson 2003 ; Nicholson 2009), la présence d'aérosol (Roca *et al.*, 2005 ; Drame, 2012) etc..., et (ii) l'influence des facteurs externes tels que les températures de surface des Océans et les éruptions volcaniques. La variabilité due à la source au point (i) suggère l'existence d'une certaine saisonnalité dans l'occurrence de l'événement climatique mais n'est pas prévisible au delà d'une dizaine de jours spécialement quand il s'agit de la pluviométrie comme le montrent Sultan *et al.*, (2009). La variabilité due à la seconde source considère que la variable climatique exhibe une composante meso-échelle exprimée par une cohérence spatiale forte (Marteau, 2011). Dans ce cas de situation cette variable climatique est dite "*prévisible*" au moins par principe (von Storch et Zwiers, 2003).

Une classification multi-échelle montre que les DS s'identifient par la date de début (STDATE), la durée (L) et le nombre de cas d'occurrence par saison (F). Les pauses extrêmes (extDS) concernent exclusivement les jours secs consécutifs qui durent deux semaines ou plus, observés en début de la saison des pluies (catégorie DS4) et les DS qui durent plus d'une semaine, observés souvent vers la fin de la saison des pluies (catégorie DS3). La question qui revient souvent dans les discussions est de savoir si les pauses pluviométriques sont prévisibles.

Ce chapitre s'intéresse à la prévisibilité des DS, avec un accent particulier sur les pauses pluviométriques extrêmes (extDS). Dans un premier temps nous faisons une caractérisation multi-échelle des pauses pluviométriques et analysons leur lien avec la qualité de la saison (voir aussi les résultats de l'article en annexe E). En suite, nous déterminons les relations entre la durée et l'occurrence des pauses extrêmes et les anomalies des températures de surface

des Océans. Le décompte des DS est basé sur des séries de longueurs de pauses, extraites des données pluviométriques journalières observées au Niger (1960-2000) 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. En comparant le Niger et le Sénégal, cette étude permet d'affiner notre compréhension des similitudes et différences du Sahel central et le Sahel extrême Ouest.

## 4.2 Résumé des articles

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 associées 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. L'analyse des dates de débuts des pauses extrêmes, nous permet d'identifier les périodes à risques dans le calendrier cultural des zones soudaniennes et sahéliennes du Niger et du Sénégal. 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 associée 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. D'autres précisions peuvent être prises de l'article sur les Analyses multi-échelles des pauses pluviométriques au Niger et au Sénégal publié dans la revue *Sécheresse* (annexe E).

La répartition moyenne des dates de début d'occurrence (STDATEs) des pauses extrêmes (extDS) montre que la catégorie DS4 se produit le plus souvent en Mai-Juin-Juillet (MJJ) et la catégorie DS3 est surtout observé en Août-Septembre-Octobre (ASO). L'analyse des données historiques de STDATEs et la fréquence d'occurrence (F) révèlent que dans les années humides

on a tendance à observer des extDS précoces en début de saison, une absence des pauses de catégorie DS3 et un allongement de la saison de culture. Cependant, dans les années récentes, les événements de fin précoce de saison sont devenus plus probables en Septembre (avec une plus grande probabilité d'occurrence d'événements de catégorie DS3). Le nombre moyen mensuel de pauses extrême n'a pas changé de manière significative. Néanmoins, une forte variabilité est observée sur le signal inter-décennale de ces événements. A l'échelle intra-saisonnière, les extDS présentent également une forte cohérence spatiale qui est consistante avec l'influence à distance des anomalies de température de surface des océans. La catégorie DS4 a une cohérence spatiale plus forte, tandis que la cohérence de la catégorie DS3 est faible comme le montre Marteau (2011).

Nous associons les extDS cohérentes et tardives du début de la saison des pluies (Juin-Juillet), et les celles de fin précoce (Août-Septembre) à une situation où les températures des Océans tropicaux sont plus chaudes que la normale. Cependant, lorsque les températures des Océans Indo-Pacifique sont plus froides et la partie équatoriale de l'Atlantique sud plus chaude que la normale, nous trouvons peu ou pas d'occurrence d'extDS. Ces relations sont statistiquement significatives et montrent le rôle des océans dans les périodes et la fréquence d'occurrence de pauses extrêmes dans le Sahel.

Ces résultats montrent que les pauses pluviométriques extrêmes de catégories DS4 et DS3 observées respectivement en MJJ et ASO sont prévisibles avec les anomalies des SST des Océans tropicaux. Il reste à trouver les techniques statistico-dynamiques aptes à les prévoir. En effet Marteau (2011) a trouvé que la prévisibilité des pauses moyennes est faible à modérée en utilisant 24 membres d'une simulation de modèle ECHAM4.5 forcé par des SST observées. Par ailleurs, les modèles régionaux de climat peuvent reproduire les dates de début des pauses extrêmes de catégorie DS4 (en MJJ) et DS3 (en ASO) dans les zones ayant une pluviométrie moyenne annuelle  $\geq 600$  mm. Cependant, ils ont du mal à exhiber une performance adéquate dans la région Sahélienne. Malgré le filtre des cumuls journaliers  $< 1$  mm, l'adéquation entre la variabilité observée et simulée reste à désirer dans ces régions (voir l'annexe D). Par conséquent une prévision optimale des dates de début de pauses extrêmes doit être recherchée dans le perfectionnement de la paramétrisation des MRC et les techniques de post-traitements de leurs

sorties.

# Oceanic influence on the sub-seasonal to interannual timing and frequency of extreme dry spells over the West African Sahel

Seyni Salack · Alessandra Giannini ·  
Moussa Diakhaté · Amadou. T. Gaye ·  
Bertrand Muller

Received: 6 August 2012 / Accepted: 16 January 2013  
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013

**Abstract** Intra-seasonal drought episodes (extreme dry spells) are strongly linked to crop yield loss in the West African Sahel, especially when they occur at crop critical stages such as juvenile or flowering stage. This paper seeks to expose potentially predictable features in the sub-seasonal to inter-annual occurrence of “extreme dry spells” (extDS) through their links to sea surface temperature anomalies (SSTAs). We consider two kinds of extreme dry spells: more than 2 weeks of consecutive dry days following a rain event (often found at the beginning of the rainy season, after the first rain events) and more than a week (observed towards the end of the rainy season, before the last rain events). We extract dry spells from daily

rainfall data at 43 stations (31 stations in Senegal over 1950–2010 and 12 stations in Niger over 1960–2000) to identify the intra-seasonal distribution of extDS and their significant correlation with local rainfall deficits. Seasonality of distribution and high spatial coherence are found in the timing and the frequency of occurrence of extDS in different rainfall regions over Niger and Senegal. The correlation between the regional occurrence index (ROI), necessary to capture the spatial extent of extDS, and observed global sea surface temperature anomalies (SSTAs) sheds light on the influence of the external factors on the decadal, interannual and sub-seasonal variability of extDS over the West African Sahel. When the global tropics and the Atlantic are warmer than normal, more coherent and delayed June–July extDS are observed after onset of rainy season, as well as early cessation type in August–September. When the Indo-Pacific is cooler and the equatorial south Atlantic is warmer than normal little to no extDS are found in the onset sub-period of the monsoon season. Mostly late types of extDS occur in October as a result of late cessation. These results show potential predictability of extreme dry spells after onset and before cessation of monsoonal rain based on global patterns of sea surface temperature anomalies.

---

S. Salack (✉) · M. Diakhaté · A. T. Gaye  
Laboratoire de Physique de l'Atmosphère et  
de l'Océan–Siméon Fongang, Ecole Supérieure  
Polytechnique, Université Cheikh Anta Diop,  
BP 5085 Dakar-Fann, Dakar, Senegal  
e-mail: seyni.salack@ucad.edu.sn; abutawakalt@gmail.com

S. Salack  
Centre d'Etude Régional pour l'Amélioration de  
l'Adaptation à la Sécheresse (CERAAS),  
BP 3320 Thiès Escale, Thiès, Senegal

A. Giannini  
International Research Institute for Climate and Society,  
The Earth Institute, Columbia University,  
New York, NY, USA

B. Muller  
Centre International de Recherche Agronomique  
pour le Développement (CIRAD), UMR, AGAP,  
34398 Montpellier, France

B. Muller  
Africa Rice Center, AfricaRice,  
Sahel Regional Station, BP 96, Saint-Louis, Senegal

**Keywords** Extreme dry spells · Seasonality · Spatial coherence · Regional Occurrence Index · SST anomaly · Niger and Senegal · West African Sahel

## 1 Introduction

Seasonal forecast and other climate outlooks over West Africa are mostly issued in terms of the expected seasonal total—above, below or normal rainfall amounts. For

example, every year in May–June, the meeting of the PRESAO (*Prévisions saisonnières pour l'Afrique de l'Ouest*, or West African climate outlook forum) publishes the results of a consensus forecast on the probability that the upcoming seasonal amount of rainfall will be above, below or normal (PRESAO\_SG 2011). This forecast does not say how this total amount of rainfall will be distributed within the upcoming season. Conversely, farmers want information on the intraseasonal distribution of rainfall events. The main reason is that the intra-seasonal episodes of “rainless days” or dry spells (DS) affect crop development and productivity, especially when they occur at crop critical stages (Sivakumar 1992). Current knowledge of seasonal forecasting as exemplified by the PRESAO process does not provide this information.

A dry spell (DS) is a function of starting date (STDATE), duration (L) and seasonal frequency of occurrence (F). An empirical assessment of DSs by Salack et al. (2012) reveals that at the beginning of the rainy season, in May–June–July (MJJ), DS greater than 2 weeks (DS4 category) may be associated with important rain events. These “false start” rain events cause seed abortion as a result of water stress at the juvenile stage of field crops such as millet and sorghum in the West African Sahel (Ati et al. 2002; Sultan et al. 2005). Other DS types, of 1–2 weeks duration (DS3 category), may be found in the August–September–October period (ASO). They usually have a negative impact on the vegetative and reproductive phases of millet (Winkel and Do 1992). Both DS4 and DS3 categories are highly correlated to severe annual rainfall deficits (or drought) (Sivakumar 1992; Salack et al. 2011), especially if they occur in the same season (Salack et al. 2012). Therefore, we define two categories of extreme dry spell episodes (extDS, henceforth): those characterized by two or more weeks of consecutive dry days following a rain event, which are often found at the beginning of the rainy season ( $DS \geq 15$  days, or DS4), and those lasting more than a week mostly found towards the end of the rainy season ( $DS = 8$ –14 days or DS3). The seasonal frequency of occurrence of these extDS is low compared to the short and medium categories (Sivakumar 1992; Salack et al. 2011). Henceforth these two categories of extreme dry spells are qualified as “extreme events”.

The proper knowledge of the distribution and forecasting potential of extDS's is important for seasonal food security and drought crisis alleviation in the Sudan and Sahel regions of West Africa. To present, the seminal empirical dry spell analyses by Sivakumar (1992) have not been updated. However, the recovery tendencies in the Sahel rainfall regimes associated with high variability in the seasonal and interannual time scales (Bell and Lamb 2006; Lebel and Ali 2009; Salack et al. 2011) and the perspectives of increasing extreme events in the nearest

future (IPCC 2012) suggest the need for new approaches to analyze extDS over this region. Several schemes were suggested for forecasting dry spells, which do not focus specifically on extDS. They include: (1) the schemes based on the adjustment of a probability density function to the empirical distribution of average dry spell length (Martin-Vide and Garcia 1993; Denise et al. 2009); and (2) the schemes based on estimating the return period to forecast extDS occurrence (Lanà et al. 2008). However, these statistical methods are known for their stationary characteristics and the lack of sufficient observed data can also be a limiting factor to their use in this region. Recent attempts by Sane et al. (2008), Frappart et al. (2009) and Salack et al. (2011, 2012) to characterize dry spells over Senegal, Niger and the Gourma region (central Sahel) do not address the predictability of extDS nor do they relate their occurrence to the large scale influence of the Oceans.

This paper addresses two main questions: (1) are there potentially predictable features in the seasonal and inter-annual occurrence of extreme dry spells, e.g. as evidenced by spatial coherence in their recurrence? (2) given such spatial coherence, how does variability in the characteristics of dry spells relate to the sea surface temperature anomalies (SSTAs)? The potential predictability of extDS's can be derived from the analysis of a network of daily rainfall observations over a relatively small, homogenous region, as demonstrated by Moron et al. (2006) and Marteau (2011) for seasonal frequency of rainy days, rainfall amount and medium category of dry spells. The spatial coherence can be estimated by testing the statistical significance of the inter-station correlations. Hence, a study of the inter-station correlations with respect to the distance across pairs of raingauges shows how far spatial coherence can be observed in the spectrum of extDS's. Seasonality in the intra-seasonal dry spell oscillations and high spatial coherence between stations are both indicators of potential predictability (Moron et al. 2006). This approach is used, in this paper, to show that the sub-seasonal variability of extDS's can be due to two sources: (1) the daily fluctuation of some internal factors of the West African summer monsoon such as the Intertropical Convergence Zone (ITCZ), African Easterly Jet (AEJ), Tropical Easterly Jet (TEJ) etc. and (2) the influence of external factors such as SSTAs.

Our analyses of extreme dry spells use observed and quality controlled station data and the Hadley Centre Improved SST data set (Sect. 2). The definition and typology of dry spells are derived from a single and multiple raingauge extraction algorithm and classification developed by Salack et al. (2012), (and the establishment of a regional occurrence index (ROI) necessary to capture extreme dry spells (Sect. 3). The seasonality in extDS timing and frequency, their spatial coherence, the

relationships between extDS variability and the quality of the rainy season, and their links to Oceans' surface temperature anomalies are provided in Sect. 3. The concluding remarks of this study are given in Sect. 4.

## 2 Data

### 2.1 Station data and rainfall climatology

For Senegal, a 31-raingauge data set was made available by the Regional Centre for the Improvement of Plant Adaptation to Drought (*Centre Régional pour l'Amélioration de l'Adaptation à la Sécheresse* (CERAAS)). The data set includes daily rainfall records from the network of the former National Meteorological Agency (actual *Agence Nationale de l'aviation Civile et de la Météorologie du Sénégal* (ANACIM)) and other raingauges managed by the Senegalese Institute for agricultural research (*Institut Sénégalais de la Recherche Agricole* (ISRA)), and by CERAAS for crop monitoring and forecasting (additional information can be taken from Salack et al. 2011).

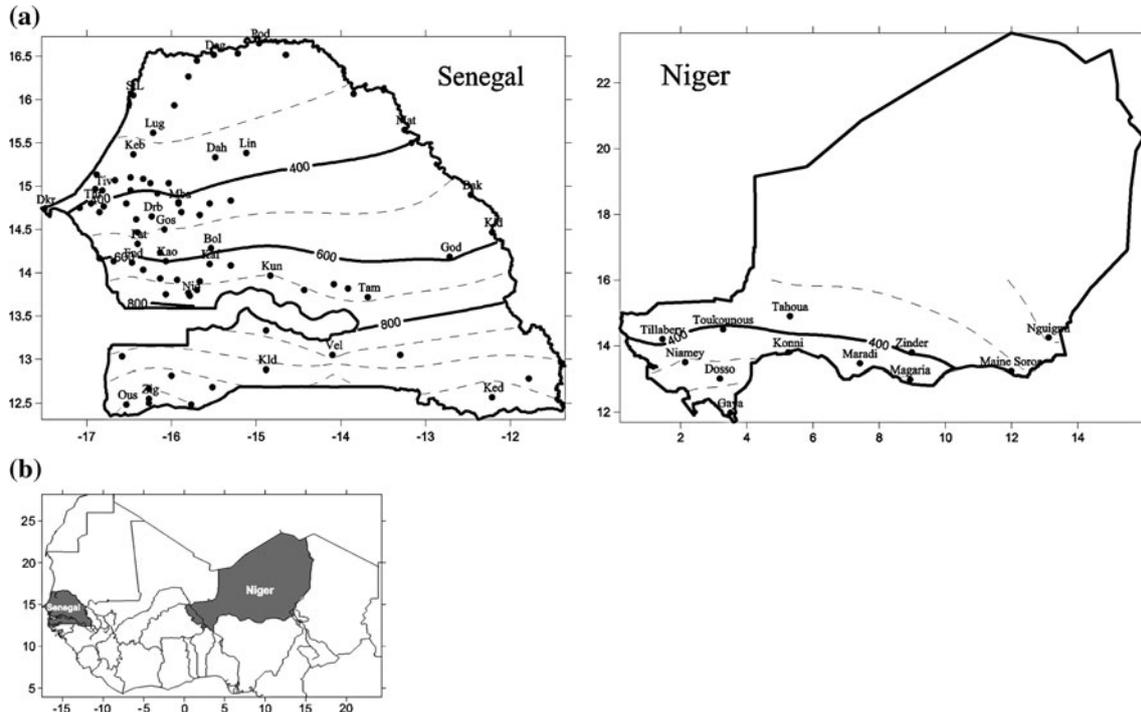
Senegal is located at the extreme western edge of West Africa, with a marked coastal influence on its atmospheric dynamics. The rainfall climatology reveals four different rainfall zones in Senegal (Fig. 1a). The northern zone (NZ) has an average annual rainfall below 400 mm. The North Central zone (CN) is between 400 and 600 mm. The South Central zone (CS) is located between 600 and 800 mm annual average. The southern zone (SZ) is the entire region where average rainfall exceeds 800 mm/year (Fig. 1a). Rainfall intensity is high and rainy days are more frequent in the central (CN, CS) and southern (SZ) zones than in the northern regions (Dieng et al. 2008). This zonation is consistent and correlated with on-farm agronomic conditions and the natural agro-ecological zones found in these regions (Moron et al. 2006, Salack et al. 2011). Starting in the early 1970s, a 10–20 % rainfall deficit lasted almost three consecutive decades. Since the late 1990s, this deficit was significantly reduced; hence rainfall has been recovering from the mid-1980s drought situation. According to Salack et al. (2011), there is a statistically significant return of intense daily rainfall amounts and an increase in the occurrence of short dry spells in accordance with the increase in the number of rainy days. As compared to decades of drought such as the early 1970s and late 1980s, the past 15-year rainfall trend exhibits significant differences in the range of +10 to +17 % at sub-regional scale and +23 to +32 % at raingauge scale. These inter-decadal trends are more pronounced in the Sudan and Sahel regions of Senegal (i.e. CN, CS and NZ) where the average annual

rain records are below 800 mm. The recovery pattern over Senegal is consistent with what was reported by Lebel and Ali (2009) for the central and eastern Sahel, and by Frappart et al. (2009) for the Gourma region.

For Niger, the daily data set comes from the National Meteorological office in Niamey. Daily rainfall records are available for 12 stations over 1960–2000. Niger is continental, with 90 % of its land covered by desert. Here, too, frequency and intensity of rainfall decrease from south to north, with average values oscillating between 800 mm and 100 mm per year. In fact, only Gaya station has average rainfall totals around 800 mm. Two thin rainfall regions are observed from the spatial distribution of rainfall, north of Gaya (Fig. 1b). The southwest and west, including stations of Magaria, Maradi, Konni, Dosso, Niamey and Tillabery, fall within the 600–400 mm rainfall zone. Anywhere north of this rainfall zone, average rainfall is less than 400 mm/year. Despite its arid and semi-arid climate characteristics, Niger is part of the central Sahel, whose rainfall has also increased over the past two decades (Lebel and Ali 2009; Ali and Lebel 2009). The space–time variability of rainfall in this region of the West African Sahel was extensively analyzed at local and regional scales in recent years, with many contributions stemming from the *African Monsoon Multidisciplinary Analyses* program (AMMA program, Redelsperger et al. 2006; Lebel et al. 2010).

### 2.2 Sea surface temperature anomalies

In the Sahel, it is well known that sea surface temperatures (SSTs) account for most seasonal, interannual and decadal rainfall variability (Folland et al. 1986; Fontaine et al. 1998; Giannini et al. 2003; Hoerling et al. 2006 amongst others). Correlation analysis with observed SSTs and simulation experiments based on atmospheric global circulation models support the idea that Atlantic Ocean, equatorial Indian Ocean and tropical Pacific Ocean (through the El Niño–Southern Oscillation phenomenon, or ENSO) temperature anomalies modulate summer Sahel rainfall (Folland et al. 1986; Janicot et al. 2001; Mohino et al. 2011), including the spatial extent of drought during El Niño events (Lyon 2004). Is extreme dry spell occurrence also related to SST anomalies? To answer this question, we use the observed Hadley Centre Improved SST data set (Rayner et al. 2003). HadISST is a monthly SST archive from 1870 to present. We extracted SST during the period 1950–2010. Then we constructed sub-seasonal SST anomaly indices (SSTAs) by subtracting the climatology. These global SSTAs are regressed against the regional occurrence index (ROI) of both Niger and Senegal to assessment the links between the sub-seasonal occurrence of extDS and the Ocean temperature anomalies (Sect. 3).



**Fig. 1** Orientation maps and rainfall climatology of the study areas. **a** Location and overlay isohyets of 1981–2010 average rainfall for Senegal. The labelled dots are encoded names of the 31 stations with

long term daily rainfall (1950–2010). **b** Location of stations and overlay isohyets of 1971–2000 average rainfall for Niger, and full name of the station with long term daily rainfall (1960–2000)

### 3 Analysis of extreme dry spells and their links to SST anomalies

The analyses of extreme dry spells are based on a single and multiple rain gauge extraction algorithm and classification developed by Salack et al. (2012), and the establishment of a regional occurrence index (ROI) to capture the spatial coherence of extreme dry spell types.

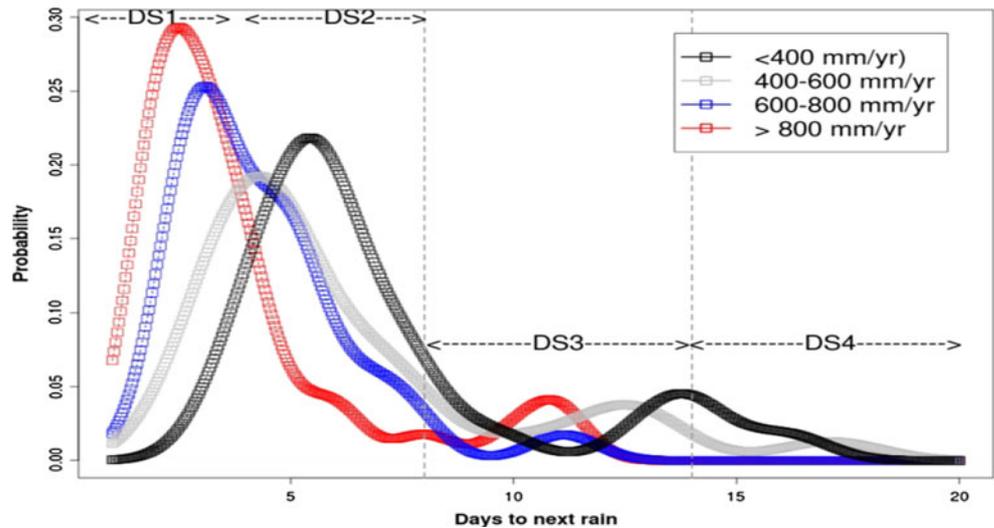
#### 3.1 Dry spells extraction and typology

At the level of the rain gauge (local scale), we adopted the threshold of 0.1 mm/day to define a rainy day in order to capture all daily rainfall events (RR) recorded on the observer's note book. All daily records are coded into alternating 1 and 0 (for rainy and dry days respectively). After each rainy day, we count the following consecutive dry days (i.e. sequence of days in which  $RR = 0$ ) to define a dry spell (DS). The total numbers of consecutive dry days before the next rainy day is the duration or length (L) of the DS. The Julian day of first count corresponds to the onset date (STDATE). The total number of DS with length L found in a season is the frequency of occurrence (F). Extractions are made on the basis of "the first rainfall event recorded by the rain gauge after May 1st". This principle helps extract all types of dry spells irrespective of a

predefined onset date of the rainy season at a station as stated by Sivakumar (1992). This approach is a way to account for the high spatial variability of onset dates of rainy seasons over the Sahel. As we know, these onset dates of rainy seasons are not observed, rather they are computed based on a rainfall threshold (e.g. the classical Sivakumar method (Sivakumar 1988), Agrhymet-FEWS method (Agrhymet 1996)). They exhibit high internal variability in the recent years as reported by Marteau (2011) and Salack et al. (2011). Therefore our methods of extraction and classification of dry spells can help identify optimum cropping periods. The extraction algorithm is applied to each station, for all the available time series, such that every year's record of  $DS_L$  is identified. This procedure defines the local dry spell (DS) database for both Senegal and Niger.

Dry spells are analyzed using their starting date (STDATE), duration i.e. the number of days to the next rains (L) and frequency of occurrence per season (F). These are key indicators of the daily rainfall events' distribution during the cropping season. The STDATEs, the indicators of DS calendar, are extracted at irregular time intervals. To obtain uniform sampling in time, these dates in the Julian calendar are rounded to the pentad or the month in which they fall. Figure 2 depicts the average seasonal frequency-duration curves of DS in the reference rainfall regions

**Fig. 2** Average seasonal probability distributions of all categories of dry spells depicted at all reference rainfall regions

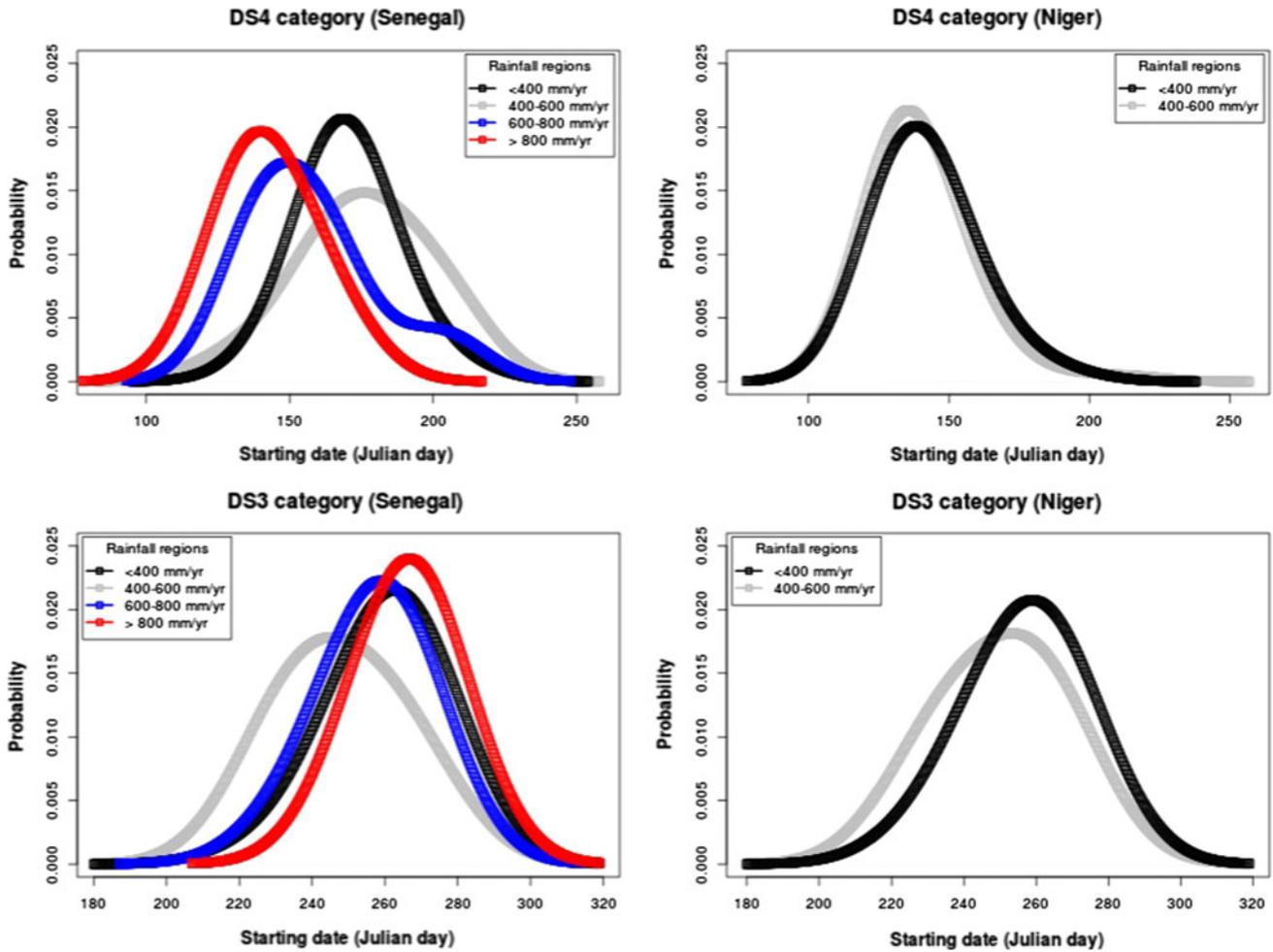


identified in each country (see Fig. 1). The categories of dry spells are identified with the vertical dotted lines and horizontal arrows showing the nominal extent of  $L$  of each on the probability distribution function (PDF). From the space-time characteristics of these three components (STDATE,  $L$  and  $F$ ) in Niger and Senegal, short and medium duration DS are classified as “ordinary dry spells” because they are often observed in any rainy season (Salack et al. 2011, 2012). The short categories of DS are 1–4 days (DS1) and 5–7 days (DS2). The medium category of observed DS is the class of 8–14 days (DS3). The long dry spells category is the set of DS greater than 2 weeks (DS4). Categories DS1 and DS2 are more frequent in the regions of the two countries where average annual rainfall is above 600 mm. These regions correspond to the Sudan zone in Niger, Sudan and North Guinea zones in Senegal. DS1 and DS2 are also classified as short in other arid and semi-arid areas of Africa (Sivakumar 1992; Barron et al. 2003; Segele and Lamb 2005). In agricultural practice, the DS1 and DS2 categories are not detrimental to crop development, but show high frequency of rainfall events in those regions. However, DS3 and DS4 are irregular and have a low number of occurrences per season. They are mostly responsible for the skewed portion of the PDF, which is very hard to adjust using a probability model according to Denise et al. (2009).

### 3.2 Seasonality of extreme dry spells

Long-term PDFs issued from the starting dates (STDATE) of DS4 and DS3 are illustrated by Fig. 3 for Senegal and Niger respectively. These are PDFs for all stations that lie within a reference rainfall region. The PDFs are then converted into cumulative PDFs and the most common STDATEs (between the 2.5th and 97.5th percentiles) are extracted. This gives the range of STDATEs summarized in

Table 1. The results in this table correspond to the highest mode of variability of STDATEs in the intra-seasonal time scale and depict the seasonality in the occurrence of extDS at different rainfall regions of the study area. An analysis of Table 1 reveals a clear similarity of the risk periods over Niger and southern Senegal (regions of 600–800 and >800 mm/year) in the MJJ sub-period. The occurrence of extDS’s in May–June is related to the onset of the rainy season. As stated earlier by Sultan and Janicot (2003), Janicot et al. (2008) and Nicholson (2009), the onset of the African summer monsoon is linked to an abrupt latitudinal shift of the Intertropical Convergence Zone (ITCZ) from a quasi-stationary location at 5°N in May–June to a second quasi-stationary location at 10°N in July–August. The atmospheric circulation is characterised by successive northward excursions of the monsoon flux mostly driven by the Saharan heat-low at a 3–5-day time scale (Couvreur et al. 2010). This monsoon flux is responsible for the intermittent rainfall events associated with the 2–3-week duration dry spells. Therefore the similarity between May and June average STDATEs over Niger and southern Senegal confirms the spatial coherence in the onset of the rainy season. However, a time lag of 20 days to a month is found between southern Senegal (Niger), and northern Senegal, where rainfall is less than 600 mm/year. In these northern regions, the periods of high risk of extDS’s occurrence extend beyond mid-July (Table 1). At the end of the rainy season, the occurrence of extDS denotes early cessation of the rainy season (Sivakumar 1992). In Niger and Senegal, the cessation dates are uniformly observed in the interval between the 1st dekad of September and the 1st dekad of October, except for the dryer regions of Senegal (where average annual rainfall is <400 mm). This result is in line with those found by previous studies using rainfall amount rather than dry spells (Le Barbé et al. 2002; Lebel and Ali 2009 and Salack et al. 2011).



**Fig. 3** Empirical probability distribution extreme dry spells occurrence dates as depicted from each rainfall region from the 1950–2010 daily rainfall time series

The average distribution of starting dates shows that the DS4 category ( $DS \geq 15$  days) occurs often in May–June–July (MJJ) and the DS3 category (8–14 days) is mostly observed in August–September–October (ASO) (Salack et al. 2012). Crop simulation experiments over Niamey (in Niger) show that these rain events can cause 35–50 % millet yield loss as a result of the subsequent water stress due to long dry spell occurrence (Sultan et al. 2005). As a result, in the remainder of this paper we will focus on these events: DS4 dry spells in MJJ and DS3 dry spells in ASO, which we refer to collectively as extreme dry spells.

### 3.3 Regional occurrence index of extreme dry spells

In order to capture the climatic signal of the DS3 and DS4 categories of extreme dry spells whose STDATEs fall between May and October, we define a regional occurrence index (ROI). We write the individual raingauge time series of monthly number of extDS as  $F_{mM}$ ,  $F_{mN}$ ,  $F_{mP}$ ,  $F_{mQ}$ , the elements of  $m \times M$ ,  $m \times N$ ,  $m \times P$ ,  $m \times Q$  dimension

matrices for each rainfall region (e.g. <400, 400–600, 600–800 and >800 mm/year respectively). The country-wide, yearly ROI is a column vector whose elements are calculated in the form of Eq. 1.

$$ROI_m = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \dots \\ \dots \\ \dots \end{pmatrix}$$

with

$$f_m = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M F_{mi} + \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N F_{mj} + \frac{1}{P} \sum_{k=1}^P F_{mk} + \frac{1}{Q} \sum_{l=1}^Q F_{ml} \quad (1)$$

The elements  $f_1, f_2, f_3 \dots$  are the monthly totals of the average number of cases ( $F$ ) of extDS of category DS4 in May, June, July (category DS3 in August, September,

**Table 1** Main seasons of extreme DS occurrence after onset of rainy season for different rainfall regions over Niger and Senegal

Country	Sub-season	Rainfall regions			
		<400 mm/year	400–600 mm/year	600–800 mm/year	>800 mm/year
Niger	May–June–July	19-May to 8-June	19-May to 8-June	–	–
	Aug–Sept–Oct	6-sept to 6-Oct	6-sept to 6-Oct	–	–
Senegal	May–June–July	29-May to 18-July	29-May to 18-July	19-may to 8-June	19-may to 8-June
	Aug–Sept–Oct	17-Aug to 26-Sept	6-sept to 6-Oct	6-sept to 6-Oct	6-sept to 6-Oct

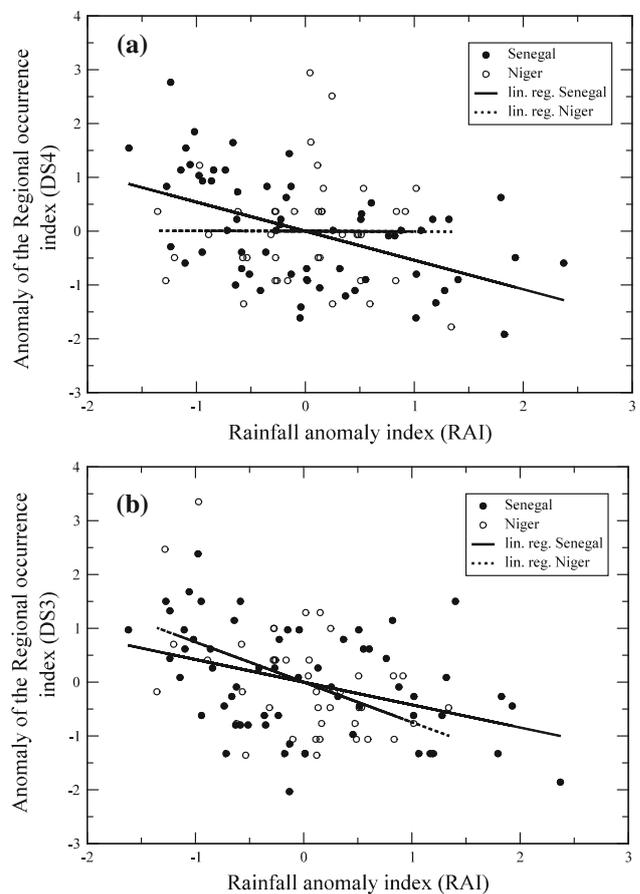
These dates are depicted from the assessments of starting dates (STDATE) extracted in 1960–2000 (Niger) and 1950–2010 (Senegal)

October).  $m$  are the treated months in a year ( $m = M, J, J$  (A, S, O)) and  $i, j, k, l$  ( $i = j = k = l = 1, 2, 3, 4, \dots$ ) are the raingauge counts with  $M, N, P, Q$  being the total number per rainfall region. The terms used to compute  $f_1, f_2, f_3, \dots$  change according to the number of rainfall regions found in a country. In the case of Niger, they reduce to the first two terms of Eq. 1. The areal values of the ROI corresponds to the total area average number of extDS observed in a rainfall region. The sub-seasonal cumulative ROI's (i.e. MJJ, ASO sub-seasons) are regressed against the standardized annual rainfall anomaly index (RAI) of each country and the global SSTAs. The objective is to look for the statistically significant correlations between the quality of the rainy season, remote ocean surface temperature anomalies and the seasonal occurrence of extDS in the MJJ (DS4 category) and ASO (DS3 category) periods (see Sects. 3.4, 3.6).

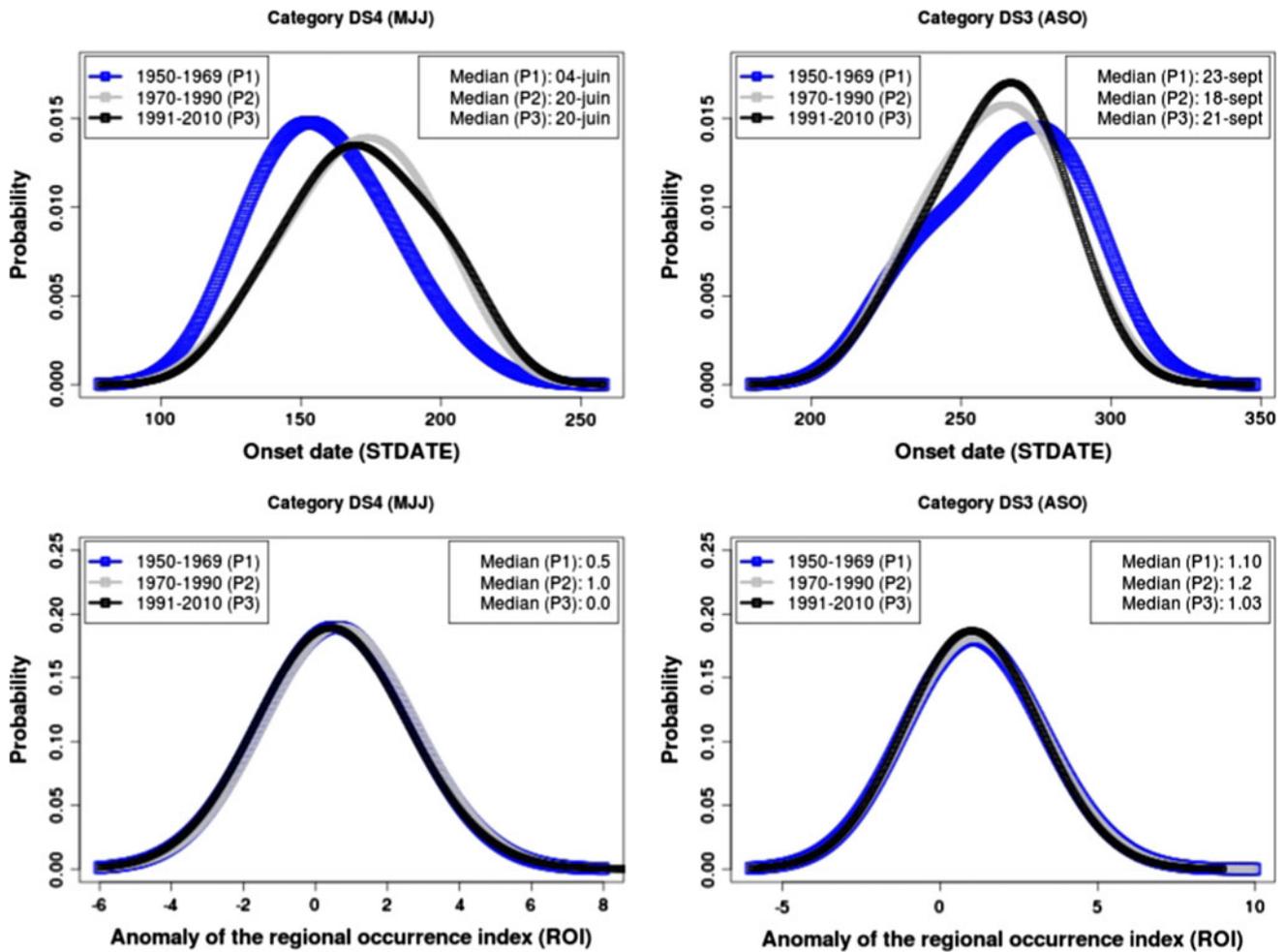
### 3.4 Implications for the quality of the rainy season

Is there a relationship between the occurrences of extDS's and the final state of the rainy season (i.e. below, near or above normal precipitation)? In order to determine the state of each season, we use the standardized precipitation index averaged over each country (henceforth called rainfall anomaly index, RAI). To the RAI we apply the Ali and Lebel (2009) criterion: we consider a year to be wet when its RAI value is higher than 0.5; normal when the RAI value is in the range  $[-0.5, 0.5]$ ; and dry when RAI value is below  $-0.5$  (Ali and Lebel 2009). Figure 4a, b presents the scatter plot and a regression line graph of the RAI against the anomalies of the average regional occurrence index (ROI) of each country. The correlation coefficients are all negative ( $r = -0.50$  ( $r = -0.15$ ) in the upper panel and  $r = -0.4$  ( $r = -0.46$ ) in the bottom panel for Senegal (Niger) and significant at 95 % confidence level, using a two-tailed  $t$  test (von Storch and Zwiers 2003). Only the case of Niger in the MJJ sub-seasonal where  $r = -0.15$  in not statistically significant. The low correlation observed over Niger is explained by the fact that the occurrence of DS4 events only is frequent in normal rainy seasons. Beside the statistical significance, the negative signs of these correlation

coefficients are very important result. In other words, the occurrence of extreme dry spells over these two countries is related to annual rainfall deficits. Sivakumar (1992) had shown that this relationship can be fitted by a negative power exponential function and the correlation coefficients can reach 0.89 at most stations in the Sahel and Sahel-Sudan



**Fig. 4** Relationship between annual rainy season's quality (expressed as a rainfall anomaly index, RAI) and the occurrence of extreme dry spells. A year is wet when its RAI value is higher than 0.5; a near normal year has a RAI value in the range  $[-0.5, 0.5]$ ; and a dry year is one whose RAI value is below  $-0.5$  (Ali and Lebel 2009). **a** May–July DS4 category's occurrence anomalies versus rainfall anomalies. **b** Aug–Sept DS3 category's occurrence anomalies versus rainfall anomalies. Negative anomaly of the regional occurrence index (ROI) is equivalent to absence of extreme dry spell



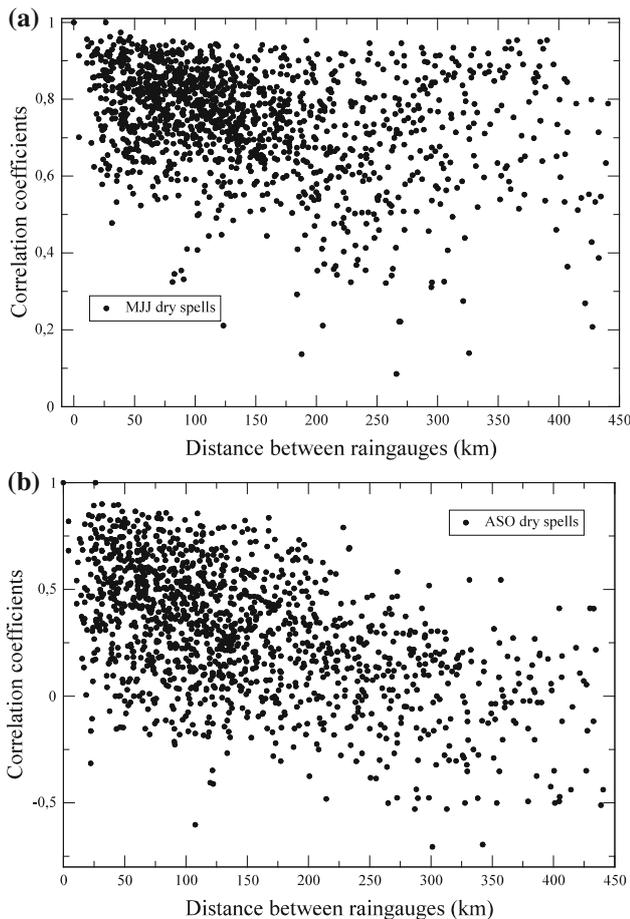
**Fig. 5** Sub-seasonal distribution of extreme dry spells (extDS), DS4 category ( $DS \geq 15$  days) in May–June–July (MJJ), and DS3 category (8–14 days) in August–September–October (ASO). In the upper panel

(a, b) are the onset dates (STDATE), in the lower panel (c, d), the monthly number of occurrence. The reference periods are P1 (humid), P2 (drought) and P3 (recovery)

regions of West Africa. Salack et al. (2012) show that when both DS4 and DS3 events are observed during the same year (in MJJ and ASO respectively) then the rainy season of that year is extremely dry. However, if only DS4 or DS3 is observed over one-third of the rain gauge network the rainy season of that year is normal to dry.

It is unanimously accepted that rainfall regimes in the Sahel have had different spatio-temporal patterns from the 1950s to present (Lebel and Ali 2009). A majority of recent reports distinguish three reference periods: humid 1950–1969 (P1), dry 1970–1990 (P2) and “recovery” starting from the end of the 1990s (P3) (Ozer et al. 2003; Nicholson 2005; Bell and Lamb 2006; Agrhymet (2010)). For example, an assessment of daily rainfall over Senegal (Salack et al. 2011) reveals that in recent years (P3), the onset date of the rainy season has not undergone a statistically significant change, compared to the previous dry period (P2). Rather, onset dates are embedded within long

dry spells. This situation can explain the high interannual variability of rainfall in recent years. The monthly distribution and number of cases of extDS are depicted in the Fig. 5 (upper panel). According to the onset dates (STDATE), the shift of the PDF towards the 1<sup>st</sup> half of June shows that in 1950–1969 (P1) extDS were more frequent earlier, in May–June. In contrast, since 1970 (P2 and P3), this mode of variability is centred on June–July. The extDS of category DS3 is later, in P1 as compared to P2 and P3. In other words, humid years tend to exhibit early extDS occurrence of category DS4 and longer cropping season with later DS3 events. On the contrary, in recent years, whose annual total rainfall regime seems closer to normal, early cessation events are more likely in September (with a higher probability of occurrence of DS3 events). The monthly average number of extreme dry spells has not shown a significant change in the study area as revealed by Fig. 5 (bottom panels). Nevertheless, a strong variability is



**Fig. 6** Inter-raingauge correlation coefficients w.r.t. inter-raingauge distance. **a** In the MJJ sub-period, the spatial coherence is shown by the dense significant correlation coefficients (0.6–1) from 0 km up to ~150 km. **b** In ASO sub-period the spatial coherence is limited to 0 up to ~70 to 100 km

observed on the decadal signal of these events. These results are in agreement with the conclusions of the IPCC Special Report on Extremes (SREX), which noticed an increase in length of drought episodes and interannual variability over West Africa (IPCC 2012).

### 3.5 Measures of spatial coherence

Is there a predictable, large-scale pattern in the occurrence of dry spells? To answer this question, STDATES are associated to the durations (L). To obtain uniform sampling in time, the dates in the Julian calendar are rounded to the pentad in which they fall. When there is no extDS, the pentad takes the value zero (i.e.  $L = 0$ ). This provides a regular time series of L in MJJ, ASO of each year at each raingauge. The average seasonal cycle of L, at pairs of raingauges, are then correlated. Examples of seasonal cycles of L at individual raingauges (local dry spells) are given by Salack et al. (2012). A correlation matrix is computed using the actual durations

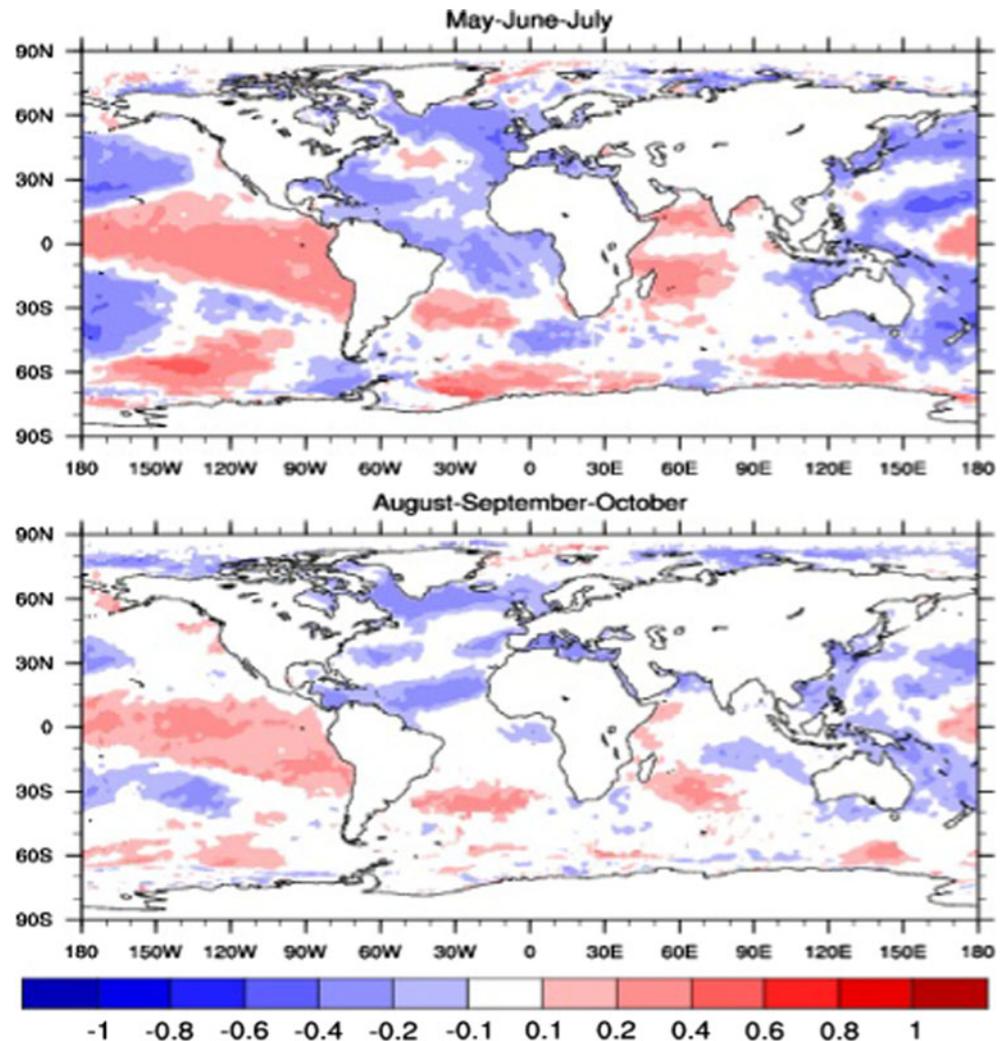
(L) at pairs of raingauges. Likewise, raingauges' coordinates (longitude and latitudes) are used to compute the matrix of distances across pairs of raingauges.

Spatial coherence is found by testing the statistical significance of the correlations between pairs of raingauges (inter-raingauges correlation, hereafter). In each country, the similarity of the inter-raingauges correlation coefficients is assessed with respect to the distance between pairs of raingauges (Fig. 6). The scatter plot of correlation coefficients is presented with respect to the distance between pairs of raingauges (km) for both MJJ (Fig. 6a, ASO Fig. 6b). In MJJ, a high density of correlation coefficients significant at 95 % level ( $r = 1$  to  $r = 0.5$ ) are depicted between 0 and 150 km inter-raingauge distance. This shows that DS occurring in MJJ can be spatially coherent from a given raingauge up to other surrounding raingauges over a radius of 150 km. Beyond this spatial extent, the high correlation coefficients seen on Fig. 6a are due to long-term climatological analogues between raingauges. In ASO the spatial correlation of DS occurrence exhibits lower spatial coherence, limited to approximately 70–100 km: significant inter-raingauges correlations ( $r = 1$  to  $r = 0.5$ ) decrease more rapidly with inter-raingauges distance (Fig. 6b). This sub-seasonal period includes peak and retreat phases of the rainy season in both Niger and Senegal. Therefore, a situation of mesoscale extDS (DS3 category) can possibly be followed by isolated convective rainy days at some stations, especially in the regions above 800 mm/year.

### 3.6 Relationship between extreme dry spell occurrence and SST anomalies

It is well established that rainfall variability in the Sahel is closely linked to SST anomalies (Vizy and Cook 2002) with the Atlantic, Pacific and Indian Oceans all playing a role (Folland et al. 1986; Janicot et al. 2001; Giannini et al. 2003; Mohino et al. 2011). Figure 7 shows the regression between global SSTs and the regional occurrence index (ROI) of extreme dry spells (DS4 and DS3) in each sub-season. Strong anti-correlations are found between the occurrence of the DS4 category of extreme dry spells in MJJ and SST anomalies in the entire tropical Atlantic. Conversely, the occurrence of the DS3 category in ASO is anti-correlated with SST anomalies in the subtropical north Atlantic only. A strong, widespread correlation is found between the occurrence of extreme dry spells (DS4, DS3 categories) and the equatorial Pacific and Indian Oceans (global tropics, henceforth). We hypothesize as follows. Global tropical mean sea surface temperature sets the vertical stability globally from the top down through deep convection (Neelin et al. 2003; Chiang and Sobel 2002), while the tropical Atlantic modulates it locally from the surface up through

**Fig. 7** Inter-seasonal correlation between global SST anomalies and the inter-annual regional occurrence index of extreme dry spells at sub-seasonal periods over Niger and Senegal

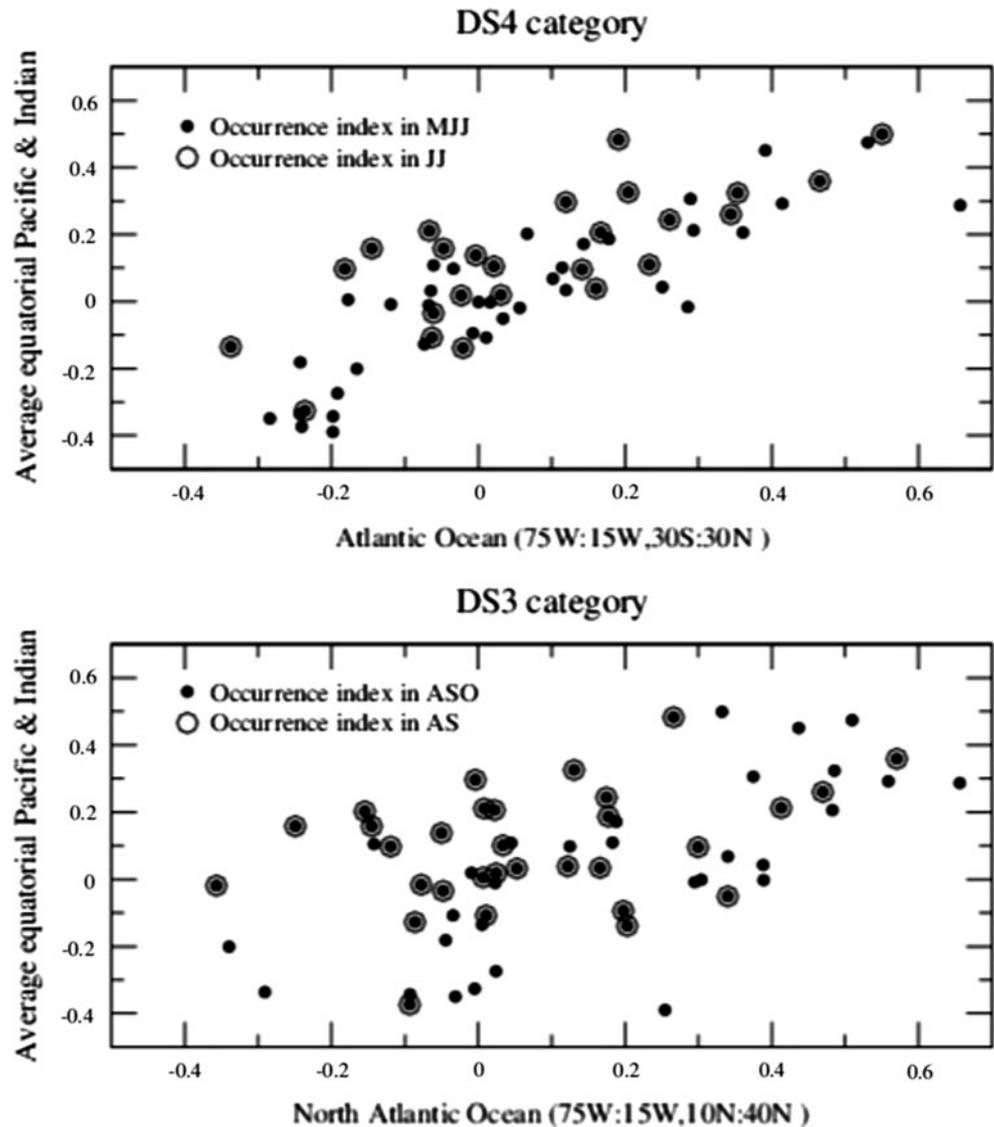


atmospheric moisture supply (Giannini et al. 2008). Warmer global tropical SSTs set a higher threshold for convection, which is met less frequently, hence the positive correlation in the greater frequency of dry spells. A higher threshold for convection is met less frequently, that is, unless the tropical Atlantic also warms. In this case, increased moisture flow in the monsoon can meet the higher threshold, and result in reduced frequency of occurrence of extreme dry spells. The difference in the tropical Atlantic regions of correlation involved during MJJ and ASO points to variations in the regions of moisture origin that will be investigated in further diagnostic work.

The scatter plot in Fig. 8 aligns along a steep slope the Atlantic, Indo-Pacific temperature anomalies and timing and occurrence of extDS. The full circles represent the total number of cases of extDS observed in MJJ (DS4 category) and ASO (DS3 category). The open circles depict the number of cases occurring only in JJ and AS (DS4, DS3

respectively). When the global tropics and the tropical Atlantic are warmer than normal, more coherent and delayed June–July extDS are observed after the onset of rainy season, as well as early cessation types (DS3, 8–14 days) in August–September (upper right quadrants of FIG. 8). This relationship is statistically significant at the 95 % confidence interval according to a “pooled variance” Student *t* test (von Storch and Zwiers 2003) ( $R^2 = 64$  and 27 for MJJ and ASO respectively). However, when the global tropics are cooler but the equatorial south Atlantic is warmer than normal, a lower threshold for convection is met. No extDS are found in the onset sub-period of the monsoon rainfall. Mostly late DS3 types of extDS are observed in October as a result of late cessation (lower right quadrants of FIG. 8). This is consistent with the occurrence of wet years (Giannini et al. 2012). From a global perspective and on interannual timescales, the global tropics remain the largest known source of rainfall predictability in the Sahel.

**Fig. 8** Sub-seasonal relationship between the occurrence of extreme dry spells and the state of the Indo-Pacific and Atlantic Oceans. The upper window depicts the extreme dry spells occurring in May–June–July. The bottom plot depicts the extreme dry spells occurring in August–September–October. The *full circles* indicate the average number of cases of extDS found in MJJ (ASO) and the *open circles* depicts the special cases of June–July and August–September



#### 4 Conclusion

The analysis of extreme dry spells (extDS) from station records of daily rainfall provides insight into their timing and seasonal frequency of occurrence. Their typology reveals two categories: (1) the irregular, longer than 2 weeks types which are associated with intermittent rain events at the beginning of the rainy season (DS4 category) and (2) the less frequent, 8–14 day-long dry spells (DS3 category), which are lethal to crops when they occur at the core of the rainy season. The average distribution of starting dates shows that the DS4 category occurs most often in May–June–July (MJJ) and the DS3 category is mostly observed in August–September–October (ASO). Their occurrence is related to false start and early cessation of rainy season, and correlates with rainfall deficits in the region.

The historical assessment of both the monthly timing (STDATEs) and frequency of cases observed (F) shows that humid years tend to exhibit early extDS occurrence of DS4 category events, and longer cropping season with fewer DS3 category events. On the contrary, in recent years, with a return to a near-normal situation in terms of total seasonal rainfall, early cessation events have become more likely in September (with a higher probability of occurrence of DS3 category events). The monthly average number of extreme dry spells has not significantly changed. Nevertheless, a strong variability is observed on the decadal signature of these events. At the intra-seasonal time-scale they also exhibit a high spatial coherence which is consistent with the remote influence of ocean surface temperature anomalies.

We associate more coherent and delayed June–July extDS after the onset of the rainy season, and early

cessation types of extDS in August–September to a situation when the global tropics and the entire tropical Atlantic are warmer than normal. In contrast, when the Indo-Pacific is cooler and the equatorial south Atlantic warmer than normal we find little to no extDS in the onset sub-period. Mostly late DS3 types of extDS occur in October as a result of late cessation. These relationships are statistically significant and prove once more the key role played by the oceans in the timing and frequency of occurrence of extreme dry spells in the Sahel.

**Acknowledgments** This research was supported by the 2012 START Partnership Enhancement Award. Special thanks to Charles S. Kauffman. The first author acknowledges the German Academic Exchange Service (DAAD) for the In-Regions Scholarship through CERAAS (#A/09/04677). SST data set recommendations were provided by Alexey Kaplan, at Lamont-Doherty Earth Observatory. Important suggestions were taken from Alban Lazar (LOCEAN). The efforts of the two anonymous reviewers to improve the quality of this paper are also acknowledged.

## References

- Agrhymet (1996) Méthodologie de suivi des zones à risque. AGRHYMET FLASH, Bulletin de Suivi de la Campagne Agricole au Sahel. Centre Régional Agrhymet, B.P. 11011, Niamey, vol 2, No 0/96, p 2
- Agrhymet (2010) Le Sahel face aux changements climatiques: Enjeux pour le développement. Bulletin Mensuel, Centre Régional Agrhymet, B.P. 11011, Niamey, Niger. Numéro special
- Ali A, Lebel T (2009) The Sahelian standardized rainfall index revisited. *Int J Climatol* 29(12):1705–1714. doi:[10.1002/joc.1832](https://doi.org/10.1002/joc.1832)
- Ati OF, Stigter CJ, Oladipo EO (2002) A comparison of methods to determine the onset of the growing season in northern Nigeria. *Int J Climatol* 22:731–742
- Barron J, Rockström J, Gichuki F, Hatibu N (2003) Dry spell analysis and maize yields for two semi-arid locations in East Africa. *Agric For Meteorol* 117:23–37
- Bell MA, Lamb PJ (2006) Integration of weather system variability to multidecadal regional climate change: the West African Sudan–Sahel Zone, 1951–98. *J Climat* 19:5343–5365
- Chiang JCH, Sobel AH (2002) Tropical tropospheric temperature variations caused by ENSO and their influence on the remote tropical climate. *J Clim* 15:2616–2631
- Couvreux F, Guichard F, Bock O, Campistron B, Lafore J-P, Redelsperger J-L (2010) Synoptic variability of the monsoon flux over West Africa prior to the onset. *Q J R Meteorol Soc* 136(1):159–173
- Denise MS, Jemain AA, Ibrahim K (2009) The best probability models for dry and wet spells in peninsular Malaysia during monsoon seasons. *Int J Clim*. doi:[10.1002/joc.1972](https://doi.org/10.1002/joc.1972)
- Dieng O, Roucou P, Louvet S (2008) Variabilité intra saisonnière des précipitations au Sénégal (1951–1996). *Sécheresse* 19(2):87–93
- Folland CK, Palmer TN, Parker DE (1986) Sahel rainfall and worldwide sea temperatures, 1901–85. *Nature* 320:602–607. doi:[10.1038/320602a0](https://doi.org/10.1038/320602a0)
- Fontaine B, Trazaska S, Janicot S (1998) Evolution of the relationship between near global and Atlantic SST modes and the rainy season in West Africa: Statistical analyses and sensitivity experiments. *Clim Dyn* 14:353–368
- Frappart F, Hiernaux P, Guichard F et al (2009) Rainfall regime across the Sahel band in the Gourma region, Mali. *J Hydrol*. doi:[10.1016/j.jhydrol.2009.03.007](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.03.007)
- Giannini A, Saravanan R, Chang P (2003) Oceanic forcing of Sahel rainfall on interannual to interdecadal time scales. *Science* 302:1027–1030
- Giannini A, Biasutti M, Held I, Sobel AH (2008) A global perspective on African climate. *Clim Change* 90:359–383. doi:[10.1007/s10584-008-9396-y](https://doi.org/10.1007/s10584-008-9396-y)
- Giannini A, Salack S, Loudon T, Ali A, Ndiaye O (2012) A reinterpretation of climate change in the Sahel linking intra-seasonal, inter-annual and longer time scales. *Sci Mag* (Under review)
- Hoerling MP, Hurrell JW, Eischeid J, Phillips AS (2006) Detection and attribution of 20th century Northern and Southern African monsoon change. *J Clim* 19:3989–4008. doi:[10.1175/JCLI3842.1](https://doi.org/10.1175/JCLI3842.1)
- 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. In: CB Field, V Barros, TF Stocker, D Qin, DJ Dokken, KL Ebi, MD Mastrandrea, KJ Mach, G-K Plattner, SK Allen, M Tignor, P.M. Midgley (eds.). Cambridge University Press, Cambridge
- Janicot S, Trzaska S, Pocard I (2001) Summer Sahel-ENSO teleconnection and decadal time scale SST variations. *Clim Dyn* 18:303–320
- Janicot S, Thorncroft CD, Ali A (2008) Large-scale overview of the summer monsoon over West Africa during the AMMA field experiment in 2006. *Ann Geophys* 26:2569–2595
- 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. *Theor Appl Climatol* 91:99–116
- Le Barbé L, Lebel T, Tapsoba D (2002) Rainfall variability in West Africa during the years 1950–90. *J Clim* 15(2):187–202
- Lebel T, Ali A (2009) Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990–2007). *J Hydrol*. doi:[10.1016/j.jhydrol.2008.11.030](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.11.030)
- Lebel T, Parker DJ, Flamant C et al (2010) The AMMA field campaigns : multiscale and multidisciplinary observations in the West African region. *Q J R Meteorol Soc*. doi:[10.1002/qj.486](https://doi.org/10.1002/qj.486)
- Lyon B (2004) The strength of El Niño and the spatial extent of tropical drought. *Geo Phys Res Lett* 31:L21204. doi:[10.1029/2004GL020901](https://doi.org/10.1029/2004GL020901)
- Marteau R (2011) Cohérence spatiale et prévisibilité potentielle des descripteurs intra-saisonniers de la saison des pluies en Afrique soudano-sahélienne : application à la culture du mil dans la région de Niamey. PhDthesis. University of Bourgogne
- Martin-Vide J, Garcia CCL (1993) Analyse par la Chaîne de Markov de la Sécheresse dans le Sud-Est de l'Espagne. *Note méthodologique. Sécheresse* 4:123–129
- Mohino E, Rodriguez-Fonseca B, Mechoso CR, Gervois S, Ruti P, Chauvin F (2011) Impacts of the Tropical Pacific/Indian Oceans on the seasonal cycle of the West African Monsoon. *J Clim* 24:3878–3891
- Moron V, Robertson AW, Ward MN (2006) Seasonal Predictability and spatial coherence of rainfall characteristics in the tropical setting of Senegal. *Mon Wea Rev* 134:3248–3262
- Neelin JD, Chou C, Su H (2003) Tropical drought regions in global warming and El Niño teleconnections. *Geo Phys Res Lett* 30(24):2275. doi:[10.1029/2003GL018625](https://doi.org/10.1029/2003GL018625)
- Nicholson SE (2005) On the question of the “recovery” of the rains in the West African Sahel. *J Arid Env* 63:615–641
- Nicholson SE (2009) On the factors modulating the intensity of the tropical rainbelt over West Africa. *Int J Climatol* 29:673–689

- Ozer P, Erpicum M, Demarée G, Vandiepenbeeck M (2003) The Sahelian drought may have ended during the 1990s. *Hydro Sci J* 48:489–492
- PRESAO\_SG (2011) Seasonal climate outlook valid for July–August–September 2011 in West Africa, Chad and Cameroon. African Centre for Meteorological Applications for Development (ACMAD)
- Rayner NA, Parker DE, Horton EB, Folland CK, Alexander LV, Rowell DP, Kaplan A (2003) Globally complete analyses of SST, sea ice, and night marine air temperature, 1871–2000. *J Geophys Res* 108. doi:[10.1029/2002JD002670](https://doi.org/10.1029/2002JD002670)
- Redelsperger J-L, Thorncroft C, Diedhiou A, Lebel T, Parker D, Polcher J (2006) African monsoon, multidisciplinary analysis (AMMA): an International research project and \_eld campaign. *Bull Am Meteor Soc* 87(12):1739–1746
- 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. *Theo App Clim* 10:1–22. doi:[10.1007/s00704-011-0414-z](https://doi.org/10.1007/s00704-011-0414-z)
- Salack S, Muller B, Gaye AT, Hourdin F, Cisse N (2012) Analyses multi-echelles des pauses pluviométriques au Niger et au Sénégal. *Sécheresse* 23:3–13. doi:[10.1684/sec.2012.0335](https://doi.org/10.1684/sec.2012.0335)
- Sane T, Diop M, Sagna P (2008) Etude de la variabilité de la saison pluvieuse au Sud en Haute-Casamance (Sud-Sénégal). *Sécheresse* 19(1):23–28
- Segele ZT, Lamb PJ (2005) Characterization and variability of Kiremt rainy season over Ethiopia. *Meteor Atmos Phys* 89:153–180
- Sivakumar MVK (1988) Predicting rainy season potential from the onset of rains in Southern Sahelian and Sudanian climatic zones of West Africa. *Agric For Meteor* 42:295–305
- Sivakumar MVK (1992) Empirical analysis of dry-spells for agricultural applications in West Africa. *J Clim* 5:532–539
- Sultan B, Janicot S (2003) The West African monsoon dynamics. Part II: the preonset and onset of the summer monsoon. *J Clim* 16:3407–3427
- Sultan B, Baron C, Dingkhun M, Sarr B, Janicot S (2005) Agricultural impacts of large-scale variability of the West African monsoon. *Agric For Meteor* 128(1–2):93–110
- Vizy E, Cook K (2002) Development and application of a mesoscale climate model for the tropics: influence of sea surface temperature anomalies on the West African monsoon. *J Geophys Res* 107(D3):4023. doi:[10.1029/2001JD000686](https://doi.org/10.1029/2001JD000686)
- von Storch H, Zwiers WF (2003) *Statistical analysis in climate research*. Cambridge University press, Cambridge
- Winkel T, Do F (1992) Caractéristiques morphologiques et physiologiques de résistance du mil (*P. glaucum*) à la Sécheresse. *Agro Trop* 46(4):339–351

# Chapitre 5

## Les sources d'incertitudes dans le forçage d'un modèle de culture à l'aide des sorties d'un modèle régional (MRC)

### 5.1 Introduction

Les progrès réalisés par les chercheurs du climat et de l'agriculture s'observent dans les outils d'aide à la décision. D'un côté, il y a un développement continu, par les agronomes, des modèles de cultures mécanistes de plus en plus précis qui permettent d'analyser et de quantifier l'effet des facteurs abiotiques (édaphiques, climatiques et chimiques) sur la croissance et la production des plantes (Dingkhun *et al.*, 2003 ; Hoogenboom *et al.*, 2003 ; Challinor *et al.*, 2004 ; Berg *et al.*, 2011) ; de l'autre, des progrès importants ont été accomplis par la communauté des climatologues dans le développement des modèles de circulation générale (MCG) pour prévoir le climat (Hourdin *et al.*, 2006 ; van der Linden et Mitchell, 2009). Bien que ces deux outils soient développés séparément, l'intérêt d'intégrer les modèles agronomiques aux modèles de climat apparaît alors de façon immédiate : cela peut permettre, à l'échelle saisonnière, de prévoir les rendements attendus des semaines voire des mois avant la récolte (Hansen *et al.*, 2006), et à l'échelle décennale, cela permettra de réaliser des projections de la productivité agricole en réponse à l'évolution du climat future (Salack, 2004 ; Traoré et Salack, 2005 ; Sarr et Salack,

2006 ; Berg *et al.*, 2011).

Le plus souvent l'intégration consiste à utiliser les sorties de modèles de climat pour forcer des modèles de cultures (Bazzaz et Sombroek, 1997 ; Rosenzweig et Iglesias, 1998 ; Gaffary *et al.*, 2002 ; Salack et Traoré, 2005 ; Salack et Sarr, 2006 ; Ben Mohamed, 2010) dont récemment les modèles régionaux de climat (Oettli *et al.*, 2011). Cependant, si la plupart des études quantifiant les impacts du climat se basent sur des sorties de modèles régionaux de climat (MRC), très peu font part des incertitudes associées à leur utilisation. Pourtant les modèles agronomiques sont très sensibles à la qualité du forçage climatique en entrée. Certaines sources d'incertitudes à l'interface plante-atmosphère dans les études d'impacts sont énumérées par Sivakumar (2006), Hansen *et al.* (2006), Sultan *et al.* (2008) et Oettli *et al.* (2011) comme suit :

1. L'inadéquation d'échelles entre le modèle de croissance et de développement des cultures (MCDC) et le modèle de climat : du fait du fonctionnement des modèles de climat, la valeur des variables climatiques simulées dépend de la résolution du modèle qui peut varier d'une dizaine à une centaine de kilomètre (Katz, 2002). Or les modèles de cultures sont pour la plupart conçus, calibrés et validés à l'échelle de la parcelle agricole pour appréhender les processus impliquant la plante, le sol et l'atmosphère à fine échelle. Même en admettant que le modèle simule mieux la moyenne climatique sur la région, un modèle agronomique fonctionnant habituellement à l'échelle de la parcelle, forcé avec de telles variables, ne pourra pas simuler le rendement agricole moyen de la zone couverte par la maille (Mavromatis et Jones, 1998 ; Hansen et Jones, 2000 ; Baron *et al.*, 2005).
2. Incertitudes des prévisions climatiques : Selon Sultan *et al.*, (2008), ces incertitudes sont relatives i) à notre connaissance du climat et de son évolution mal comprises ; ii) à la nature de la réponse de la végétation aux variations climatiques et à un changement dans la composition chimique de l'atmosphère ; et iii) aux rétroactions de la végétation et température de surface (Océans et continent) sur le climat (Hourdin *et al.*, 2010).

Afin de minimiser les biais sur la production simulée par les modèles de cultures, plusieurs études suggèrent de corriger statistiquement les sorties des modèles et des prévisions saisonnières avant de les utiliser pour évaluer les impacts sur l'agriculture (Hansen *et al.*, 2006 ; Oettli *et al.*, 2011). C'est le cas suggéré aussi par certaines études d'impacts du climat et des change-

ments climatiques sur les ressources en eau (exemple : Hagemann *et al.*, 2011). D'autres études évoquent le besoin d'utiliser des méthodes dites de descente d'échelle<sup>1</sup> (Herrera *et al.*, 2006 ; Paeth *et al.*, 2011). Ces méthodes se répartissent en deux grandes catégories (figure 5.1) : (i) les méthodes statistiques (Zorita et von Storch, 1999) et (ii) les méthodes dynamiques (Paeth *et al.*, 2011) qui reposent sur des MRC, simulant le climat local à fine résolution (20-50km). Ces méthodes dites "dynamiques", sur lesquelles portera ce chapitre, sont coûteuses en temps de calcul et reproduisent, voire amplifient, les biais des modèles de circulation globale (MCG) mais elles peuvent s'avérer très pertinentes dans le contexte du changement climatique puisque les modèles régionaux de climat (MRC) simulent toute la complexité du climat local (Jones *et al.*, 2004; Sylla *et al.*, 2010a ; Sylla *et al.*, 2010b). Les méthodes statistiques sont très simples à mettre en place, peu coûteuses en terme de temps, et peuvent également corriger efficacement les biais des MCG comme le montrent Ndiaye *et al.*, (2011). En revanche, elles nécessitent d'avoir à disposition des jeux de données longs et fiables à l'échelle locale et font une hypothèse forte de stationnarité (les relations entre la grande échelle et l'échelle locale sont invariables dans le temps) qui peut être mise à défaut si le climat change.

Ce chapitre est une évaluation des incertitudes associées à l'intégration des modèles régionaux de climat et des modèles de cultures. Son objectif particulier est d'identifier les sources d'incertitudes pour les études d'impacts utilisant des sorties de MRC et quantifier les biais introduits par une mauvaise représentation de la distribution intra-saisonnière de la pluie locale. Des simulations de sensibilité sont réalisées afin d'évaluer l'ampleur de ces incertitudes sur les résultats du modèle de cultures SARRAH. En particulier, nous investiguons les cas associés aux choix de la paramétrisation des MRC, des méthodes d'extraction en post-traitement et la distribution de la pluie simulée.

## 5.2 Méthodologie

Les MRC font de la désagrégation dynamique des MCG sur une aire limitée (Jones *et al.*, 2004 ; Sylla *et al.*, 2010a). La figure 5.2 illustre le maillage type d'un MRC à 0.44x0.44 degré de résolution couvrant le réseau pluviométrique du Sénégal. Lorsque qu'on utilise des MRC

---

1. « downscaling » en anglais

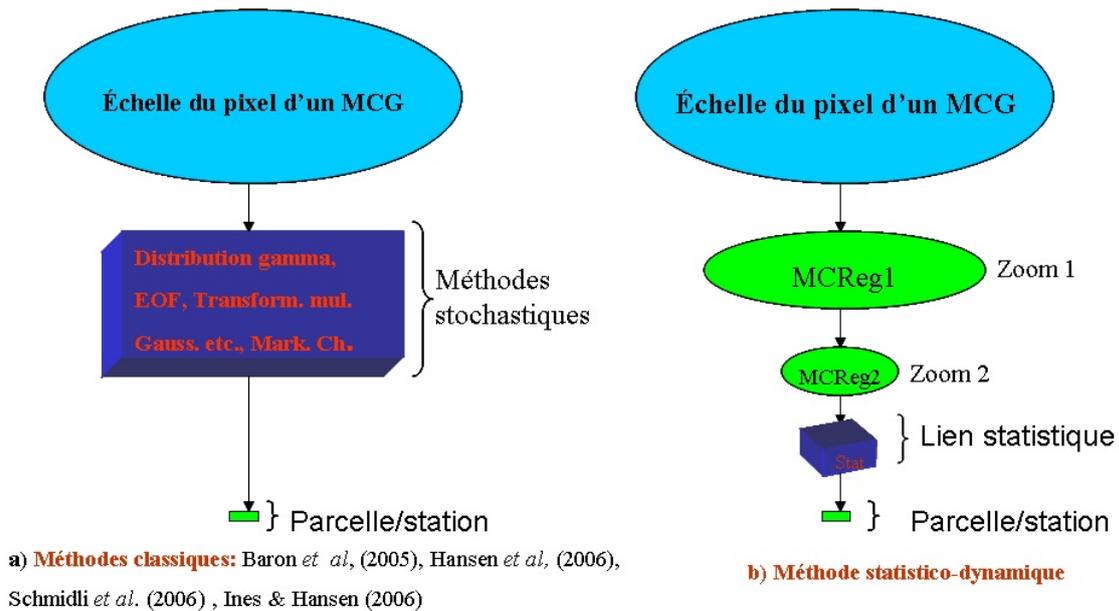


Figure 5.1: Méthodes de réduction d'échelle de MCG à l'échelle parcellaire. a) les méthodes classiques sont le plus souvent utilisées pour désagréger les sorties du MCG. b) Méthodes statistico-dynamiques : réduire la résolution du MCG à travers un MCR avant d'utiliser des liens statistiques pour passer à l'échelle parcellaire (Salack, 2007).

pour faire des études d'impacts sur l'agriculture, deux questions se posent : i) au besoin de la prévision des rendements du mil, est-il nécessaire d'interpoler la pluie simulée par un MRC ?, ii) la correction en post-traitement de la pluie simulée par un MRC est-elle indispensable pour faire des études d'impacts ? Afin de répondre à ces questions, deux approches sont adoptées : i) Nous intercomparons deux méthodes d'extractions afin de déterminer les artefacts possibles en post-traitement avant ii) d'utiliser l'une de ces méthodes pour étudier la sensibilité des résultats du modèle SARRAH à la distribution de la pluie des MRC.

Les données de précipitations journalières simulées sont issues des expériences de simulations de huit modèles régionaux (MRC) à fine résolution, sur la période 1991-2007 (Chapitre 2). Les données journalières de pluviométrie observée de 1991-2007 sont retenues pour rester en conformité avec les sorties des MRC. Les autres variables climatiques journalières nécessaires aux simulations agronomiques (températures, humidités, rayonnement, vent) sont utilisées pour calculer une saison moyenne pour chacune des 12 stations disponible. Les valeurs moyennes saisonnières de ces variables sont répliquées chaque année afin de permettre au modèle SARRAH d'estimer un bilan hydrique fictif. Ainsi, en sortie du modèle, seules les différences dans la distribution de la pluviométrie peuvent avoir un impact sur les rendements simulés.

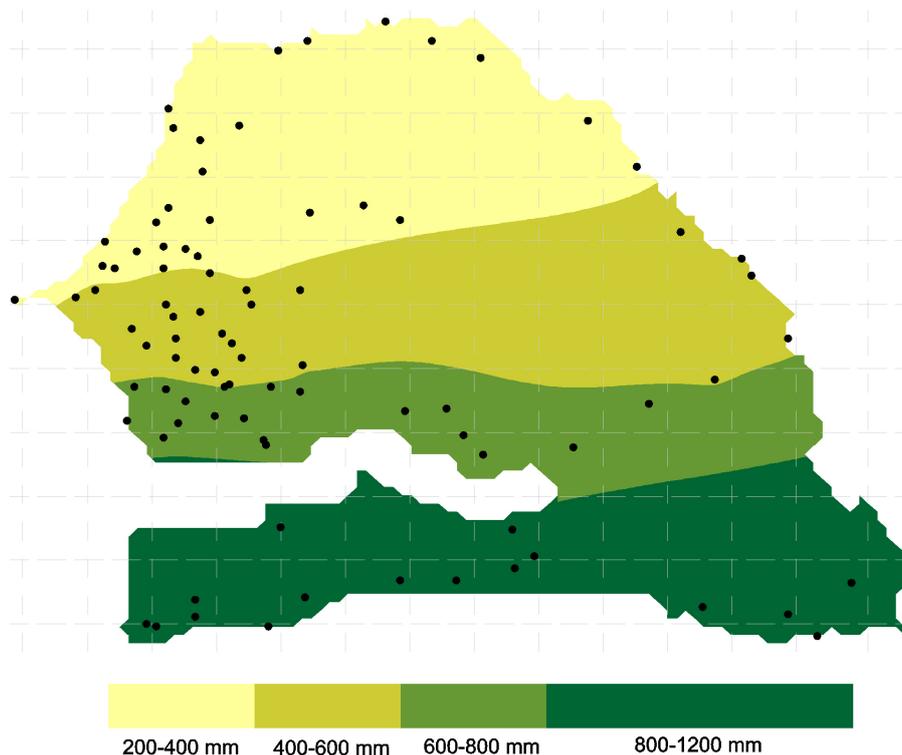


Figure 5.2: Mailles des modèles régionaux de climat (traits gris), réseau de stations d'observations ANAMS-CERAAS (points noirs) et zonage agro-climatique du Sénégal.

### 5.2.1 Le modèle SARRAH

SARRAH est un simulateur du développement et du rendement des cultures, développé par le CIRAD<sup>2</sup>, fonctionnant au pas de temps journalier, qui s'est révélé particulièrement bien adapté à l'étude des impacts du climat sur les céréales en milieu semi-aride (Sultan *et al.*, 2005 ; Baron *et al.*, 2005 ; Mishra *et al.*, 2008 ; Traoré *et al.*, 2011). Pour cette étude, le modèle est calibré pour simuler une variété de mil appelée « *Souna III* » à cycle constant de l'ordre de 90 jours et à haut potentiel de rendement (Dingkuhn *et al.*, 2003 ; Sultan *et al.*, 2005). Cette variété a été développée au Sénégal après la sécheresse des années soixante dix et est très largement vulgarisée dans l'ensemble du Sénégal. Des détails sur sa structure modulaire et les principes conceptuelles de bases du bilan carbonés de SARRAH sont dans l'annexe B. Ce modèle a été paramétré et validé pour la variété du mil *Souna III* sur les parcelles expérimentales du CERAAS. Pour nos simulations, les coefficients utilisés pour la paramétrisation du mil *Souna III* sont cités en annexe C.

2. Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement

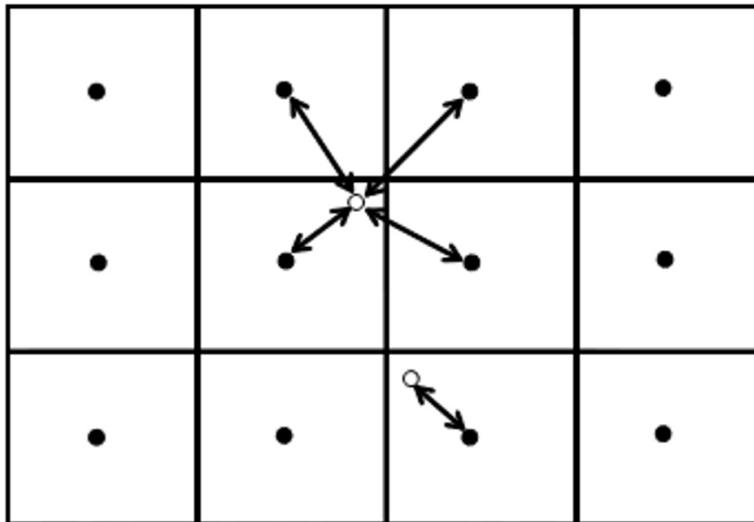


Figure 5.3: Conception graphique des méthodes d'extraction "bilinéaire" (Oettli et al., 2011) et du "plus proche point de maille" (méthode classique). Les points de maille sont représentés par les cercles pleins. Le point d'observation réelle est représenté par un cercle ouvert.

### 5.2.2 Méthodes d'extractions de la pluie des MRC

Pour extraire les données des 8 MRC nous employons deux approches. Il s'agit de i) la méthode "ad hoc" du plus proche voisin, qui consiste à extraire le point de maille du MRC le plus proche du site d'observations ( $MRC_{orig}$ ), ii) la méthode bilinéaire qui consiste à extraire la moyenne pondérée (par l'inverse de la distance) des quatre points de maille les plus proches du site d'observations (Oettli et al., 2011). Ces méthodes sont décrites de manière conceptuelle sur la figure 5.3. Les données de la pluie simulée  $MRC_{orig}$  sont utilisées pour ce qui est appelé ici le *forçage direct*, tandis que les données  $MRC_{desg}$  constituent la base du *forçage indirect*. Sur la base de ces deux extractions, nous avons mené une étude de sensibilité de la production du mil *Souna III* au travers du modèle de cultures SARRAH. L'objectif est d'identifier les artefacts en post-traitement qui peuvent constituer également des sources d'incertitudes pour les études d'impacts.

### 5.2.3 Etude de sensibilité de la production potentielle du mil *Souna III* à la distribution de la pluie simulée par les MRC

Toutes les simulations sont faites en considérant et comparant, pour une station pluviométrique donnée, les pluviométries observées avec celles simulées par les MRC dans la maille dont le cen-

tre est le plus proche de la station ( $MRC_{orig}$ ). Il n'y a pas de moyenne ni d'interpolation de valeurs simulées venant de mailles voisines. Cette étude de sensibilité a pour objectif d'aller plus en avant dans le diagnostic des biais introduits par les modèles régionaux en faisant un bilan exhaustif de l'attribution des erreurs pour la variable « pluie » des MRC. Nous analysons plus particulièrement la façon dont la dispersion de la représentation des pluies issues des MRC se traduit dans l'estimation des rendements du mil au Sénégal. On quantifiera les erreurs dans l'estimation des rendements liées aux erreurs sur les pluies simulées, et on décomposera et hiérarchisera les caractéristiques des pluies simulées à l'origine de ces erreurs. On évaluera uniquement les pluviométries issues des modèles tout en sachant que les autres variables simulées par les MRC, comme le rayonnement ou les températures, peuvent également présenter des biais importants qui pourraient engendrer des biais dans des simulations de modèles agronomiques comme le montrent Oettli *et al.* (2011).

Quatre forçages pluviométriques ont été construits de manière à être utilisés en entrées du modèle SARRAH :

1. Le forçage de référence basé sur les observations pluviométriques (Ctrl) : Le modèle SARRAH est forcé avec les pluies journalières observées en station. C'est la simulation de référence.
2. Le forçage basé sur les pluies brutes des modèles régionaux ( $MRC_{orig}$ ) : Le modèle SARRAH est forcé avec la pluviométrie journalière issue des modèles régionaux. Pour ce faire, on extrait la valeur de la pluie du point de maille le plus proche de la station d'observation. Cette approche permet d'obtenir la pluie telle que simulée par les MRC sans l'interpoler. Il représente le scénario de forçage de la pluie originale de chaque MRC.
3. Le forçage basé sur la distribution des pluies des modèles régionaux ( $MRC_{dist}$ ) : On calcule dans un premier temps le biais relatif mensuel du cumul pluviométrique de chaque MRC de la façon suivante :

$$I_m = (y_m - O_m)/O_m \quad (5.1)$$

où  $I_m$  représente le biais d'un MRC pour le mois  $m$ ,  $y_m$  le cumul pluviométrique du MRC

pour le mois  $m$  et  $o_m$  le cumul pluviométrique observé. Ce biais relatif est calculé pour chaque année de la période 1991-2007 et chacune des 12 stations.

Ensuite ce biais relatif est utilisé pour redimensionner les valeurs journalières de pluie simulées par le MRC :

$$\hat{y}_{i,m} = y_{i,m} \times I_m \quad (5.2)$$

où  $y_{i,m}$  représente la valeur de pluie du MRC au jour  $i$  et au mois  $m$ , et  $\hat{y}_{i,m}$  la nouvelle valeur de pluie redimensionnée. Cette transformation n'affecte que les jours où la pluie est non nulle dans les MRC. Ainsi pour une année et une station considérée, le cumul des valeurs de  $\hat{y}_{i,m}$  sur le mois  $m$ , notée  $\hat{y}_m$ , est identique à celui du cumul des pluies observée  $O_m$ . Néanmoins, la distribution intrasaisonnière des événements pluvieux dans chaque MRC reste inchangée. L'objectif de ce scénario de forçage est de conserver la fréquence d'occurrence des événements de pluies spécifiques à chaque MRC mais pas le cumul mensuel pluviométrique.

4. Le forçage basé sur les cumuls pluviométriques des modèles régionaux ( $MRC_{cum}$ ) : On adopte la même méthode de perturbation que le scénario  $MRC_{dist}$  à la différence qu'elle s'applique aux pluies observées :

$$\hat{O}_{i,m} = O_{i,m} \times I_m \quad (5.3)$$

où  $O_{i,m}$  représente la valeur de pluie observé au jour  $i$  et au mois  $m$ , et  $\hat{O}_{i,m}$  la nouvelle valeur de pluie redimensionnée. Cette transformation est réalisée pour chaque MRC et chaque station. Ainsi pour une année et une station considérée, le cumul des valeurs de  $\hat{O}_{i,m}$  sur le mois  $m$ , notée  $\hat{O}_m$ , est identique à celui du cumul des pluies simulées  $y_m$  pour le MRC considéré. Néanmoins la distribution intrasaisonnière des événements pluvieux est celle des observations. L'objectif de ce scénario de forçage est de conserver le cumul mensuel des pluies spécifiques à chaque MRC mais pas la distribution intrasaisonnière.

De ce fait, les scénarii de forçage  $MRC_{dist}$  et  $MRC_{cum}$  sont des perturbations apportées à la pluie brute issue des MRC ( $MRC_{orig}$ ). Ils permettent de dissocier les biais des modèles en

termes de cumul pluviométrique et de distribution intrasaisonnière. L'utilisation de ces forçages en entrée du modèle de culture SARRAH permet ainsi d'attribuer et de hiérarchiser l'erreur dans l'estimation des rendements agricoles liée à la représentation de ces deux caractéristiques de la pluviométrie dans les MRC en comparant les rendements simulés issus des simulations de contrôle (*Ctrl*) avec ceux issus des 3 forçages  $MRC_{orig}$ ,  $MRC_{dist}$  et  $MRC_{cum}$ . La comparaison entre le jeu  $MRC_{orig}$  et la simulation de contrôle (*Ctrl*) permet de quantifier le biais total sur les rendements des modèles régionaux tandis que les comparaisons avec  $MRC_{dist}$  et  $MRC_{cum}$  permettent d'analyser les effets marginaux sur les rendements des biais affectant, respectivement, les distributions intrasaisonnières des pluies simulées et leurs cumuls.

### 5.3 Sensibilité de la production potentielle du mil aux choix de la paramétrisation du MRC et des méthodes d'extraction

Les forçages directs par trois modèles régionaux (HC, METNO, MPI) aboutissent à une production du mil *Souna III* très proche des observations (Figure 5.4a). Les modèles du DMI, ICTP et KNMI ont du mal à restituer les valeurs centrales (entre le 1er et 3ème quartile), tandis que les MRC du GKSS et SMHI sous-estiment fréquemment les rendements et la biomasse totale (Figure 5.4b). A l'instar des résultats d'inter-comparaisons des modèles atmosphériques ou couplé océan-atmosphère (AMMA-MIP, Hourdin *et al.*, 2010) et d'inter-comparaison de MRC (Oettli *et al.*, 2011), on obtient également une portion des MRC dont la pluie simulée minimise les biais dans les simulations agronomiques sans nécessairement être corrigée. Il s'agit notamment de HC, METNO et MPI. Une autre portion aboutit à des biais positifs (DMI, ICTP et KNMI) tandis que d'autres sont complètement en échec avec des biais négatifs (GKSS et SMHI).

D'autres études antérieures ont utilisé directement des sorties de modèle globaux ou MCG pour étudier les impacts potentiels du climat et des changements climatiques sur la production agricole en forçage d'un modèle de culture et montrent leur pertinence à l'échelle locale (Mavromatis et Jones, 1998 ; Challinor *et al.*, 2004). Cependant, certains auteurs reprochent

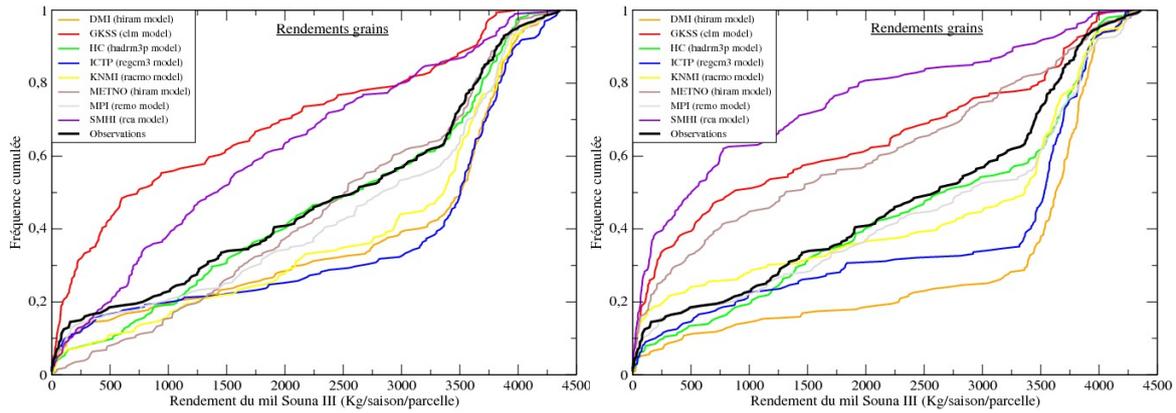


Figure 5.4: Fréquences relatives cumulées (CDF) de la production saisonnière simulée et observée localement au Sénégal, obtenues par intégration de la pluie simulée par 8 MRC au modèle SARRAH a) forçage direct b) forçage indirect. Les courbes noires représentent les observations.

aux MCG une forte auto-corrélation temporelle qui contribue à expliquer les biais induits sur les simulations d'un MCDC (eg. Ines et Hansen, 2006). Dans le cas des MRC le forçage direct est peu étudié en Afrique de l'Ouest, d'où la pertinence des résultats actuels. La dispersion des résultats par rapport aux simulations de contrôle est un caractère statistique très connu des simulations d'ensemble. Il permet de juger les erreurs produites par un modèle vis-à-vis de ces paires sur la base des mêmes conditions initiales et conditions latérales (Palmer *et al.*, 2004). Par ailleurs, la pluie simulée par le MRC du DMI conduit à une surestimation de la production du mil tandis que METNO est relativement proche des observations. Il s'agit pourtant du même modèle régional (HIRHAM model) avec deux paramétrisations différentes. Ceci prouve une fois de plus l'importance du choix des paramétrisations dans les simulations des MRC.

Est-il nécessaire d'interpoler la pluie simulée par les MRC ? Sous l'hypothèse que la valeur de la pluie simulée à un point de maille représente la moyenne de la masse d'eau sur la surface de cette maille (Baron *et al.*, 2005), certaines études chercheraient à aller plus en détails en interpolant les données d'un MRC au moment de l'extraction. Pour comparer les conséquences de telles interpolations sur la production agricole, nous avons extrait par interpolation bilinéaire, les données des MRC. Il s'agit du scénario  $MRC_{desg}$ . La figure 5.4b illustre les conséquences d'une telle extraction sur les rendements du mil. Dans certains cas particuliers, le fait d'interpoler la pluie simulée à l'extraction, affecte beaucoup les simulations du modèle de cultures. Ainsi le forçage indirect  $MRC_{desg}$  conduit à une sous-estimation des rendements par la pluie simulée du

modèle METNO alors que dans le forçage direct ( $MRC_{orig}$ ) ses résultats étaient "meilleurs". Pour les cas les moins performants, comme le GKSS et SMHI, l'extraction bilinéaire ne fait qu'augmenter les incertitudes.

## 5.4 Les biais des modèles régionaux dans leur représentation de la pluie

Tous les modèles reproduisent le gradient latitudinal de pluviométrie mais ils ont du mal à retracer les limites exactes des zones pluviométriques, zone nord, centre nord, centre sud, zone sud (NZ, CN, CS, SZ) (Tableau 5.1 et figure 5.5). Le modèle GKSS se démarque clairement avec des sous-estimations très importantes des pluviométries sur toutes les zones, allant jusqu'à -63 % pour la zone Nord. Le modèle DMI se distingue également car il est le seul à surestimer systématiquement les précipitations. Le modèle METNO surestime partout sauf dans la zone Sud. Les autres modèles ont plutôt tendance à sous-estimer les pluies, mais peuvent également les surestimer pour certaines zones. Si l'on considère l'ensemble des sorties des modèles, les zones pour lesquelles ils sont globalement les plus cohérents entre eux sont le Centre Nord et la zone Sud avec 6 biais négatifs pour 2 positifs, alors que les résultats sont moins cohérents dans la zone Nord (4 biais positifs et 4 négatifs) et au Centre Sud (5 positifs et 3 négatifs). Les variabilités interannuelles des cumuls sont, dans l'ensemble, bien reproduites avec des coefficients de variations (cv) conformes aux observations (Tableau 5.1), sauf en ce qui concerne le modèle GKSS pour lequel on observe une variabilité interannuelle deux fois supérieure aux autres, qui s'explique cependant en partie par la faiblesse des précipitations simulées.

Les modèles ont tous tendance à surestimer très fortement le nombre d'événements pluvieux : les nombres de jours pluvieux simulés sont en moyenne 2 à 3 fois supérieurs à ce que l'on observe dans la réalité, et peuvent même être 5 fois supérieurs à celle-ci (Tableau 5.2). Cette augmentation du nombre de jours pluvieux s'observe du Nord vers le Sud sauf pour le MPI dont le minimum se trouve au centre avec 114 jours. Les biais positifs sur la fréquence des jours pluvieux observés pour les MRC sont proches de ceux des modèles de circulation générale (MCG) (Goddard *et al.*, 2001 ; Sylla *et al.*, 2010a), et il a été montré que les MRC

Tableau 5.1 – *Evaluation des cumuls pluviométriques annuels simulée par les MRC sur la période 1991-2007.*

Zone	Paramètre	Obs	DMI	GKSS	HC	ICTP	KNMI	METNO	MPI	SMHI	Moy. MRC
Nord (NZ)	Moy. (mm/an)	326	396	122	362	261	277	439	295	339	311
	Biais (%)		21	-63	11	-20	-15	35	-9	4	-5
	Cv (%)	25	26	58	25	31	25	26	29	29	31
Centre Nord (CN)	Moy. (mm/an)	541	701	203	479	477	478	588	503	482	489
	Biais (%)		30	-62	-11	-11	-12	9	-7	-11	-9
	Cv (%)	27	22	44	25	20	19	21	23	26	25
Centre Sud (CS)	Moy. (mm/an)	698	972	335	646	709	729	835	789	567	698
	Biais (%)		39	-52	-7	1	4	20	13	-19	0
	Cv (%)	20	17	34	18	14	16	18	17	28	20
Sud (SZ)	Moy. (mm/an)	1111	1222	544	796	868	916	957	1120	649	884
	Biais (%)		10	-51	-28	-22	-17	-19	1	-41	-21
	Cv (%)	17	16	22	12	9	12	15	10	21	15
Sénégal	Moy. des biais (%)		25	-57	-9	-13	-10	11	-1	-17	-9

surestiment en particulier les fréquences des traces de pluie ( $<1$  mm/jour) et de pluies faibles ( $<10$  mm/jour) (Salack, 2007). On peut noter (Tableau 5.2) que les modèles qui génèrent les cumuls pluviométriques les plus biaisés (DMI, GKSS, SMHI) sont ceux qui surestiment le moins les nombres de jours de pluie : ainsi le modèle GKSS qui était le moins performant pour les cumuls est le plus performant pour le nombre de jours de pluie en ne les surestimant que 1,5 à 2 fois. Les variabilités interannuelles sur les nombres de jours pluvieux semblent conformes aux observations, c'est-à-dire relativement faibles (entre 10 et 15 %), mais compte tenu des fortes surestimations cela signifie qu'en réalité les variabilités simulées sont nettement plus faibles que dans la réalité.

Tableau 5.2 – *Evaluation des nombres de jours pluvieux annuels simulés par les MRC sur la période 1991-2007.*

Zone	Paramètre	Obs	DMI	GKSS	HC	ICTP	KNMI	METNO	MPI	SMHI	Moy. MRC
Nord (NZ)	Moy. (mm/an)	21	63	39	135	79	128	91	119	72	83
	Biais (%)		197	84	536	272	499	328	457	240	327
	Cv (%)	14	0	30	0	12	9	9	7	0	13
Centre Nord (CN)	Moy. (mm/an)	33	84	53	144	99	135	105	114	84	95
	Biais (%)		153	61	336	198	307	218	246	154	209
	Cv (%)	12	0	22	0	10	7	8	6	0	10
Centre Sud (CS)	Moy. (mm/an)	41	108	76	157	123	152	118	127	85	110
	Biais (%)		163	86	283	201	272	189	211	107	189
	Cv (%)	13	0	14	0	9	6	8	6	0	9
Sud (SZ)	Moy. (mm/an)	62	123	107	179	148	175	144	157	127	136
	Biais (%)		98	73	190	139	182	133	154	105	134
	Cv (%)	11	0	11	0	6	5	6	5	0	7
Sénégal	Moy. des biais (%)		153	76	336	203	315	217	267	152	215

La figure 5.6 présente les distributions moyennes interannuelles des pauses pluviométriques pour les 4 zones pluviométriques. La surestimation importante des nombres de jours pluvieux

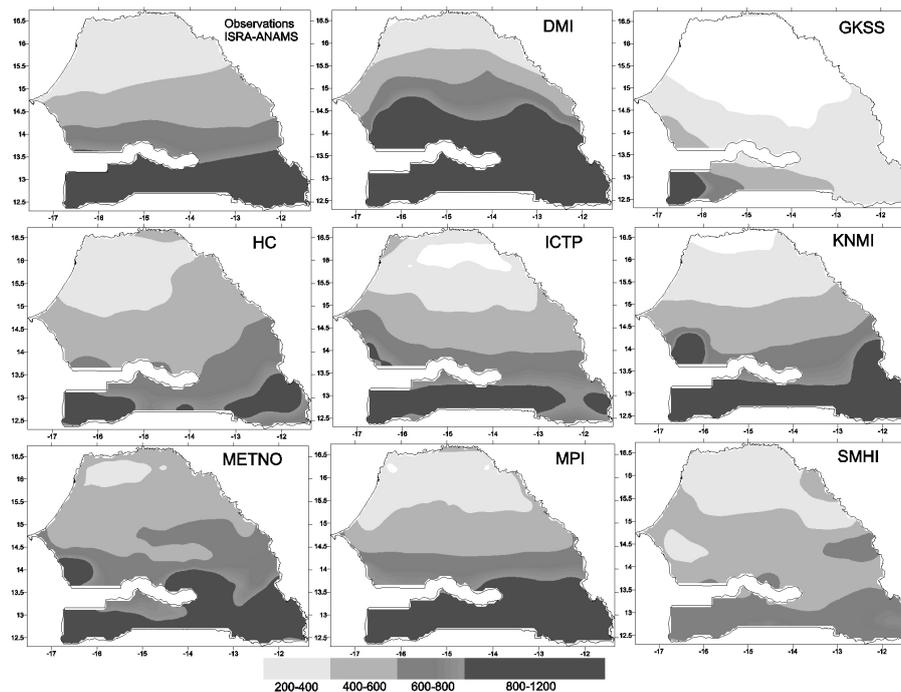


Figure 5.5: Les cumuls saisonniers moyens des pluies observées (observations) et simulées par les 8 MRC, organisées en 4 zones agro-climatiques : Nord ( $<400$  mm/an), centre Nord (400-600 mm/an), centre Sud (600-800 mm/an) et Sud ( $>800$  mm/an).

par les modèles régionaux se traduit au Nord et au Centre Nord par une surestimation des nombres de pauses de moins de 5 jours. Par contre cela n'est pas le cas pour les autres zones, ce qui signifie que les modèles y simulent souvent des séquences d'événements pluvieux sur plusieurs jours successifs. Les occurrences de pauses de 5 à 15 jours sont globalement sous-estimées par l'ensemble des modèles sur toutes les zones. Cela découle clairement de la surestimation des nombres de jours pluvieux. Enfin on note que les MRC ont tendance à générer un peu trop de pauses de plus de 15 jours, et surtout de plus de 20 jours. Mais cependant pour ces types de pause on reste quoiqu'il en soit dans des fréquences d'occurrence extrêmement faibles. Dans l'ensemble c'est le modèle GKSS qui reproduit le mieux la distribution des pauses.

## 5.5 Les biais des modèles régionaux dans la simulation des rendements

Les insuffisances des modèles régionaux pour représenter correctement la pluie se répercutent sur les simulations des rendements (Tableau 5.3). Ainsi on remarque des biais sur les rendements

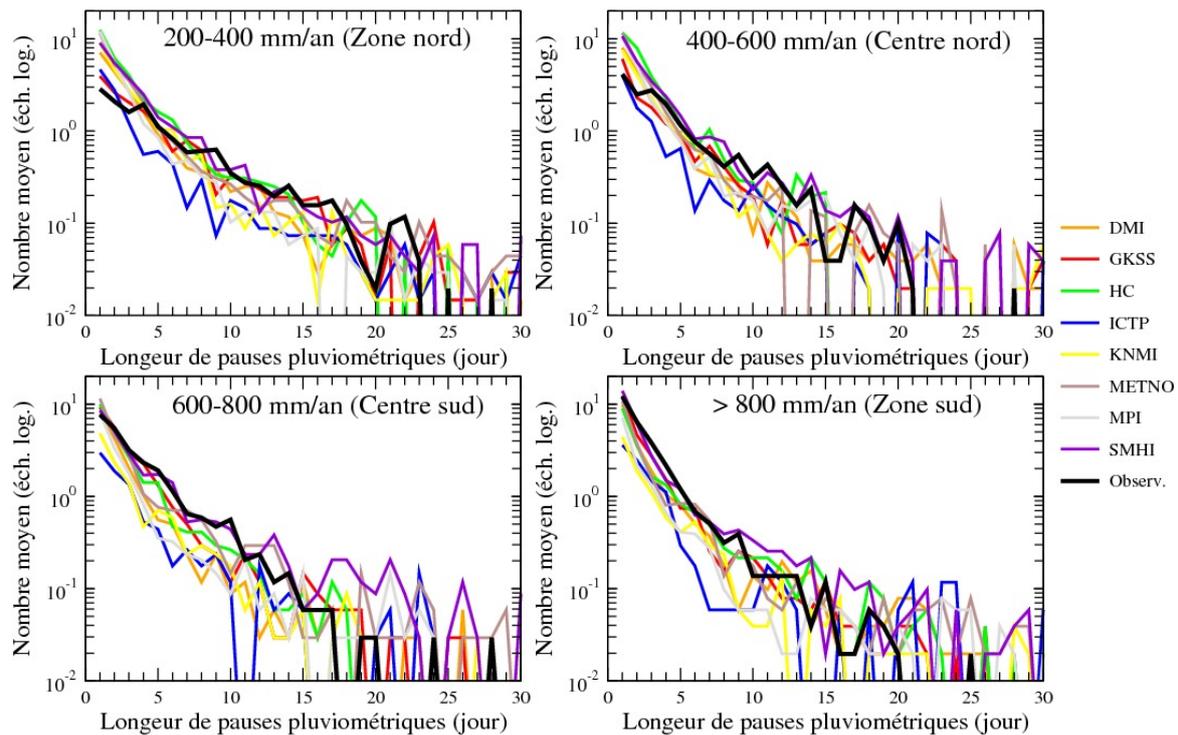


Figure 5.6: Distributions intrasaisonniers des pauses pluviométriques observées et simulées par les MRC pour les 4 zones agro-climatiques considérées.

qui varient de -66 % à 60 % du Nord au centre Sud du pays alors qu'à l'extrême sud ces biais vont de -33 % à 5 %. Les biais les plus importants sont observés pour le modèle GKSS. La variabilité interannuelle des rendements est assez mal représentée avec des coefficients de variation le plus souvent inférieurs à ceux des rendements estimés à partir des observations, mais qui parfois sont très supérieurs à la réalité (Tableau 5.3).

Tableau 5.3 – Évaluation des rendements simulés par les forçages  $MRC_{orig}$  de SARRAH sur la période 1991-2007.

Zone	Paramètre	Obs	DMI	GKSS	HC	ICTP	KNMI	METNO	MPI	SMHI	Moy. MRC
Nord (NZ)	Moy. (kg/ha)	1054	1239	612	1234	1465	1402	1681	929	786	1169
	Biais (%)		18	-42	17	39	33	59	-12	-25	11
	Cv (%)	60	16	73	57	76	9	26	49	41	43
Centre Nord (CN)	Moy. (kg/ha)	2140	3106	867	2408	3028	2774	2336	2534	1372	2303
	Biais (%)		45	-59	13	42	30	9	18	-36	8
	Cv (%)	32	6	11	6	6	1	6	8	15	7
Centre Sud (CS)	Moy. (kg/ha)	2851	3472	967	3067	3360	3487	3162	3235	2147	2862
	Biais (%)		22	-66	8	18	22	11	13	-25	0
	Cv (%)	10	4	5	0	9	1	0	8	30	7
Sud (SZ)	Moy. (kg/ha)	3619	3795	2410	3345	3815	3795	3050	3765	2789	3346
	Biais (%)		5	-33	-8	5	5	-16	4	-23	-8
	Cv (%)	8	6	47	6	8	6	10	8	16	13
Sénégal	Moy. des biais (%)		23	-50	8	26	23	16	6	-27	3

Le biais dans la représentation de la quantité d'eau totale disponible au cours du cycle de

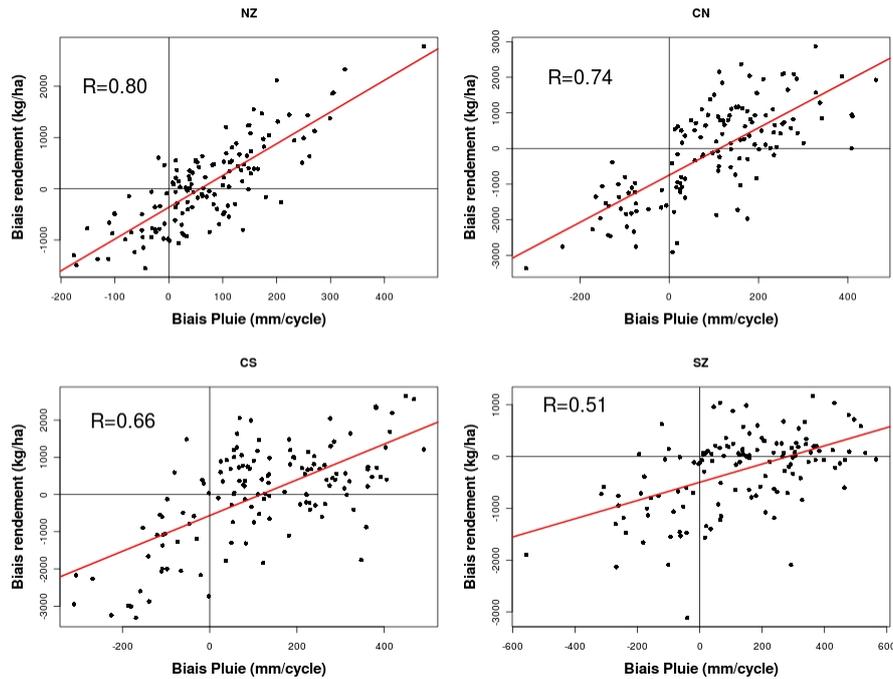


Figure 5.7: Relation entre les biais sur les rendements simulés (kg/ha) et les biais sur les pluies simulées (cumulées sur les cycles) (mm/cycle) des MRC.

la plante est la première cause dans le biais des rendements simulés par les MRC (figure 5.7), expliquant globalement 36 % de la variance des erreurs dans les simulations de rendement. Les erreurs sur les pluviométries simulées ont plus d'impact sur les rendements au nord (64 % d'explication de la variance des erreurs) qu'au sud (25 %). L'amplitude des biais liés à une mauvaise représentation du cumul pluviométrique mensuel ( $MRC_{cum}$ ) est la plus forte (avec des biais variant de -80 % à +60 % environ ; figure 5.8, au centre) alors que le biais lié à la variabilité intrasaisonnière ( $MRC_{dist}$ ) est plus faible (entre -40 % et +40 % ; figure 5.8, à droite).

La variabilité intrasaisonnière a un rôle important dans la façon dont les pluies sont utilisées au cours de la saison de croissance de la plante : la figure 5.9 met en évidence la relation non linéaire entre les rendements simulés et la pluie cumulée pendant le cycle de culture. Les rendements maximaux peuvent être obtenus dès 350 mm environ et avec les pluies observées ils sont toujours atteints au-delà de 550 mm. Les rendements obtenus avec les pluies observées ne diminuent pas quand les cumuls pluviométriques augmentent au-delà de 550 mm alors que dans la réalité c'e peut-être le cas car le rayonnement peut devenir limitant (Baron *et al.*, 2005), l'engorgement du sol également ainsi que les problèmes biotiques : la raison en est

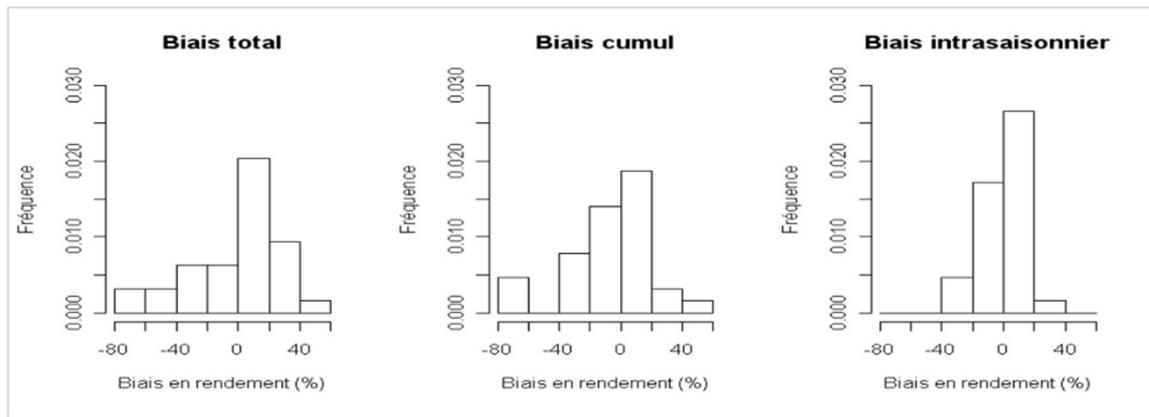


Figure 5.8: *Distributions des biais sur les rendements simulés (%) issus des différents forçages. (À gauche) les biais moyens issus des données originales des MRC ( $MRC_{orig}$ ). (Au centre) les biais largement attribués aux cumuls journaliers de la pluie dans MRC (scénario de forçage  $MRC_{cum}$ ). (À droite) les biais largement attribués aux cumuls journaliers de la pluie dans MRC (scénario de forçage  $MRC_{dist}$ ).*

que nous travaillons avec des moyennes climatiques interannuelles et les aspects biotiques et d'engorgement ne sont pas considérés.

Le modèle SARRAH simule séparément l'évaporation du sol et la transpiration de la plante (Sultan *et al.*, 2005 ; Baron *et al.*, 2005). Ces deux processus s'effectuent de façon simultanée (évapotranspiration) et varient en fonction de la demande atmosphérique, du taux de couverture et des phases phénologiques de la plante. Cependant SARRAH distingue la demande potentielle de la consommation réelle, pour chaque processus en fonction de l'eau disponible pour la partie évaporation et la partie transpiration. L'évaporation potentielle est contrainte par l'eau disponible pour ce processus (notion de réservoir de surface), la transpiration potentielle est contrainte par la fraction d'eau disponible aux racines (notion de réservoir des racines). Le rapport entre la transpiration de la culture et la pluie cumulée sur son cycle, que l'on peut considérer comme un indicateur de l'efficacité de la pluie, est maximal dès 250 mm de pluie (Figure 5.10). Lorsque la variabilité intrasaisonnière des pluies est correctement représentée (simulation de contrôle en rouge et simulation  $MRC_{cum}$  en noir sur les figures 5.9 et 5.10), on observe une plus grande efficacité des pluies et des rendements plus importants pour un même cumul pluviométrique.

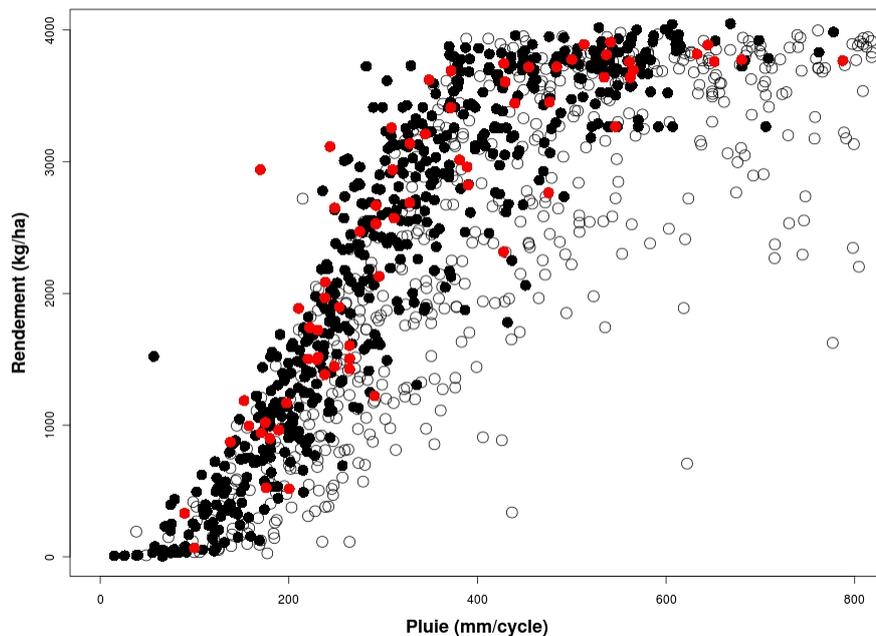


Figure 5.9: Rendements simulés ( $\text{kg/ha}^{-1}$ ) en relation avec les pluies (cumulées sur les cycles de culture) pour les différents forçages selon les pluies observées (points rouges), les pluies simulées originales  $\text{MRC}_{\text{orig}}$  (cercles blancs) et les pluies  $\text{MRC}_{\text{cum}}$  pour lesquelles l'intra-saisonnier est corrigé mais il y a des biais sur les cumuls (points noirs).

## 5.6 Conclusion

L'extraction de la valeur au point de maille, par la méthode du plus proche voisin conserve l'originalité de la distribution intrasaisonnaire des événements pluvieux. A travers l'exemple de la culture du mil *SOUNA III*, on montre qu'il existe une grande dispersion dans la représentation de la pluviométrie d'un modèle régional à l'autre (et même quelques fois pour un même modèle régional avec deux jeux de paramètres différents) tant à l'échelle saisonnière qu'à l'échelle intrasaisonnaire. Ces biais introduisent des erreurs importantes dans l'estimation des impacts agronomiques du climat. De telles erreurs peuvent même invalider des conclusions sur les impacts du changement climatique basés sur l'utilisation d'un seul modèle régional. Il arrive qu'on force un modèle de cultures avec la pluie directement simulée par un MRC pour aboutit à des prévisions agricoles moyennes très proches de ce que produisent les données observées au travers du modèle de cultures SARRAH.

Notre étude confirme également l'intérêt de développer des méthodes de correction des biais. Cependant cette caractéristique n'est pas généralisable à tous les MRC utilisés dans la présente

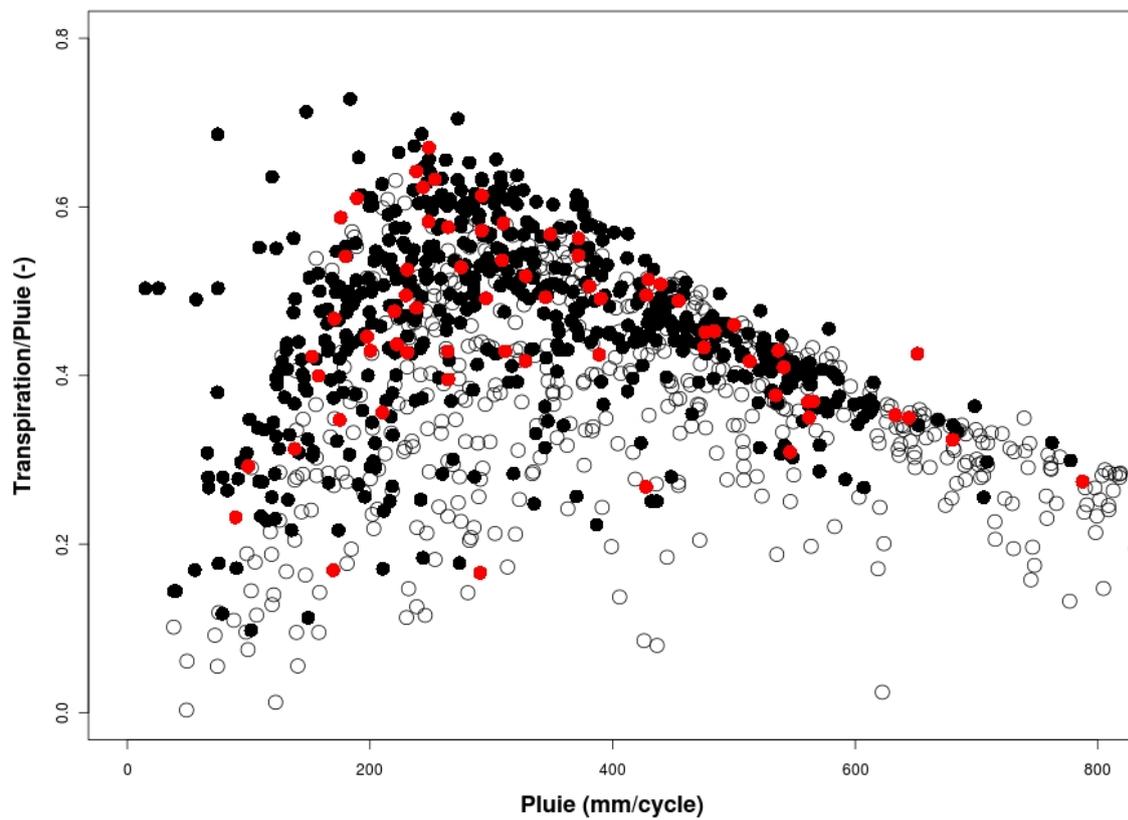


Figure 5.10: *Efficacités des pluies (rapport entre la transpiration et la pluie) en relation avec pluviométries (cumulées sur les cycles de culture) pour les différents forçages selon les pluviométries observées (points rouges), les pluviométries simulées originales  $MRC_{orig}$  (cercles blancs), et les pluviométries  $MRC_{cum}$  pour lesquelles l'intra-saisonnier est corrigé mais il y a des biais sur les cumuls (points noirs).*

étude. En effet, on remarque que trois des huit MRC testés sont proches des observations, trois autres surestiment les valeurs centrales tandis que les deux autres sous-estiment la production simulée.

On a pu constater que l'essentiel des biais dans les rendements simulés avec les modèles régionaux provient de leur mauvaise représentation de la quantité totale de pluie pendant le cycle de la plante. Néanmoins, on montre le rôle non négligeable de la représentation de la variabilité intrasaisonnière qui modifie l'efficacité des pluies au cours du cycle de croissance de la plante et affecte le rendement.

Enfin cette étude souligne l'importance d'une approche multi-modèle pour quantifier les incertitudes dans les études d'impacts comme cela est préconisé par les projets et programmes internationaux comme ENSEMBLES. Nos résultats mettent également en évidence l'urgence de réduire l'incertitude dans les processus atmosphériques qui contrôlent les pluies de mousson dans les modèles de climat afin d'améliorer la simulation des pluies. Le projet AMMA-MIP<sup>3</sup> (Hourdin *et al.*, 2010) et CORDEX sont un cadre idéal pour réaliser des avancées en ce sens.

---

3. AMMA-Model Intercomparison Program

# Chapitre 6

## Synthèse générale et perspectives

Dans cette thèse, nous nous sommes attelés à caractériser les événements pluviométriques intra-saisonniers qui influencent la croissance et le développement des cultures pluviales en Afrique de l'Ouest. A partir de l'analyse des données observées en stations, au Sénégal et au Niger, des données de températures de surface des Océans et des données des simulations d'ensemble de huit modèles régionaux de climat, nous avons documenté :

1. l'agro-climatologie des composantes pluviométriques à forts impacts agricoles ;
2. la prévisibilité potentielle des événements majeurs de pauses pluviométriques ;
3. l'évaluation agro-météorologique des modèles régionaux de climat ;
4. les sources d'incertitudes dans l'attribution des impacts à la pluviométrie.

### **6.1 Mise à jour agro-climatologique des composantes pluviométriques à forts impacts agricoles**

Les composantes pluviométriques à forts impacts agricoles, dans la partie extrême Ouest du Sahel Ouest Africain, sont très peu documentées comparativement aux parties centrales et Est (10°O-10°E). Il est donc important d'identifier les facteurs ayant changé ou en cours de changement à l'échelle locale d'un pays, afin de renforcer la veille agro-climatique et les systèmes d'alerte précoce. Pour réunir des informations nécessaires à une combinaison adéquate du trinôme sol-plante-climat, des approches agro-météorologiques sont utilisées dans la mise à jour

du régime pluviométrique du Sénégal, proposée dans cette thèse. Ces diagnostics permettent d'acquiescer un consensus sur la direction, le degré de changement spatio-temporelle dans le cadre des études d'impacts du climat sur l'agriculture. L'évolution du cycle saisonnier et les cumuls interannuels, le nombre de jours de pluie et des classes de cumuls journaliers, les dates de début et de fin de saison, les dates optimales de semis, la longueur de la saison des pluies, la durée de la saison culturale, les catégories moyennes et extrêmes des pauses pluviométriques sont étudiés à l'échelle locale (sites individuelles) et zonale (quatre différentes zones pluviométriques) à l'aide des relevés quotidiens de données de pluie en station (84 sites) sur le Sénégal. Ces analyses complètent et actualisent également des études antérieures menées dans l'extrême ouest du Sahel Africain (11°-16°N, 20°W-10°E).

Les résultats dévoilent l'évolution notable de certains de ces facteurs pluviométriques dans les périodes récentes par rapport aux années sèches précédentes. Dans les régions enregistrant moins de 800 mm/an (les sous-régions soudano-sahéliennes et sahéliennes), les tendances positives et statistiquement significatives de la quantité de pluie sont associées à des épisodes de jours secs de plus en plus fréquents, un nombre croissant de cumul journaliers extrêmes et un décalage du maxima de nombre de jours pluvieux. A l'échelle moyenne des zones pluviométriques, les premières années (ou les points de changement), dans lesquelles l'ampleur et les signes des nouvelles tendances sont importants, se constatent dans la période post-1990. A l'échelle locale, ces changements sont plus amplifiés et pas moins d'un tiers des pluviomètres, couverts par une zone pluviométrique, sont touchés d'une manière significative. Seuls les régions de l'extrême Sud (ou la pluie moyenne annuelle dépasse 800 mm) ne présentent pas de changements significatifs du régime pluviométrique.

Par ailleurs, aucune tendance au changement, statistiquement significative, n'est observée sur les cumuls journaliers  $\leq 10$  mm (pluies faibles), les dates de début et de fin de saison, les dates optimales de semis, la longueur de la saison des pluies, la durée de la saison culturale, les catégories moyennes et extrêmes des pauses pluviométriques. Au contraire, certaines de ces composantes pluviométriques, telles que les dates optimales de semis et la durée de saison culturale exhibent une variabilité très importante (les rapports des variances sont statistiquement significatifs). Les dates de début (fin) de saison des pluies sont fréquemment suivies (précédées)

des épisodes extrêmes de sécheresse (ou pauses pluviométriques extrêmes) qui feront l'objet d'analyses approfondies dans la suite des travaux de cette thèse.

L'algorithme statistique de diagnostic de changements spatio-temporels de la pluviométrie, qui est développé dans ces analyses (Student-Fisher Statistical Scheme, ou SFS), est un schéma méthodologique simple, facile d'utilisation, flexible et adaptable à toutes les autres variables climatiques. Par ailleurs dans les perspectives des études d'impact climatique sur l'agriculture locale, un synopsis zonal des grandes périodes historiques est fourni au besoin des applications agronomiques (annexe D).

## 6.2 Prévisibilité potentielle des évènements majeurs de pauses pluviométriques

Sur la base de la pluviométrie journalière, observée de 1960 à 2000 au Niger et de 1950-2010 au Sénégal, l'extraction et l'analyse des pauses pluviométriques ont abouti à l'identification de leur distribution intra-saisonnière à l'échelle locale et multi-sites sur une aire limitée (ou pauses régionales). Les approches adoptées dans ces analyses nuancent la *pause locale* de la *pause régionale* à partir d'une re-définition de la notion du jour sec. Le caractère spatio-temporel des dates et fréquences d'occurrence de ces pauses ont conduit à une meilleure compréhension de leurs implications dans la variabilité de la pluviométrie locale. Les pauses ordinaires, courtes et moyennes sont corrélées aux excédents pluviométriques annuels. Les pauses  $\geq 15$  jours (en mai-juin-juillet) et 8-14 jours (en août-septembre) sont irrégulières et corrélées aux déficits pluviométriques annuels. Ce sont les catégories DS4 et DS3 qui font l'objet d'une attention particulière dans la suite des travaux.

En effet, lorsqu'on s'intéresse de près aux dates d'occurrence des pauses extrêmes DS4 (DS3), on s'aperçoit qu'elles sont plus précoces (tardives) dans les années humides (de type 1950-1969), mais tardives (précoces) de nos jours. La connaissance des périodes intra-saisonnières dans lesquelles la fréquence d'occurrence de DS4 et DS3 est plus probable permet d'éviter les fausses alertes de début de saison (communément appelées "*faux départs*"), éviter les périodes à risque de stress hydrique et optimiser le choix des dates optimales de semis en milieu paysan.

Le nombre de cas par saison de pluie n'a pas montré une évolution temporelle significative.

Le caractère saisonnier ainsi que la composante méso-échelle qu'elles exhibent ainsi que l'influence qu'exercent les Océans tropicaux, prouvent que les pauses extrêmes sont potentiellement prévisibles. Cependant, les données de simulation d'ensemble de MRC du projet AMMA-ENSEMBLES décrivent assez mal les dates et fréquences d'occurrence des pauses extrêmes, dans les régions à risque. Par contre, ces modèles de climat, décrivent assez bien les composantes (date et fréquence) des pauses extrêmes dans les régions à forte pluviométrie. Il faut maintenant trouver la bonne combinaison de techniques qui pourra améliorer les sorties des modèles régionaux de climat.

### 6.3 Evaluation agro-météorologique des modèles régionaux de climat

L'étude de performance de huit parmi les MRC des expériences AMMA-ENSEMBLES est faite de deux façons :

1. l'évaluation classique dans une perspective d'étude d'impacts : C'est la comparaison directe des observations et des simulations sorties des modèles MRC sur les composantes pluviométriques à forts impacts agricoles. Ces dernières sont des variables clés que les modèles climatiques doivent être capables de simuler de façon satisfaisante pour alimenter les modèles de cultures, et les limites acceptables des incertitudes. Ces MRC sont unanimes dans leur représentation de la pluviométrie des zones aux cumuls annuels excédentaires. Cependant, ils peinent à bien simuler les composantes pluviométriques dans les parties de la zone d'étude où les cumuls moyens sont inférieures à 600 mm/an.
2. l'évaluation agronomique : C'est l'étude de performance au travers d'un modèle de culture. Cela s'est fait à l'aide du modèle SARRAH. Le forçage direct du modèle de culture SARRAH a produit des résultats moyens très proches des observations des rendements du mil *Souna III*. Il est démontré qu'il existe une grande dispersion dans la représentation de la pluviométrie d'un modèle régional à l'autre. Une bonne performance s'observe chez au moins trois des MRC. Alors que les autres conduisent à la surestimation (sous-estimation)

de la production du mil par SARRAH. Ces résultats montrent qu'il n'est pas indispensable de corriger les sorties de "précipitation" chez tout MRC. Cependant, Il est vivement recommandé de procéder à une étude de sensibilité à la distribution intra-saisonnière de la pluie simulée. Une telle étude permet d'identifier la composante pluviométrique qui contribue plus à l'attribution des biais. Ainsi, on peut juger s'il est pertinent ou pas de corriger les sorties d'un MRC.

## 6.4 Sources d'incertitudes dans l'attribution des impacts à la pluviométrie

Pour une étude d'impacts du climat et des changements climatiques, on doit utiliser plusieurs modèles MRC et évaluer leurs sorties. Cependant, il est important de reconnaître les approches qui peuvent concourir à biaiser les résultats obtenus par ces études. La connaissance des moyens pour gérer ces sources d'incertitudes serait un atout. Grace aux simulations multi-modèles (simulation d'ensemble), le forçage du modèle de culture SARRAH a révélé trois sources d'incertitudes :

1. les erreurs internes du MRC : Le modèle HIRHAM utilisé à DMI donne des résultats différents du même modèle utilisé au KNMI. Il s'agit du même modèle mais avec différents schéma de paramétrisation. Les divergences des sorties d'un MRC, vis-à-vis de ses paires dans une simulation d'ensemble, sont plus imputables aux schémas numériques de discrétisation des équations utilisées (méthodes finies, spectrales, volume fini etc.) et aux paramétrisations définies dans ces modèles. Elles sont assez classiques et assez connues des modélisateurs. Pour les utilisateurs tierces, la connaissance du schéma de paramétrisation d'un MRC est très importante. Elle peut guider le choix des techniques de correction ou de désagrégation statistique d'échelle à employer dans les perspectives d'études d'impacts.
2. les artefacts de post-traitement : Les extractions faites avec la méthode du plus proche voisin concervent l'originalité de la variable simulée par chaque MRC. Le fait d'extraire les données d'un MRC à l'aide d'une autre manière peut augmenter les incertitudes dans les sorties d'un MRC et peut également avoir des conséquences sur les résultats d'un modèle

de culture comme le montre SARRAH.

3. la distribution intra-saisonnière de la pluie simulée : Tant les biais sur les cumuls pluviométrique que les fréquences d'occurrences des événements pluviométriques sont importants dans la propagation des erreurs dans le modèle SARRAH. Les biais sur les cumuls journaliers expliquent -80 % à +60 % des biais sur la production potentielle du mil Souna III. quant aux biais sur les fréquences d'occurrence des événement pluvieux, ils expliquent -40% à +40% des biais sur la production potentielle du mil Souna III. Ces derniers sont plus probables que les biais introduits par les cumuls. Ceci s'explique en partie par le fait que les MRC ont du mal à bien représenter la distribution des pauses pluviométriques.

## 6.5 Perspectives

Dans la suite de ces travaux, il est nécessaire de trouver un outil de prévision des pauses extrêmes dans la zone d'étude afin d'améliorer les systèmes d'alertes précoces. Par ailleurs, la distribution intra-saisonnière des pluies au Sahel répond aussi aux températures dans le Gulf de guinée tandis que l'influence des flux maritimes du flant Est de l'Atlantic Nord n'est pas négligeable pour les régions de l'extrême Ouest Sahélien. Si on étend le réseau pluviométrique sur toute l'Afrique de l'Ouest on pourra faire un diagnostic intra-saisonnier de l'influence de ces bassins océaniques sur la prévisibilité des pauses pluviométriques. Cela permettra d'identifier les échelles spatio-temporelles les plus pertinentes dans le choix des predicteurs pour utiliser la modélisation statistico-dynamiques (MOS). En effet la MOS permet d'améliorer les scores des prévisions des certaines composantes pluviométriques à forts impacts agricoles tel que les pauses extrêmes (Marteau, 2011).

Pour vérifier la qualité agronomique des saisons vis-à-vis de l'occurrence des pauses extrêmes et des autres facteurs pluviométriques, il va falloir réaliser des simulations de sensibilité en régime multi-modèles de culture. Ces modèles de culture doivent être callés et validés en milieu paysan sur des spéculations différentes mais assez vulgarisées dans la sous-région. En comparant les résultats des simulations sur les années ayant enregistré des pauses extrêmes à méso-échelle

et celles qui n'en ont pas, on peut estimer leurs effets sur la production des cultures. Par exemple des simulations des modules CERES-millet et CROPGRO du modèle de culture DSSAT<sup>1</sup> avec le modèle SARRAH, callés sur le mil Zatib, Souna III et le niébé (Dan ITA), l'arachide (Fleur 11), permettront de statuer sur les impacts des changements observés sur le régime pluviométrique.

Le projet CORDEX offre également une opportunité d'analyser l'occurrence des pauses pluviométriques dans les scénarii de changement climatique, avec des simulations multi-modèles régionaux de climat. Le diagnostique de l'évolution temporelle du signal pourra être testé facilement par le SFS (Student-Fisher Statistical Scheme) pour identifier l'ampleur des changements, s'il est développé comme un paquet de  $\mathfrak{R}$ . La figure 6.1 illustre l'organigramme conceptuel du SFS tel que décrit par Salack *et al.* (2011)

C'est en partant des résultats de Balme *et al.* (2004), Moron *et al.* 2006, Baron *et al.* (2005) et Marteau (2011) que nous avons voulu poser la question de la cohérence spatiale autrement, en utilisant les pauses pluviométrique. Au même moment, combien de sites sont en pause pluviométrique d'une durée (L)? Nous appelons une telle pause une "pause synchrone" ou pause régionale. Ceci est une autre façon de définir les risques agro-météorologiques sur une zone (district, commune, région etc...). Sur la base de cette question nous avons envisagé de nouvelles définitions du jour sec (pluvieux). Dans la suite de nos recherches cette approche sera testée et mise en relation au modèles de climat pour voir de quelles meilleures façons on peut mieux interpréter les résultats des modèles de climat au Sahel.

Dans les travaux de Salack (2007), il utilise quatre GCM (ARPEGE-CLimat, LMDZ4, UCLM, ECHAM4.5) et deux simulations zommées du LMDZ4 (80 km et 20 km) pour analyser la distribution de la pluie simulée par les modèles. En utilisant la méthode des seuils de Hansen *et al.* (2006) basée sur les CDF, il arrive à montrer qu'on peut filtrer 1-5 mm/jour dans un modèle global (selon qu'on soit dans les régions sèches ou pluvieuses du Sénégal) sans perdre assez d'informations sur les cumuls saisonniers et la distribution des pauses pluviométriques. Est-ce que cette considération est aussi valable pour les MRC? Dans l'annexe D, nous avons fait un filtre de 1 mm pour voir si cela permettra d'avoir une meilleure distribution de la pluie dans les MRC sans perdre de l'information. Il serait pertinent de tester plusieurs filtres successifs au

---

1. Decision Support System for Agro-technology Transfer, version 4.5

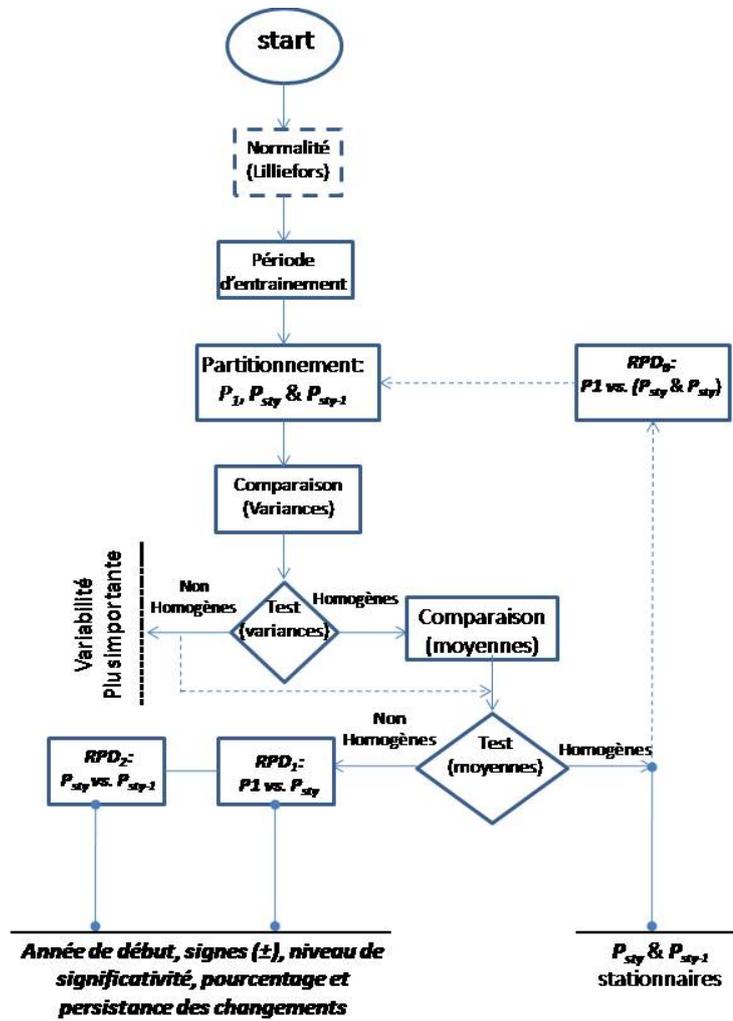


Figure 6.1: Organigramme conceptuel du Student-Fisher Statistical Scheme (SFS, Salack et al., 2011)

travers d'un modèle de culture pour juger de leur pertinence.

# Bibliographie

Abdi H and Molin P (2007) Lilliefors/Van Soet's test of normality. In : Neil Salkind (Ed.) (2007), *Encyclopedia of Measurement and Statistics*.

<http://www.utdallas.edu/~herve/Abdi-Lillie2007-pretty.pdf>

Acmad (1998) Pr evision climatique en Afrique. OMM, Gen ve. 209p.

Acmad (2011) Seasonal climate outlook valie=d for July-August-September 2011 in West Africa, Chad and Cameroon. *African Centre for Meteorological Applications for Development*. 5p.

Agrhymet (1996) M ethodologie de suivi des zones   risque. AGRHYMET FLASH, *Bulletin de Suivi de la Campagne Agricole au Sahel*, Centre Régional Agrhymet, B.P. 11011, Niamey, Niger, Vol. 2, No. 0/96, 2 pp.

Alexandrov V. A., Hoogenboom G (2000) the impact of climate variability and change on crop yield in Bulgaria. *Kluwer academic publishers*, printed in Great briatin. Agricultural production journal.

Alhassane A, Traoré SB, Zouzou M, Sarr B, Amadou M (2006) Effet de la fertilisation azot e, 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, (1-2) : 99-116.

Alhassane A (2009) Effet du climat et des pratiques culturales sur la croissance et le développement du mil (*Pennisetum Glaucum* (L.) R. Br.) au Sahel : contribution à l'amélioration du modèle SARRA-H de prévision des rendements. Thèse de doctorat de l'Université de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire, Physiologie végétale, 223 p.

Ali A, Lebel T (2009) The Sahelian standardized rainfall index revisited. *International Journal of Climatology* 29 (12) : 1705–1714. doi :10.1002/joc.1832

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

Balme M, Galle S, Lebel T (2004) Démarrage de la saison des pluies au Sahel : variabilité aux échelles hydrologique et agronomique, analysée à partir des données EPSAT-Niger. *Sécheresse*. Volume 16, N 1, 15-22.

Baron C, Sultan B, Balme M, Sarr B, Traore S, Lebel T, Janicot S, Dingkuhn M (2005) From GCM grid cell to agricultural plot : scale issues affecting modeling of climate impact. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 360 (1463) :2095–2108. Doi :10.1098/rstb.2005.1741.

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.

Bazzaz F et Sombroek W (1997) Changement du climat et production agricole. *FAO et Polytechnica*. 406p.

Becker, E. and G. Schmitz (2003) Climatological effects of orography and land–sea heating contrasts on the gravity wave–driven circulation of the mesosphere. *Journal of Atmospheric Science*, 60, 103–118.

- Bell MA, Lamb PJ (2006) Integration of Weather System Variability to Multidecadal Regional *Climate Change Journal* : The West African Sudan–Sahel Zone, 1951–98. *J. Climat.* 19, 5343-5365.
- Ben Mohamed A (2010) Climate change risks in Sahelian Africa. *Regional Environmental Change*. Published online in Springer-Verlag. DOI 10.1007/s10113-010-0172-y.
- Berg A, Sultan B, De Noblet N (2010) What are the dominant features of rainfall leading to realistic large-scale crop yield simulations in West Africa? *Geophysical Research Letters* 37, Doi :10.1029/2009GL041923.
- Bouali L (2009) Prévisibilité et prévision statistico-dynamique des saisons des pluies associées à la mousson ouest africaine à partir d'ensembles multi-modèles. Thèse de Doctorat de l'Université de Bourgogne, France, 159p.
- Camberlin P, Diop M (2003) Application of daily principal component analysis to the assessment of the rainy season characteristics in Senegal. *Climate Research* 23, 159-169.
- Catherinet MD, Dumont S, Mayaki AA (1963) Millet and sorghum in Niger. Cultivation water requirements, soil and climate, limiting factors. *L'Agronomie Tropicale*, 18 : 108-113.
- Chantereau J, Nicou R (1991) Le sorgho. *Le Technicien d'Agriculture Tropicale*. CTA. *Maison-neuve et Larose*. Paris ; France. P. 41-52.
- Challinor AJ, Wheeler TR, Slingo JM, Craufurd PQ, Grimes DIF (2004) Design and optimisation of a large-area process-based model for annual crops. *Agricultural and Forest Meteorology*, 124, 99–120.
- Cilss (2002) Catalogue régional des variétés de semences vulgarisées dans les pays membre

du CILSS. Rapport de synthèse. *Club du Sahel*, CILSS Ouagadougou. 216p.

Cochemé J, Franquin P (1967) An agroclimatological survey of a semi-arid area in Africa south of the Sahara. *Technical note* No. 86. Geneva : World Meteorological Organization.

Dai A, Lamb PJ, Trenberth KE, Hulme M, Jones PD, and Xie P (2004) The recent Sahel drought is real. *International Journal of Climatology*, 24, 1323–1331.

Denise MS, Jemain AA, K Ibrahim (2009) The best probability models for dry and wet spells in peninsular Malaysia during monsoon seasons. *International Journal of Climatology*; doi : 10.1002/joc.1972.

Der Megreditchian G (1992) Le traitement statistique des donnée Multidimensionnelles. Application à la météorologie. *Cours et Manuel No 8. Tome 1. Météo France, France*. 287pp.

Diagne B, Sagna P, Sene A (2005) Analyse de l'évolution climatique actuelle au Sénégal. African multidisciplinary monsoon analyses (AMMA). *1st international conference. Poster 1. 56P. Extended abstracts*. 677p.

Diedhiou A, Janicot S, Viltard A, de Felice P, Laurent H (1999) Easterly wave regimes and associated convection over West Africa and the tropical Atlantic : Results from NCEP/NCAR and ECMWF reanalyses. *Climate Dynamics* 15 : 795-822.

Dieng O, Roucou P, Louvet S (2008) Variabilité intra saisonnière des précipitations au Sénégal (1951-1996). *Sécheresse* 19 (2) : 87-93.

Dingkuhn M, Baron C, Bonnal V, *et al.* (2003) Decision-support tools for rainfed crops in the Sahel at the plot and regional scales. In : Struif-Bontkes TE, Wopereis MCS, eds. A practical guide to decision-support tools for agricultural productivity and soil fertility enhancement

in sub-Saharan Africa. Muscle Shoals (Alabama, États-Unis) : International Fertilizer Development Center (IFDC); *Center for Agricultural Rural Cooperation* (CTA). 127-39.

Drame MS (2012) Caractérisation et impacts climatiques des aérosols en Afrique de l'Ouest. Thèse de Doctorat de l'Université Cheikh Anta Diop, Sénégal. 230p.

Easterling R D, Alexander L V, Mokssit A, Determmerman V (2003) CCI/CLIVAR workshop to develop priority climate indices, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 8, 1403-1407.

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

Farrara, JD, CR Mechoso and AW Robertson (2000) Ensembles of AGCM two-tier predictions and simulations of the circulation anomalies during winter 1997-1998. *Monthly Weather Review*, 128, 3589-3604.

Filberti M, A Friedlingstein P, Grandpeix JY, Krinner G, Le Van P, Li ZX, Lott F (2006) The LMDZ4 general circulation model : climate performance and sensitivity to parametrized physics with emphasis on tropical convection. *Climate Dynamics* 27. 787-813.

Frappart F, Hiernaux P, Guichard F, Mougou E, Kergoat L, Arjounin M *et al.* (2009) Rainfall regime across the Sahel band in the Gourma region, Mali. *Journal of Hydrology*. doi :10.1016/j.jhydrol.2009.0

Ghaffari A, Cook HF, Lee HC (2002) Climate change and winter wheat management, a modelling scenario for South-Eastern England. *Climate change journal*, 55 : 509-533.

Folland CK, Palmer TN, Parker DE (1986) Sahel rainfall and worldwide sea temperatures, 1901-85, *Nature*, 320, 602-607, doi :10.1038/ 320602a0.

Gaye A, Viltard A, De Félice P (2005) Lignes de grains et pluies en Afrique de l'Ouest : part des lignes de grains à la pluie totale des étés 1986 et 1987. *Sécheresse*. Volume 16 (No 4) : 269-273.

Giannini A, Biasutti M, Held I, Sobel AH (2008) A global perspective on African climate. *Climatic Change*, 90, 359-383, doi :10.1007/s10584-008-9396-y.

Giannini A, Salack S, Loudon T, Ali A, Ndiaye O (2013) A unifying view of climate change in the Sahel linking intra-seasonal, interannual and longer time scales. *Environmental Research Letters*, 8 (2013) 024010 (8pp). Doi :10.1088/1748-9326/8/2/024010.

Giannini A, Saravanan R, Chang P (2003) Oceanic forcing of Sahel rainfall on interannual to interdecadal time scales. *Science* 302, 1027–1030.

Giorgi F, Marinucci M, Bates G (1993) Development of a second generation Regional climate model, i. Boundary Layer and radiative transfer processes, *Monthly Weather Review*, 121, 2794-2813.

Goddard L, Mason SJ, Zebiak SE, Ropelewski CF, Basher R, Cane MA (2001) Current approaches to seasonal-to-interannual climate predictions. *International Journal of Climatology* 21 :1111–1152.

Grist PJ, Nicholson ES (2001) A study of the dynamical factors influencing rainfall variability in the West African Sahel. *Journal of climate* 14 : 1337-1359.

Gueye M, Sivakumar MVK (1992) Analyse de la longueur de la saison culturale en fonction de la date de début des pluies au Sénégal. Compte rendu des travaux No 2. Niamey (Niger) : *Centre sahélien de l'ICRISAT*. <http://library.wur.nl/isric/fulltext/ISRIC-13235.pdf>.

Hachigonta S, Reason CJC, Tadross M (2008) An analysis of onset date and rainy season duration over Zambia. *Theoretical and Applied Climatology* 91, 229–243. DOI 10.1007/s00704-007-0306-4.

Hagemann S, Chen C, Jan OH, Jens H, Dieter G, Claudio P (2011) Impact of a Statistical Bias Correction on the Projected Hydrological Changes Obtained from Three GCMs and Two Hydrology Models. *Journal of Hydrometeorology*, 12, 556–578. doi : <http://dx.doi.org/10.1175/2011JHM1336>.

Hansen JW, Challinor A, Ines A, Wheeler T, Moron V (2006) Translating climate forecasts into agricultural terms : advances and challenges. *Climate Research* 33. 27–41.

Herrera E, Ouarda TBMJ, Bobée B (2006) Méthodes de désagrégation appliquées aux modèles du climat global Atmosphère-Océan (MCGAO). *Revue des Sciences de l'eau* 19 (4) : 297-312.

Heuvelink GBM (1998) Uncertainty analysis in environmental modelling under a change of spatial scale. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 50 : (1–3)255–64.

Hirsch R M, Helsel D R, Cohn T A, and Gilroy E J (1993) Statistical Analysis of Hydrologic Data, in *Handbook of Hydrology*, edited by Maidment D.R., pp. 17.1-17.55, McGraw Hill, Inc., New York.

Hoogenboom G., Jones JW, Porter CH, Wilkens PW, Boote KJ, Batchelor WD, Hunt LA, Tsuji GY (2003) Decision Support System for Agrotechnology Transfer Version 4.0. *University of Hawaii*, Honolulu, HI.

Hourdin F, Musat I, Guichard F. et al., (2010) Amma-model intercomparison project. *Bulletin of the American Meteorological Society*. DOI :10.1175/2009BAMS2791.1.

Hourdin F (2005) Représentation du transport directe et indirect dans les modèles globaux de climat et étude des couplages entre composition et dynamique atmosphérique sur Titan. Mémoire pour obtenir une habilitation à diriger des recherches. *Laboratoire de météorologie Dynamique du CNRS*. 240p.

Hourdin F, Musat I, Bony S, Braconnot P, Codron F, Dufresne JL, Fairhead L, Hulme M (1992) Rainfall changes in Africa -1931-1960 to 1961-1990. *International Journal of Climatology* 12 : 685–699.

Ines AVM, Hansen JW (2006) Bias correction of daily GCM outputs for crop simulation studies. *Agricultural and Forest Meteorology* 138 :44–53.

IPCC (2007) Climate change : The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University press*. 996pp.

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, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. *Cambridge University Press*, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 582 pp.

Janicot S, Mounier F, Diedhiou A (2008) Les ondes atmosphériques d'échelle synoptique dans la mousson d'Afrique de l'Ouest et centrale : ondes d'est et ondes de Kelvin. *Sécheresse*. Volume 19, Numéro 1, 13-22. DOI : 10.1684/sec.2008.0115.

Janicot S, Thorncroft CD, Ali A (2008b) Large-scale overview of the summer monsoon over West Africa during the AMMA field experiment in 2006. *Annales Geophysicae*, 26, 2569–2595.

Janicot S, S Trzaska, and I Pocard (2001) Summer Sahel-ENSO teleconnection and decadal time scale SST variations. *Climate Dynamics*, 18, 303–320.

Jenkins G, Adamou G, Fongang S (2002) The challenges of modelling climate variability and change in West Africa. *Climate change*, 52 : 263-286.

Jones RG, Noguer M, Hassell DC, Hudson D, Wilson SS, Jenkins GJ, Mitchell JFB (2004) Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS. *Meteorological Office Hadley Center, Exeter, UK*, 40p.

Katz RW, Glantz MH (1986) Anatomy of a rainfall index. *Monthly Weather Review*, 114, 764-771.

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 (4) 563-572.

Lafore, J-P, P Chapelet, Z Mumba, N Chapelon, M Dufresne, R Agbadu, A Abdoul-Aziz, et al. (2007) Manuel du prévisionniste pour tracer le WASA/F (West African Synthetic Analysis/Forecast). Rapport d'activités dans le cadre du projet AMMA, traduit par Florent Beucher. 18p.

Lafore J-P, C Flamant, F Guichard, D J Parker *et al.* (2011) Progress in understanding of weather systems in West Africa. (*Atmospheric Science letters*) 12,1, 7-12.

Lamb PJ, Pepler RA (1992) Further case studies of tropical Atlantic surface atmospheric and oceanic patterns associated with sub-Saharan drought. *Journal of Climate* 5 : 476–488.

Lanà X, MD Martinez, A Burgueno, C Serra, J Martin-Vide, L Gomez (2008) Spatial and temporal patterns of dry spell lengths in the Iberian Peninsula for the second half of the twen-

tieth century. *Theoretical and Applied Climatology* 91 : 99-116.

Laurent H, D'Amato N., Lebel T. (1998) How important is the contribution of the mesoscale convective complexes to the Sahelian rainfall?. *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 23, Issues 5-6, 629-633. Doi : 10.1016/S0079-1946(98)00099-8.

Le Barbé L, Lebel T, Tapsoba D, (2002) Rainfall variability in West Africa during the years 1950-90. *Journal of Climate* 15 (2), 187-202.

Le Houerou H N (1992) Relations entre la variabilité des précipitations et celle des productions primaires et secondaires en zone aride. In *L'aridité, une contrainte au développement. Didactiques. Paris. Orstom editions.*

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.

Lebel T, Parker D J, C Flamant et al. (2009) The AMMA field campaigns : Multiscale and multidisciplinary observations in the West African region. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. Published online in Wiley InterScience. DOI : 10.1002/qj.486.

Lilliefors H (1967) On the Kolmogorov-Smirnov test for normality with mean and variance unknown. *Journal of American Statistics Association*, Vol. 62. pp. 399-402.

Madden RA (1976) Estimates of natural variability of time-averaged sea level pressure. *Monthly Weather Review*, 104, 942-952.

Maiti RK and Bidinguer FR (1981) Growth and development of pearl millet plant. *Icrisat research bulletin*, No 6.

- Marteau R (2011) Cohérence spatiale et prévisibilité potentielle des descripteurs intra-saisonniers de la saison des pluies en Afrique soudano-sahélienne : Application à la culture du mil dans la régions de Niamey. Thèse de doctorat. *Université de Bourgogne*. 242p.
- 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, 123-129.
- Mathon V, Laurent H (2001) Life cycle of sahelian mesoscale convective cloud systems. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 127(B), 572 : 377-406.
- Mavromatis T, Jones PD (1998) Evaluation of HadCM2 and direct use of daily GCM data in impact assessment studies. *Climate Change Journal*, 41 :583–614.
- Misra AN, Misra M (1991) Physiological responses of pearl millet to agroclimatic conditions determining grain formation and yield. *Environmental Contamination And Hygiene* : 165-175.
- Mohino E, Rodriguez-Fonseca B, Mechoso CR, Gervois S, Ruti P, Chauvin F (2011) Impacts of the Tropical Pacific/Indian Oceans on the Seasonal Cycle of the West African Monsoon. *Journal of Climate*, 24, 3878-3891.
- Moron V, Robertson, Ward MN (2006) Seasonal Predictability and spatial coherence of rainfall characteristics in the tropical setting of Senegal. *Monthly Weather Review* 134 : 3248-3262.
- Mounier F, Kiladis G, Janicot S (2007) Analysis of the dominant mode of convectively coupled Kelvin waves in the West African Monsoon. *Journal of climate* 20 : 1487-14503.
- Ndiaye O, Ward NM, Thiaw W (2011) Predictability of Seasonal Sahel Rainfall Using GCMs and Lead-Time Improvements Through the Use of a Coupled Model. *Journal of Climate* 24 :1931-1949. DOI : 10.1175/2010JCLI3557.1.

Ndiaye O, Goddard L, Ward NM (2009) Using regional wind fields to improve general circulation model forecasts of July–September Sahel rainfall. *International Journal of Climatology*, 29 : 1262–1275. DOI : 10.1002/joc.1767.

New M, Hewitson B, Stephenson D B *et al.* (2006) Evidence of trends in daily climate extremes over southern and west Africa, *Journal of Geophysical Research*, 111, D14102, Doi : 10.1029/2005JD006289.

Nicholson SE (1983) Sub-Sahara rainfall in the year 1976-1980 : Evidence of Continued drought. *Monthly Weather Review*, 3, 1646-1654.

Nicholson SE (2005) On the question of the "recovery" of the rains in the West African Sahel. *Journal of Arid Environment* 63, 615–641.

Nicholson SE (2009) On the factors modulating the intensity of the tropical rainbelt over West Africa. *International Journal of Climatology* 29 : 673–689.

Nicholson SE, Some B, Kone B. (2000) An analysis of recent rainfall conditions in West Africa, including the rainy seasons of the 1997 El-Nino and the 1998 La Nina years. *Journal of Climate* 13 : 2628–2640.

Nzeukou A, Sauvageot H (2002) Distribution of rainfall parameters near the coasts of France and Senegal. *Journal of Applied Meteorology*, 41, 69-82.

Oettli P, Sultan B, Baron C, Vrac M (2011) Are regional climate models relevant for crop yield prediction in West Africa ? *Environmental Research Letters* 6 ; 014008 (9pp). doi :10.1088/1748-9326/6/1/014008.

Oladipo EO, Kyari JD (1993) Fluctuations in the onset, termination, and length of the growing season in northern Nigeria. *Theoretical and Applied Climatology* 47 : 241–250.

Oxfam (2009) What Happened to the Seasons? Oxfam GB Research Report.

Ozer P, Bodart C and Tychon B (2005) Climatic analysis of the Gouré area, eastern Niger : recent changes and environmental impacts. *Cybergeogeo, Environnement, Nature, Paysage*, article 308. <http://www.cybergeogeo.eu/index3338.html>.

Ozer P, Erpicum M, Demarée G, Vandiepenbeeck M (2003) The Sahelian drought may have ended during the 1990s. *Hydro. Sc. J.* 48, 489–492.

Paeth H, Hall MJN, Gaertner AM et al. (2011) Progress in regional downscaling of West African precipitation. *Atmospheric Science Letter* 12 : 75-82. DOI : 10.1002/asl.306.

Palmer TN, Anderson DLT (1994) : The prospects for seasonal forecasting : a review paper. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 120 : 755–793.

Palmer TN et al. (2004) Development of a European multimodel ensemble system for seasonal to inter-annual prediction (DEMETER). *Bulletin of the American Meteorological Society*; 85, 853–872.

Rayner NA, Parker DE, Horton EB, Folland CK, Alexander LV, Rowell DP, Kaplan A (2003) Globally complete analyses of SST, sea ice, and night marine air temperature, 1871-2000. *Journal of Geophysical Research*, 108, doi :10.1029/2002JD002670.

Redelsperger JL, Thorncroft C, Diedhiou A, Lebel T, Parker D, Polcher J (2006) African monsoon, multidisciplinary analysis (AMMA) : an International research project and field campaign. *Bulletin of the American Meteorological Society* 87 (12), 1739–1746.

Reed RJ, Norquist DC, Recker EE (1977) The structure and characteristics of African easterly wave disturbances as observed during Phase III of Gate. *Monthly Weather Review*, 105,317-333.

Roca R, Lafore JP, Piriou C, Redelsperger JL (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.

Roehrig R (2010) Variabilité Intrasaisonnière de la Mousson Africaine : Caractérisation et Modélisation. Thèse de doctorat de l'Université Paris Est, Paris, France. 395p  
Rosenweig C, Iglesias A (1998) The use of crop models for international climate change impact assessment. *A kluwer academic publishers*, printed in G.B under the options of agri. Prod. Pg. 267-292.

Roudier P, Sultan B, Quirion P, Baron C, Alhassane A, Traoré SB, Muller B. An ex-ante evaluation of the use of seasonal climate forecasts for millet growers in SW Niger. *International Journal of Climatology* 2011 ; DOI : 10.1002/joc.2308.

Troccoli A, Palmer TN (2007) Ensemble decadal predictions from analysed initial conditions. *Philosophical Translation of Royal Society A* 365, 2179-2191. Doi : 10. 1098/rsta.2007.2079.

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 A T, Hourdin F (2009b) Multi-scale intra-seasonal characterization of dry spells in Senegal and their implication in the rainy season attributes. *Work presented at the 3rd International AMMA Conference*, Ouagadougou, 20-24 July 2009.

Salack S, Muller B, Gaye A T, Sylla C, Fall M (2009a) Updated space-time rainfall regimes

and agro-climatological features in Senegal. Work presented at the 3rd International AMMA Conference, Ouagadougou, 20-24 July 2009.

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*. doi : 10.1007/s00704-011-0414-z.

Salack S., Sarr B. (2006) : Etude d'impacts des changements climatiques sur la production du riz pluvial et irrigué en zone soudano-sahélienne des pays membre du CILSS. *Centre régional Agrhymet*. 80p.

Salack S. ; Traore, B, S (2005) Synthèse sur la collecte, la mise en forme et le stockage des données climatologiques des pays du CILSS et Etude d'impacts des changements climatiques sur la production agricole au Sahel. *Centre régional Agrhymet*. 100p.

Sane T, Diop M, Sagna P (2008) Etude de la variabilité de la saison pluvieuse au Sud en Haute-Casamance (Sud-Sénégal). *Sécheresse* 19. (1). 23-28.

Sarr B, Traoré S, Salack S (2006) Evaluation de l'incidence des changements climatiques sur les rendements des cultures céréalières en Afrique soudano sahélienne. *Centre Régional Agrhymet*. 100pp.

Segele ZT, Lamb PJ (2005) Characterization and variability of Kiremt rainy season over Ethiopia. *Meteorology and Atmospheric Physics* 89, 153–180.

Sene S, Ozer P (2002) Evolution pluviométrique et relation inondations – évènements pluvieux au Sénégal, *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 42, 27-33.

Sivakumar M V K, Valentin C (1997) Agroecological zones and the assessment of crop pro-

duction potential. *Philosophical Translation of Royal Society Lond. B* (1997) 352, 907–916.

Sivakumar MVK (2006) Climate prediction and agriculture : current status and future challenges. *Climate Research*, 33 : 3–17.

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 : 532–539.

Smith JW, Reynolds AE, Pratt AS, Salack S (et al.) (2010) Observations of an 11 September Sahelian Squall Line and Saharan Air Layer Outbreak during NAMMA-06. *Atmospheric Chemistry and Physics* (under review).

Stern R, Rijks D, Dale I, Knock J (2006) *Instat Climatic Guide*. University of Reading, UK. 330p.

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 (1-2) : 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, 3407–3427.

Sultan B, Janicot S (2004) La variabilité climatique en Afrique de l’Ouest aux échelles intrasaisonnières. I : mise en place de la mousson et variabilité intra-saisonnière de la convection. *Sécheresse* 15 : 321-30.

Sultan B, Baron C, Dingkuhn M, Janicot S (2005) La variabilité climatique en Afrique de l'Ouest aux échelles intrasaisonnières. II : applications à la sensibilité des rendements agricoles au Sahel. *Sécheresse* 15 : 321-30.

Sultan B, Janicot S, Diedhiou A (2003) The African Monsoon Dynamics. Part I : Documentation of Interseasonal Variability. *Journal of climate* 16, 21 : 3389-3406.

Sultan B, Janicot S, Dingkuhn M, Muller B, Traoré S, Sarr B (2008) Les impacts agronomiques du climat en Afrique de l'Ouest : une illustration des problèmes majeurs. *Sécheresse* 19 (1) : 29-37.

Sylla MB, Gaye AT, Pal JS, Jenkins GS, Bi XQ, (2010a). High-resolution simulations of West African climate using regional climate model (RegCM3) with different lateral boundary conditions. *Theoretical and Applied Climatology*. DOI 10.1007/s00704-009-0110-4.

Sylla MB, Dell'Aquila A, Ruti PM, Giorgi F, (2010b). Simulation of the intraseasonal and the interannual variability of rainfall over West Africa with RegCM3 during the monsoon period. *International Journal of Climatology*. DOI : 10.1002/joc.2029.

Traoré SB, Agali A, Muller B et al. (2011). Characterizing and modeling the diversity of cropping situations under climatic constraints in West Africa. *Atmospheric Science Letter* 12 :89-95. Doi : 10.1002/asl.295.

Teutschbein C, Seibert J (2012) Is bias correction of Regional Climate Model (RCM) simulations possible for non-stationary conditions? *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 9, 12765–12795.

van der Linden P, Mitchell JFB (2009) ENSEMBLES : Climate Change and its Impacts : Summary of research and results from the ENSEMBLES project. *Met Office Hadley Centre*,

FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK. 160pp.

Viltard A, de Féllice P (1979) Statistical analysis of wind velocity in an easterly wave over West Africa. *Monthly Weather Review* 107 : 1320-7.

Von Storch H, Zwiers WF (2003) Statistical analysis in climate research. *Cambridge University press*. 484p.

Wang, XL, H Chen, Wu Y, Feng Y, Pu Q (2010) New Techniques for the Detection and Adjustment of Shifts in Daily Precipitation Data Series. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49, 2416–2436. doi : <http://dx.doi.org/10.1175/2010JAMC2376.1>

Ward MN (1998) Diagnosis and short-lead time prediction of summer rainfall in tropical North Africa at interannual and multi-decadal time scales. *Journal of Climate* 11, 3167–3191.

Winkel T, Do F (1992) Caractéristiques morphologiques et physiologiques de résistance du mil (*P. glaucum*) à la Sécheresse. *Agronomie Tropicale* 46 (4) : 339-351.

Yues S, Pilon P (2004) A comparison of the power of the t-test, Mann-Kendall and bootstrap tests for trend detection. *Hydrology Science Journal*, 49(1), 21-36.

Zhang XC (2003) Assessing seasonal climate impact on water resources and crop production using CLIGEN and WEPP models. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 46 :685–693.

Zorita E, Von Storch H (1999) The analogue method - a simple statistical downscaling technique : comparison with more complicated methods. *Journal of Climate*, 12 : 2474-2489.

# Première partie

## Annexes

## Annexe A

Coordonnées géographiques et series  
journalières des pluviomètres utilisés

Tableau A.1 – *Coordonnées (degrés décimaux), nom de site, nom de code attribué et séries journalière complètes disponibles dans le cadre des travaux d'analyses au Sénégal.*

Série	Station	Long (°.dec)	Lat (°.dec)	Code	Séries journalières disponibles
1	Aere-lao	-14,32	16,4	Arl	1987-2010
2	Baba-garage	-16,48	14,95	Bbg	1987-2010
3	Bakel	-12,47	14,90	Bak	1950-2010
4	Bambey	-16,47	14,70	Bam	1950-2010
5	Bignona	-16,27	12,67	Big	1987-2008
6	Birkilane	-15,75	14,13	Bir	1987-2010
7	Bonkonto	-13,95	12,97	Bon	1987-2010
8	Boulel	-15,53	14,28	Bol	1950-2010
9	Boukiling	-15,68	13,17	Bou	1987-2010
10	Coki	-16,00	15,52	Cok	1950-2010
11	Dabo	-14,48	12,80	Dab	1987-2010
12	Dagana	-15,50	16,52	Dag	1950-2010
13	Dahra	-15,48	15,33	Dah	1950-2010
14	Dakar	-17,50	14,73	Dkr	1950-2010
15	Diattacounda	-15,77	12,48	Dia	1987-2010
16	Diende	-15,52	12,68	Die	1987-2010
17	Dioulacolon	-14,87	12,80	Dio	1987-2010
18	Diourbel	-16,23	14,65	Drb	1950-2010
19	Djilor	-16,33	14,03	Dji	1987-2010
20	Fatick	-16,40	14,33	Fat	1950-2010
21	Fongolimby	-12,02	12,42	Fog	1987-2010
22	Foundiougne	-16,47	14,12	Fnd	1987-2010
23	Gossas	-16,08	14,50	Gos	1987-2010
24	Goudiry	-12,72	14,18	God	1950-2010
25	Guinguineo	-15,95	14,33	Gui	1987-2010
26	Kael	-15,88	14,70	Kae	1987-2010
27	Kaffrine	-15,55	14,10	Kaf	1950-2010
28	Kahone	-16,03	14,15	Kah	1987-2010
29	Kaolack-Agri	-16,07	14,13	Kao	1950-2010
30	Kebemer	-16,45	15,37	Keb	1950-2010
31	Kedougou	-12,22	12,57	Ked	1950-2010
32	Keurmomar	-15,97	15,93	Kmo	1987-2010
33	Kidira	-12,22	14,47	Kid	1950-2010
34	Kolda	-14,08	12,88	Kld	1950-2010
35	Koungoul	-14,83	13,97	Kun	1950-2010
36	Koupentoum	-14,55	13,98	Kum	1987-2010
37	Linguere	-15,12	15,38	Lin	1950-2010
38	Loudia-wollof	-16,60	12,50	Lwo	1987-2010
39	Louga	-16,22	15,62	Lug	1950-2010
40	Maka-coulib.	-14,30	13,67	Mco	1987-2010
41	Maleme-hoddar	-15,30	14,08	Mho	1987-2010
42	Matam	-13,25	15,65	Mat	1950-2010

Tableau A.2 – Suite du tableau A.1

Série	Station	Long (°,dec)	Lat (°,dec)	Code	Séries journalières disponibles
43	Mbacke	-15,92	14,80	Mba	1987-2010
44	Mboro	-16,88	15,13	Mbo	1987-2010
45	Meouane	-16,67	15,07	Meo	1987-2010
46	Merina-dakh.	-16,48	15,10	Mda	1987-2010
47	Ndande	-16,53	15,27	Nda	1987-2010
48	Ndiagianiao	-16,70	14,53	Ndi	1987-2010
49	Ndiedieng	-16,13	13,93	Nde	1987-2010
50	Ndindy	-16,17	14,92	Ndd	1987-2010
51	Ndoffane	-15,93	13,92	Ndo	1987-2010
52	Ndoulo	-16,13	14,23	Ndl	1987-2010
53	Nganda	-14,43	13,80	Nga	1987-2010
54	Ngoye	-16,42	14,62	Ngo	1987-2010
55	Niakhar	-16,40	14,47	Nia	1987-2010
56	Niakhene	-16,33	15,08	Nak	1987-2010
57	Niodior	-16,73	13,90	Nid	1987-2010
58	Nioro-du-rip	-15,78	13,73	Nio	1950-2010
59	Ouadiour	-16,02	14,43	Oua	1987-2010
60	Oussouye	-16,53	12,48	Ous	1950-2010
61	Pambal	-16,90	14,97	Pam	1987-2010
62	Paoskoto	-15,80	13,77	Pao	1987-2010
63	Podor	-14,97	16,65	Pod	1950-2010
64	Pout	-17,08	14,75	Pou	1987-2010
65	Rao	-16,42	15,92	Rao	1987-2010
66	Richard-toll	-15,70	16,45	RiT	1987-2010
67	Sadio	-15,55	14,80	Sad	1987-2010
68	Sagatta-guet	-16,17	15,28	Sgt	1987-2010
69	Sakal	-16,23	15,83	Sak	1987-2010
70	Salemata	-12,80	12,62	Sal	1987-2010
71	Saraya	-11,78	12,78	Sar	1987-2010
72	Semme	-12,95	15,20	Sem	1987-2010
73	Sokone	-16,38	13,88	Sok	1987-2010
74	St-Louis	-16,45	16,05	StL	1950-2010
75	Tamba	-13,68	13,72	Tam	1950-2010
76	Tattaguine	-16,60	14,42	Tat	1987-2010
77	Thiadiaye	-16,70	14,05	Tha	1987-2010
78	Thies	-16,95	14,80	Thi	1950-2010
79	Thilmakha	-16,25	15,03	Thm	1987-2010
80	Thilogne	-16,27	12,55	Thl	1987-2010
81	Tivaouane	-16,82	14,95	Tiv	1950-2010
82	Toubacouta	-16,48	13,78	Tbc	1987-2010
83	Velingara-casamance	-14,10	13,05	Vel	1950-2010
84	Ziguinchor	-16,27	12,55	Zig	1950-2010

Tableau A.3 – *Coordonnées (degrés décimaux), nom de site, nom de code attribué et séries journalière complètes disponibles dans le cadre des travaux d'analyses au Niger.*

Série	Station	Long (°,dec)	Lat (°,dec)	Code	Séries journalières disponibles
1	Dosso	3,18	13,02	Dos	1960-2000
2	Gaya	3,50	11,98	Gay	1960-2000
3	Konni	5,25	13,80	Knn	1960-2000
4	Magaria	8,93	12,98	Mag	1960-2000
5	Mainé Soroa	11,98	13,23	Mne	1960-2000
6	Maradi	7,42	13,47	Mar	1960-2000
7	Nguigmi	13,12	14,25	Ngm	1960-2000
8	Niamey	2,13	13,50	Nym	1960-2000
9	Tahoua	5,30	14,90	Tah	1960-2000
10	Tillabery	1,45	14,20	Til	1960-2000
11	Toukounouss	3,28	14,05	Tkn	1960-2000
12	Zinder	8,98	13,80	Znd	1960-2000

# Annexe B

## Présentation sommaire de SARRAH

### B.1 Phénologie des céréales dans le Modèle SARRAH

La phénologie décrite est celle des graminées et peut être adaptée aux plantés annuelles. On considère que le semis peut être réalisé en sec. Mais le cycle végétatif ne débutera que lorsque les conditions favorables à la germination seront rencontrées. Ce choix est géré par un seuil d'humidité de la couche de surface. Les phases phénologiques sont illustrées à la figure B.1. On a donc un stade O du semis au début du cycle végétatif pendant lequel rien ne se passe et le temps thermique (dégrés jour, SDJ) n'est pas comptabilisé. On considère que la croissance racinaire débute le premier jour de la phase 1 à 1 a profondeur de semis. La phase 1 se termine à la levée. Le 1<sup>er</sup> jour de la phase 2, les biomasses et le LAI sont initiés en fonction du poids des grains. La phase 2 (BVP) représente le cumul des durées de la insensible à la photopériode, et de la durée minimale de la phase photopériodique. La phase 3 (PSP) photosensible (qui ne dure qu'un jour pour les variétés non photopériodiques) se termine par l'initiation paniculaire. La phase 4 (RPR) se termine à l'anthèse ; elle conditionne l'élaboration du potentiel de rendement. Cette phase est subdivisée en 4 sous phases d'égale durée. Les stress influençant la fertilité des grains sont calculés dans les 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> sous phase. La phase 5 (MATU 1) est la phase de formation et de remplissage des grains, et d'élaboration du rendement. En phase 6 (MATU 2) le rendement est élaboré ; c'est une phase de dessiccation des grains. En phase 7, la date de maturité est atteinte, la récolte peut intervenir.

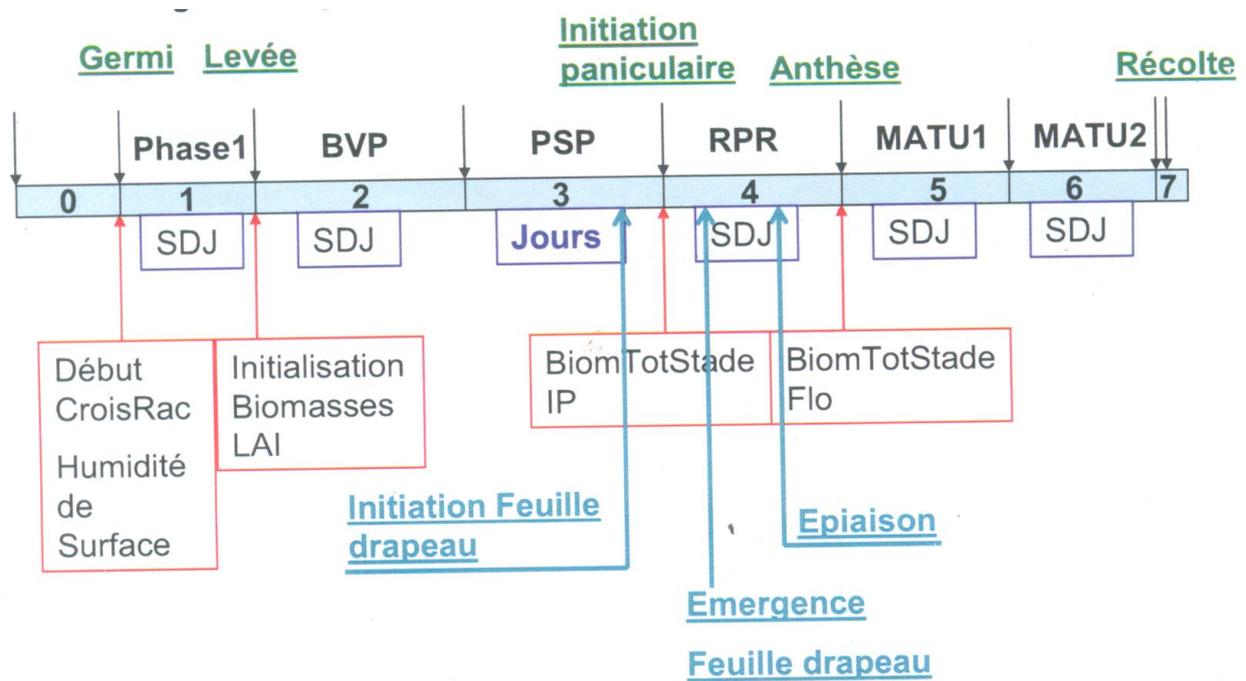


Figure B.1: Représentation schématique des phases et stades phénologiques du mil dans le modèle SARRAH.

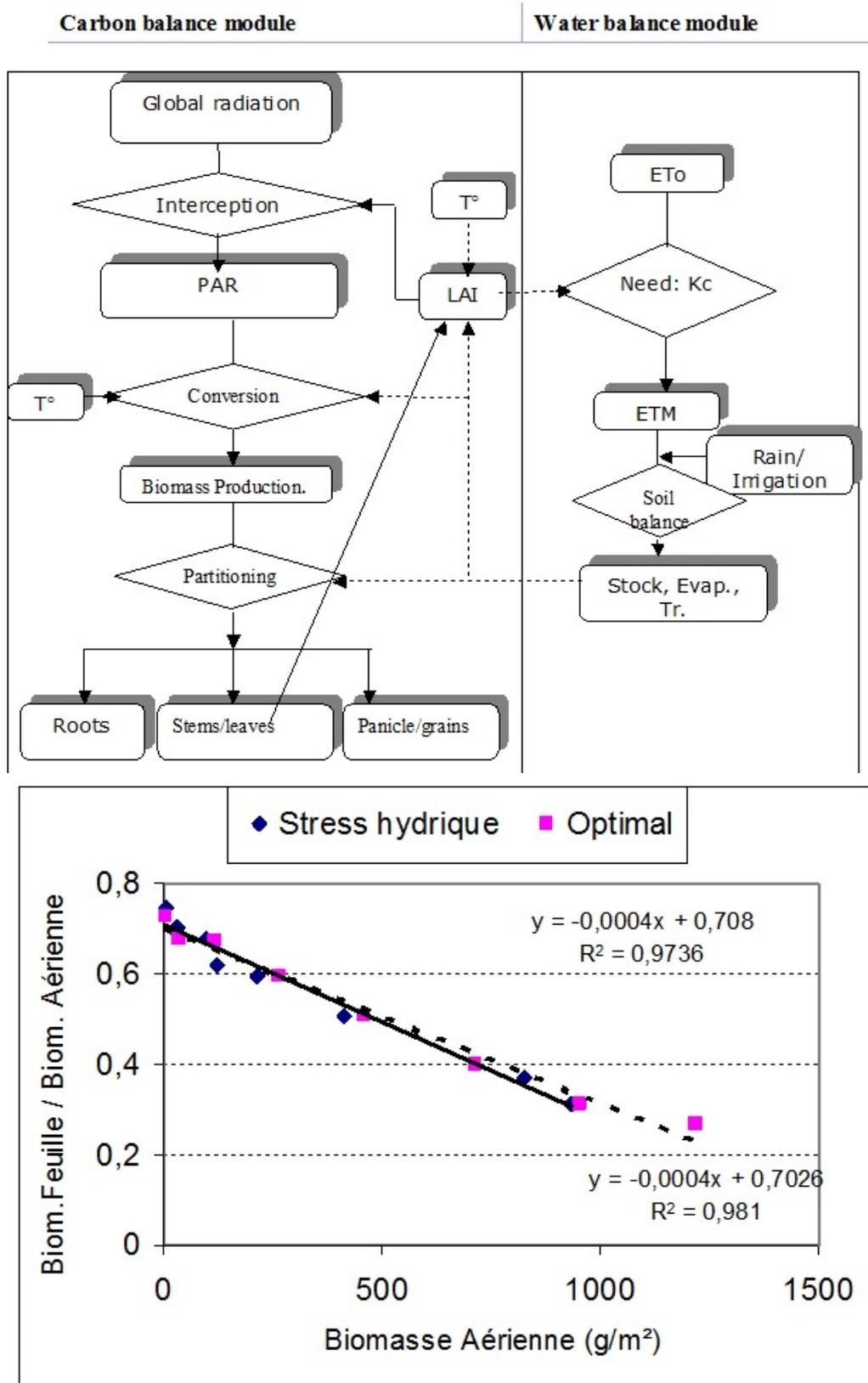


Figure B.2: (Haut) Structure modulaire du modèle SARRAH (Baron et al., 2003). (Bas) Relations allométriques chez le mil Souna III mises en évidence par expérimentation en station par B. Sarr, au CERAAS, Sénégal, 1996.

## Annexe C

Coefficients utilisés dans la  
paramétrisation du mil Souna III dans le  
modèle SARRAH

## C.1 COEFFICIENTS UTILISES DANS LA PARAMETRISATION DU MIL SOUNA III ET ITINERAIRE TECHNIQUE

### - Coefficients génétiques du mil Souna III

Le mil Souna III est une variété améliorée non photopériodique à cycle court. Elle est la variété majoritairement employée en régime pluvieux au Sénégal. Les paramètres de calage de cette variété dans le modèle SARRAH sont détaillés ci-dessous.

Tableau 1 : Quelques coefficients génétiques associés aux phases phénologiques, températures et besoin en eau du mil Souna III

Paramètre	1	2	3	4	5	Slamax	Slamin	Tbas	Topt	Kcmax	Pfactor
Valeur	50	410	500	350	150	0.006	0.0022	11	30	1.25	0.5

1 : Phase de germination à la période d'émergence (en degré jour)

2 : Phase végétative en degré (Phase juvénile à l'initiation paniculaire) en degré jour

3 : Phase de floraison en degré jour (initiation paniculaire à la fin de la floraison)

4 : Phase de remplissage des grains, période sensible au déficit hydrique (en degré jour)

5 : Phase de maturité, période insensible au déficit hydrique (en degré jour)

Tbase : température de base (°C)

Topt : température optimale (°C)

Slamax : surface foliaire spécifique maximale ( $m^2kg^{-1}$ )

Slamin : surface foliaire spécifique maximale ( $m^2 kg^{-1}$ )

Kcmax : Coefficient cultural maximal

Pfactor : Fraction d'eau disponible (Total available water (TAW)) que le mil peut extraire sans souffrir de stress.

Tableau 2: Quelques coefficients génétiques associés à l'accumulation de biomasse et rendement.

Param	$\epsilon_b1$	$\epsilon_b2$	$\epsilon_b3$	K	Realloc	Krdt	Tempmant	Respman
Valeur	5	2	0.5	0.6	0.5	25	0.45	0.01

$\epsilon_b1$ : Facteur de conversion du rayonnement pendant les phases phénologiques 1 et 2 ( $g MJ^{-1}$ )

$\epsilon_2$ : Facteur de conversion du rayonnement pendant la phase de floraison (g MJ<sup>-1</sup>)

$\epsilon_3$ : Facteur de conversion du rayonnement pendant le remplissage des grains (g MJ<sup>-1</sup>)

Realloc: Coefficient de Réallocation

Krdt: Coefficient cultural pour le rendement

Tempmaint: Température de maintenance °C

Respmaint: Respiration de maintenance (g)

### **- Sol type**

Le profile de sol est de type Sableux avec les caractéristiques suivantes.

Sol	SeuilRuiss	PourcRuiss	Ru	HumCR	HumPF	PEvap	HumSat
Sableux	15	50	100	0.15	0.02	0.2	120

### **- Itinéraire technique.**

Date Simul	Prof Rac Ini	Densité	Lai Ini	Mulch	Seuil Eau Semis	Nb JTestSemis
15/avril	0	12346	0	100	10	20

## Annexe D

# Distribution intra-saisonnière de la pluviométrie dans les modèles régionaux de climat (MRC)

Les MRC désagrègent l'information des modèles de circulation générale du climat. Ils simulent les processus physiques et dynamiques décrivant l'interaction du système climatique régional (sur une aire limitée) en réponse aux forçages des surfaces des eaux, des continents et de l'orographie. Les MRC sont également basés sur la résolution approchée de certaines équations mathématiques non-linéaires, décrivant des lois physiques telles que le transport, la conservation de la quantité de masse, la conservation d'énergie, la conservation de la quantité de mouvement etc., à l'image des modèles globaux de circulation (MCG). Cependant, ils sont plus subtiles que ces derniers car ils simulent de façon explicite les phénomènes à l'échelle de la grille du MCG et ceux qui se produisent à des échelles inférieures à la résolution du maillage (souvent appelés processus sous-maillages). Grâce aux expériences du projet AMMA-ENSEMBLES, on dispose d'une base de données de plusieurs MRC. Ils ont l'avantage d'être exécutés en mode de simulation d'ensemble c'est à dire qu'ils partagent les mêmes conditions latérales issues des ré-analyses d'ERA-Interim et le même domaine. Seules les paramétrisations internes à ces MRC sont restées les mêmes.

## D.1 Répartition des cumuls journaliers

Selon les résultats d'études antérieures (Ndiaye *et al.*, 2009), les modèles de climat ont tendance à présenter un rapport signal/bruit très important sur la pluie journalière. Figure D.1 présente la répartition des classes de cumuls journaliers dans les MRC en comparaison avec les observations dans les zones Sahéliennes et Nord-guinéennes du Sénégal. Ce caractère se traduit par une fréquence élevée des classes de pluie traces ( $< 1\text{mm/jour}$ ) et faibles ( $< 10\text{ mm/jour}$ ). Oettli *et al.* (2011), Ndiaye *et al.* (2009) et (2011), ainsi que Paeth *et al.* (2011) suggèrent des corrections statistiques en post-traitement. Cependant, selon Teutschbein et Seibert (2012), la majorité des méthodes de correction ne sont pas pertinentes dans les cas où la variabilité climatique est non-stationnaire. Pour mieux représenter la distribution intrasaisonnière de la pluviométrie sans risque de perdre la qualité du cumul saisonnier, Salack (2007) avait émis l'hypothèse de filtrer les petites pluies (1-5 mm/jour) des sorties des modèles de climat.

Deux jeux de données sont dérivés des données des MRC :

1. les extDS extraites des sorties originales des MRC ( $MRC_{ori}$ ) : ces extractions sont faites à partir de la 1<sup>ère</sup> pluie simulée après le 1<sup>er</sup> mai jusqu'au 31 octobre. Les dates de début (STDATE) et les nombres de cas par saison (F) des extDS sont les variables de sortie,
2. les extDS sont extraites également des sorties MRC filtrées au seuil de 1 mm/jour ( $MRC_{fil}$ ) : les mêmes approches d'extraction et les mêmes variables qu'au point 1) sont considérées.

## D.2 Représentation des pauses extrêmes dans les MRC

Les STDATEs en moyenne d'ensemble des 8 MRC ( $MRC_{ori}$  et  $MRC_{fil}$ ) sont comparées aux observations (Obs). La figure D.2 illustre les biais et les similitudes entre la moyenne d'ensemble des MRC et les observations selon les zones pluviométriques. On remarque que dans les zones pluviométriques de type sahélien ( $< 600\text{ mm/an}$ ) le mode de variabilité de la courbe noire ( $MRC_{ori}$ ) présente un déphasage vis-à-vis de celui de la courbe grise (Observations), dans la période MJJ. Cela veut dire que dans les simulations d'origine  $MRC_{ori}$ , les MRC simulent les dates de début de extDS d'une manière précoce. Ce déphasage est estimé à 30 jours dans les zones  $< 400\text{ mm/an}$  et 400-600 mm/an et dix jours seulement dans la zone pluviométrique de

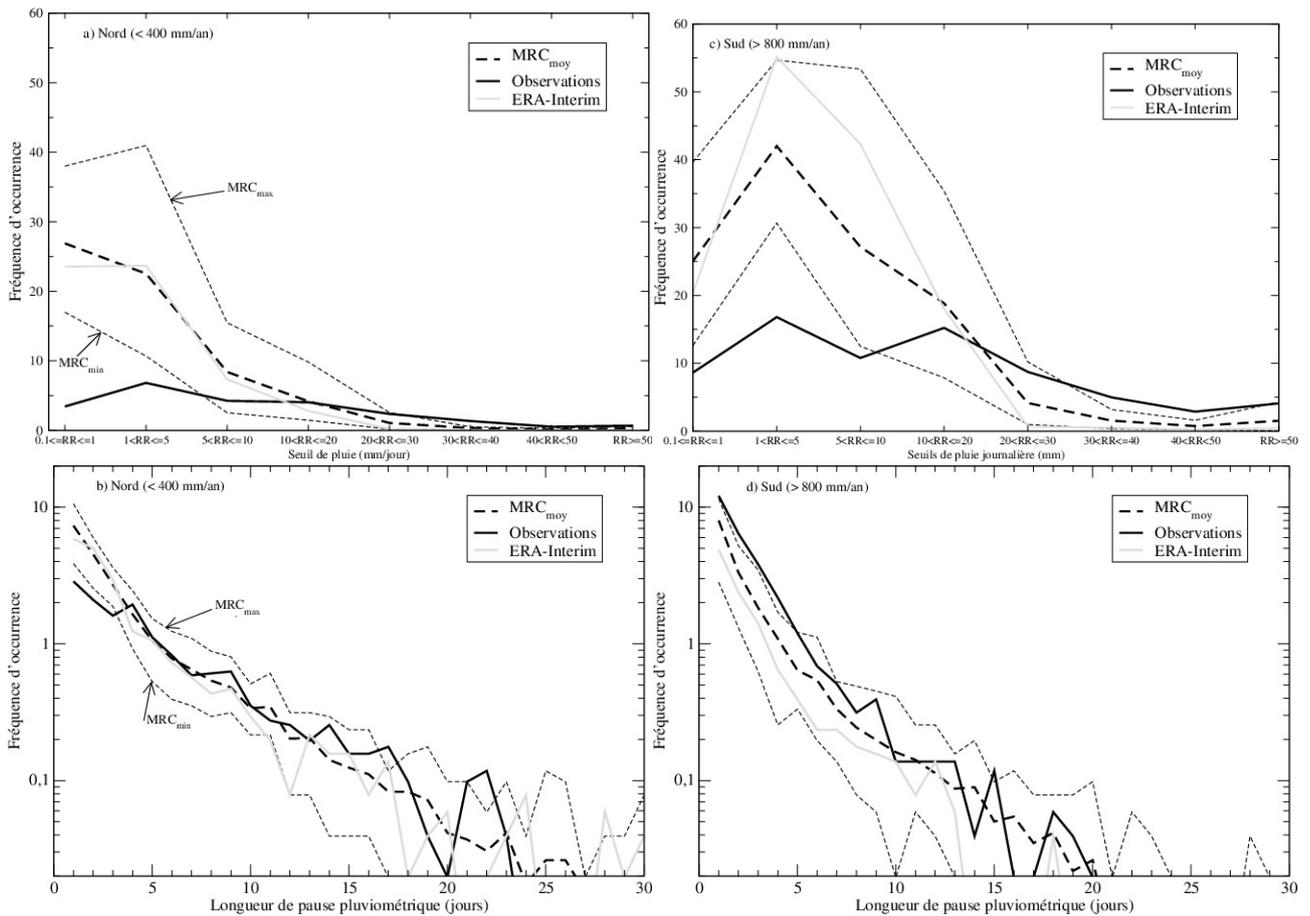


Figure D.1: Comparaison des classes de pluie et des longueurs des pauses pluviométriques simulées et observées dans les régions Nord et Sud du Sénégal. Classes de cumuls journaliers des régions du Nord (a) et du Sud (b). Fréquence-durée des pauses pluviométriques des régions du Nord (c) et du Sud (d).

600-800 mm/an. Dans les régions dont la pluviométrie moyenne annuelle est supérieure à 800 mm, les simulations d'ensemble décrivent assez bien les dates d'occurrence des pauses extrêmes en début de saison (figure D.2a). Dans la période ASO, ce déphasage est estimé à seulement 10 jours et ne s'observe que dans les régions dont la pluviométrie est déficitaire ( $< 400$  mm/an). Partout ailleurs, les simulations d'ensemble présentent des résultats similaires aux observations (figure D.2b). Lorsque les événements pluvieux de moins de 1 mm/jour sont filtrés de tous les 8 MRC ( $MRC_{fil}$ , courbe bleue sur les figures D.2a et b, la moyenne d'ensemble des MRC décrit bien les modes de la distribution des STDATES. Cependant, l'aplatissement et l'aire en dessous de la courbe des fréquences deviennent plus importants. Cette allure suggère une augmentation de la variabilité inter-annuelle des dates de début des pauses extrêmes (c'est-à-dire une augmentation des incertitudes) lorsque les "petites pluies" sont filtrées des sorties des MRC. De manière générale, le potentiel de prévisibilité des dates de début des extDS dans les MRC est plus grand dans les régions à fortes pluviométries que dans les régions sahéliennes des deux pays analysés.

Pour le cas du nombre d'occurrence saisonnière des extDS ( $F$ ), la moyenne d'ensemble des 8 MRC est confrontée à l'indice d'occurrence régional (ROI) de toutes les catégories de pauses pluviométriques observées. Les résultats de ces comparaisons sont illustrés par la figure D.2. On remarque que les simulations d'origine sont très proches des observations. Néanmoins, la moyenne d'ensemble des MRC exhibe des fréquences d'extDS exagérément élevées et longues dans les régions sahéliennes. Les conséquences d'une telle distribution intrasaisonnière de la pluie pour les études d'impacts sont abordées en détails dans le chapitre 5.

### D.3 Remarques et perspectives

Les modèles régionaux de climat peuvent prévoir les dates de début des pauses extrêmes de catégorie DS4 (en MJJ) et DS3 (en ASO) dans les zones ayant une pluviométrie moyenne annuelle  $\geq 600$  mm ainsi que les dates des catégories DS3. Cependant, ils ont du mal à exhiber une performance adéquate dans le région Sahélienne. Dans ces régions où la pluviométrie moyenne annuelle ne dépasse pas 600 mm, les risques de pauses extDS sont très importants et néfastes pour le système agricole pluvial. Malgré le filtre des cumuls journaliers  $< 1$  mm,

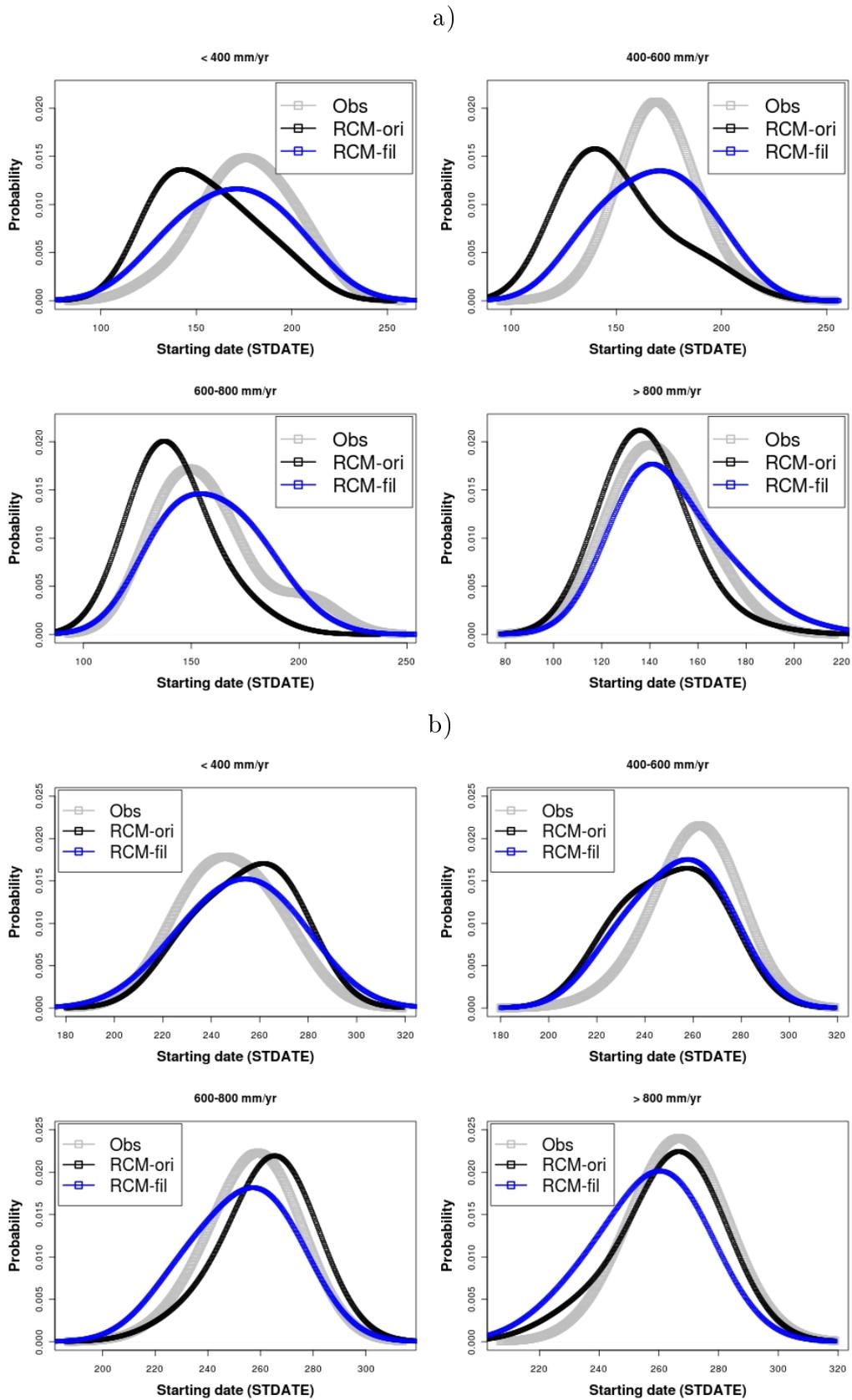


Figure D.2: Comparaison des dates de début sorties de la moyenne d'ensemble de 8 MRC aux dates de débuts de pauses extrêmes observées sur la période 1991-2007. En a) il s'agit des extractions MJJ et en b) les extractions en ASO.

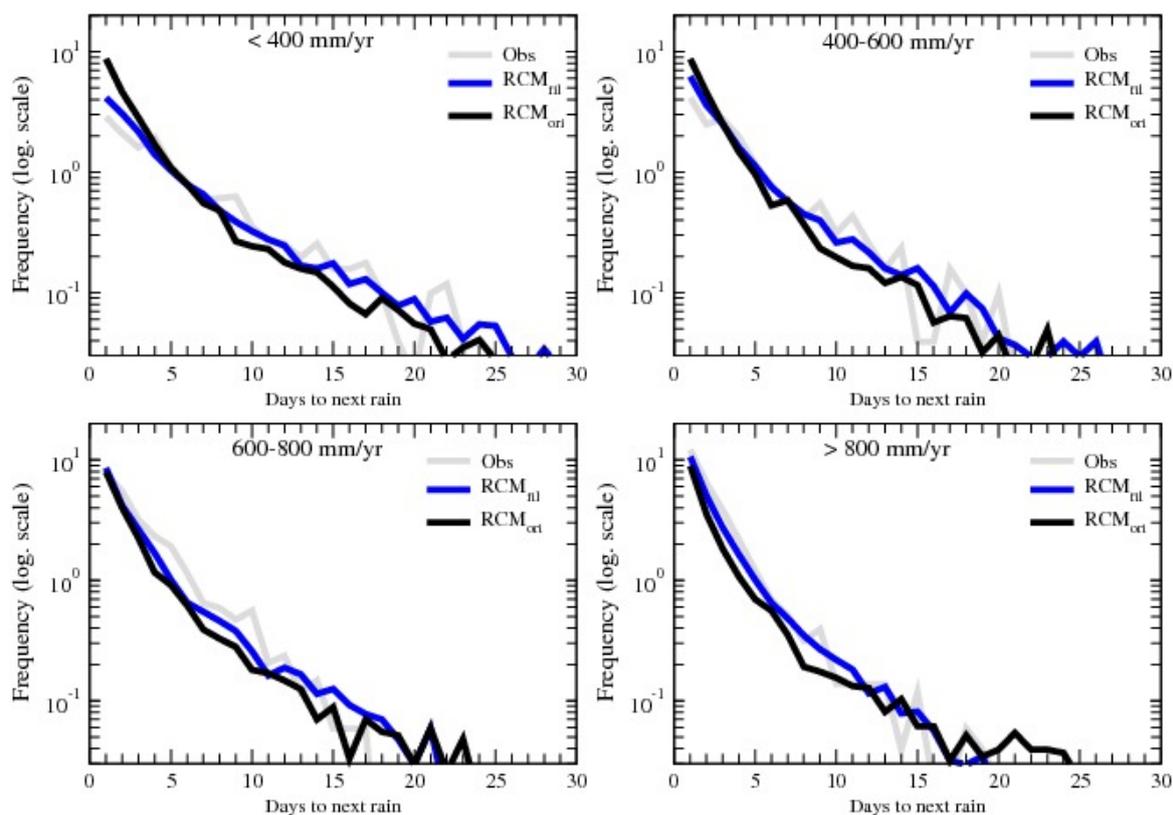


Figure D.3: Comparaison de la fréquence sortie de la moyenne d'ensemble de 8 MRC à la fréquence d'occurrence saisonnière observée sur la période 1991-2007. Ici toutes les longueurs de pauses sont considérées. Les pauses extrêmes (*extDS*) de type *DS3* et *DS4* sont celles > 8 jours.

---

l'adéquation entre la variabilité observée et simulée reste à désirer dans ces régions. Par conséquent une prévision optimale des dates de début de pauses extrêmes doit être recherchée dans le perfectionnement de la paramétrisation des MRC et le choix des méthodes de post-traitement adéquates. Par ailleurs, si les pauses pluviométriques indiquent aussi la distribution intrasaisonnière de la pluviométrie, alors comment une mauvaise représentation des pauses dans les MRC peut-elle affecter les simulations d'études d'impacts des changements climatiques sur l'agriculture ?

## Annexe E

Article (a) paru dans le 1<sup>er</sup> numéro 2012

du Journal *Science et Changements*

*Planétaires/Sécheresse*



L'essentiel de l'information  
scientifique et médicale

[www.jle.com](http://www.jle.com)

Le sommaire de ce numéro

[http://www.john-libbey-eurotext.fr/fr/revues/agro\\_biotech/sec/sommaire.md?type=text.html](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

Seyni Salack<sup>1,2</sup>  
 Bertrand Muller<sup>3,4</sup>  
 Amadou T. Gaye<sup>1</sup>  
 Frédéric Hourdin<sup>5</sup>  
 Ndiaga Cisse<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 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>

<sup>2</sup> Centre régional pour l'amélioration  
 de l'adaptation à la sécheresse (Ceraas)  
 BP 3320

Thiès Escalé  
 Thiès  
 Sénégal  
 <ncisse@refer.sn>

<sup>3</sup> Cirad  
 AGAP  
 F-34398 Montpellier  
 France  
 <bertrand.muller@cirad.fr>

<sup>4</sup> Africa Rice Center  
 Africa Rice  
 Sahel Regional Station  
 BP 96  
 Saint-Louis  
 Sénégal

<sup>5</sup> Laboratoire de météorologie dynamique  
 du CNRS  
 Université Pierre et Marie Curie (UPMC)  
 Tour 45-55, 3<sup>e</sup> étage  
 BP 99  
 75252 Paris cedex 05  
 France  
 <hourdin@lmd.jussieu.fr>

doi: 10.1684/sec.2012.0335

Tirés à part : S. Salack

Sécheresse vol. 23, n° 1, janvier-février-mars 2012

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

### 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 intrasaisonnaire 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  $\geq 15$  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 intrasaisonnaire 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  $\geq 15$  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

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 intrasaisonnière 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

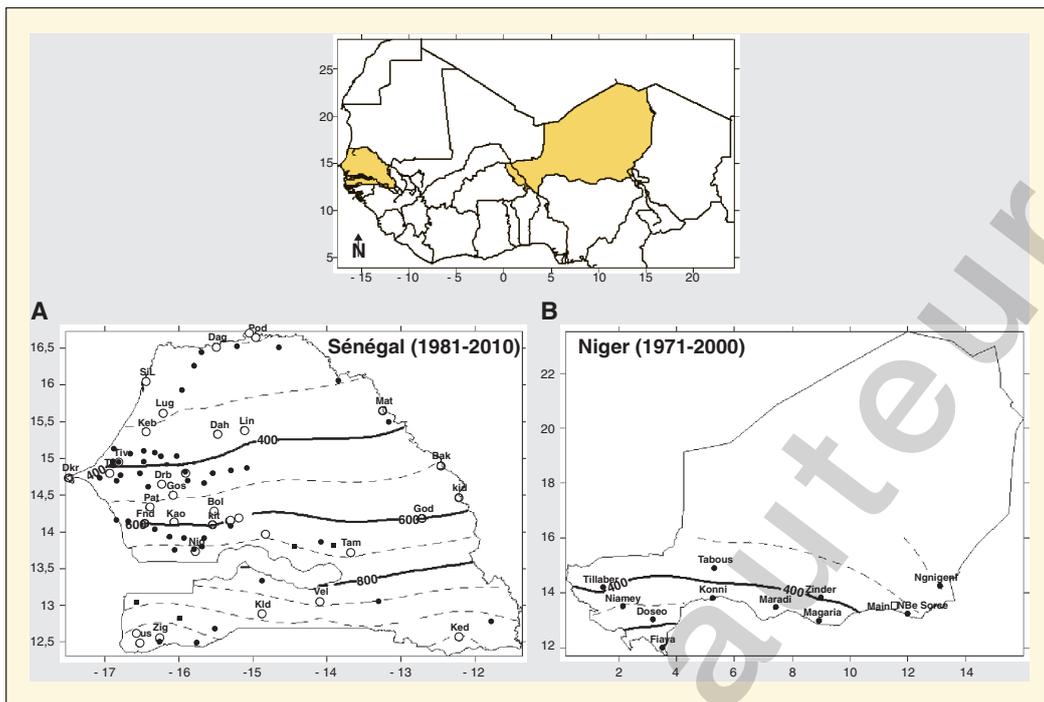
précipitations dans les zones d'étude et les méthodes d'extraction locales et multisites sont exposées dans la première section. Les résultats sur la distribution spatio-temporelle des pauses, leur typologie, saisonnalité et implication dans la qualité des saisons sont détaillés dans la section suivante. 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



**Figure 1.** Cartes des postes pluviométriques utilisés et isohyètes.

Axes horizontaux : longitude ; axes verticaux : latitude.

nord (Moron *et al.*, 2006 ; Dieng *et al.*, 2008). A 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 plu-

viométriques 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 connaît une certaine augmentation dans les deux dernières décennies (Lebel et Ali, 2009).

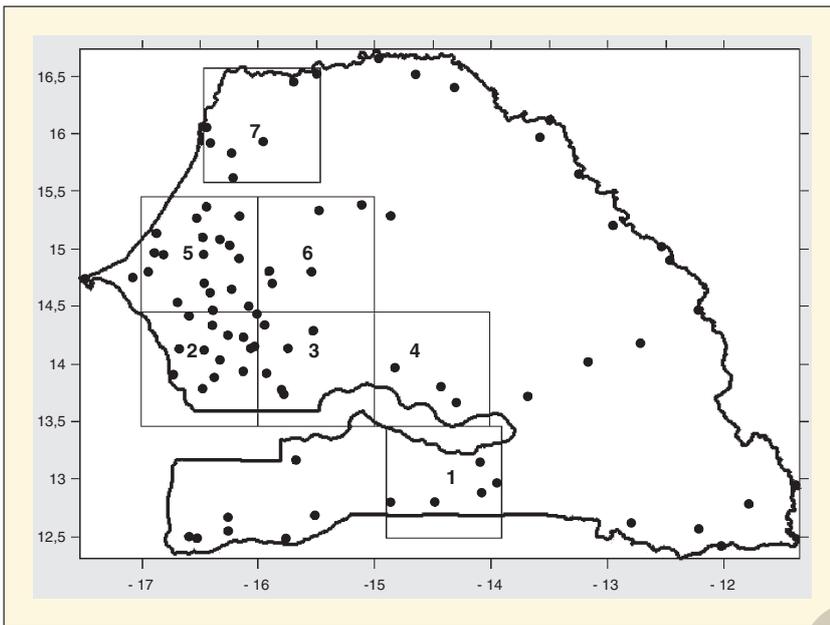
#### Algorithme définissant un « jour sec régional »

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

**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.



**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  $2^\circ \times 2^\circ$  (B2x2).

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

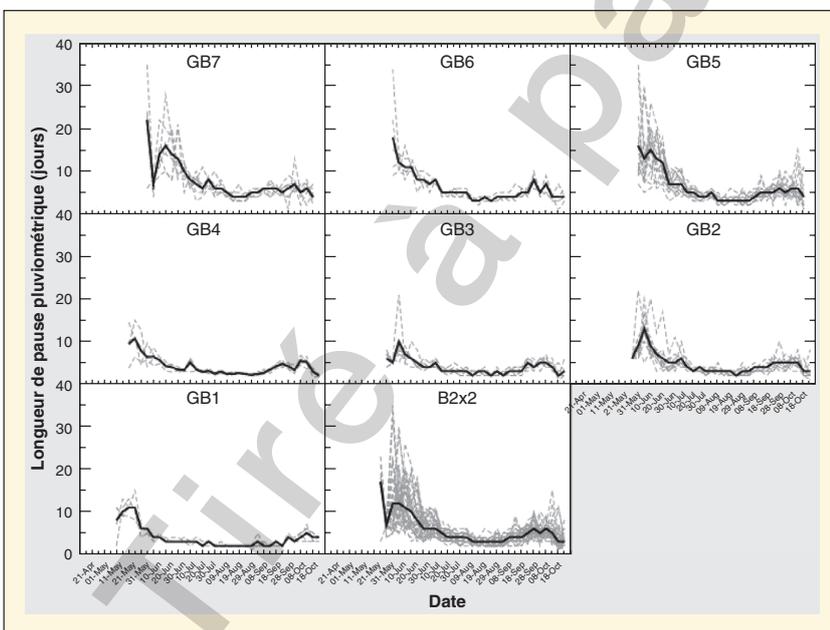
en RD = 0 (pour un jour sec) et RD = 1 (pour un jour pluvieux). Cette information constitue la base de données des pauses locales.

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  $1 \times 1$  degré,  $2 \times 2$  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 GB7 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 (B2x2). L'échelle des GB1-7 ( $\sim 100 \times 100$  km) ou celle de la grande région B2x2 ( $\sim 200 \times 200$  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  $N \times M$  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 ( $RRD_{N \times \alpha}$ ) est défini selon les conditions ci-dessous.

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

Les lignes  $N$  ( $i = 1, 2, 3...N$ ) contiennent les jours secs ou pluvieux de l'année et les colonnes ( $\alpha$ ) 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 ( $\alpha$ ) du réseau d'observation. À chaque valeur  $\alpha$ , on extrait les pauses régionales sur la base de  $RRD_{N \times \alpha}$  en comptant le nombre de jours secs consécutifs ( $RRD = 0$ ) avant le prochain jour pluvieux ( $RRD = 1$ ). Ainsi, les 7 régions de  $1 \times 1$  degré (GB1-7) et la région de  $2 \times 2$  degrés (B2x2) disposent chacune d'une base de données de pauses « régionales » identifiées par leur STDATE, L, et F par saison. L'analyse



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

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 décennie 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 décennie de juin au sud du Sénégal. Dans les régions centrales, elles sont

observées jusque dans la première décennie de juillet. Tandis que dans les régions du Nord on les observe au plus dans la dernière décennie de juillet.

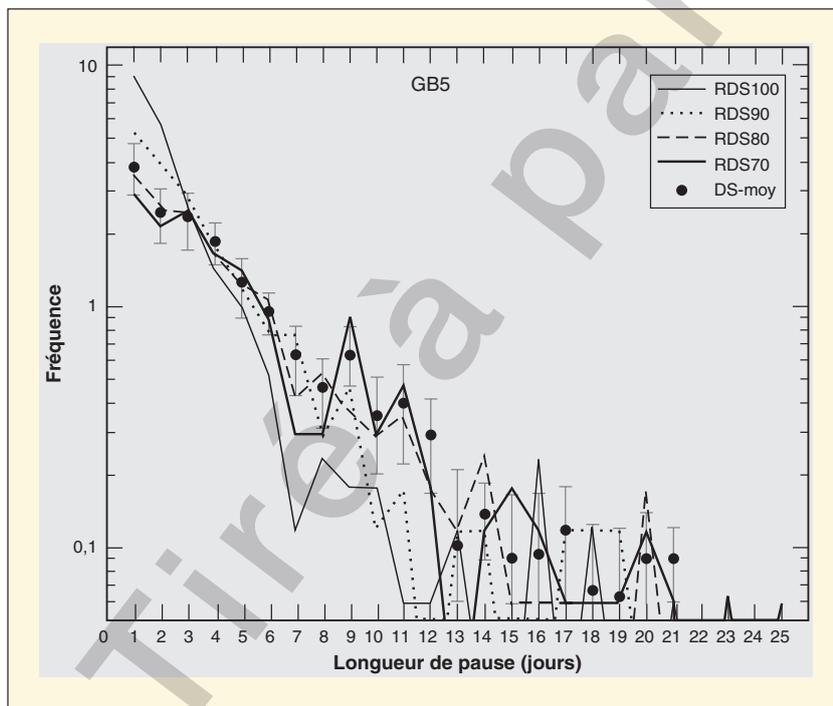
Par rapport à la première pluie observée, les événements de pauses extrêmes sont plus importants dans la période mai-juin-juillet et parfois en octobre. Le début de saison (mai-juin-juillet) est l'apanage des faux départs qui sont parfois responsables des pertes de semis en milieu paysan (Ati *et al.*, 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 extratropical 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 ( $RDS_{\alpha}$ ), extraites sur la base de la définition d'un jour sec régional. La *figure 4* illustre le cas des régions GB5 (18 sites) et B2x2 (42 sites). La pause régionale sur 100 % du réseau (soit  $\alpha$  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 éparées. Pour prendre en compte ces cas, on choisit de réduire progressivement la fraction de sites  $\alpha$ , 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 B2x2) enregistrent une séquence sèche synchronisée (*figure 4*). Quand  $\alpha$  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  $\alpha$  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.

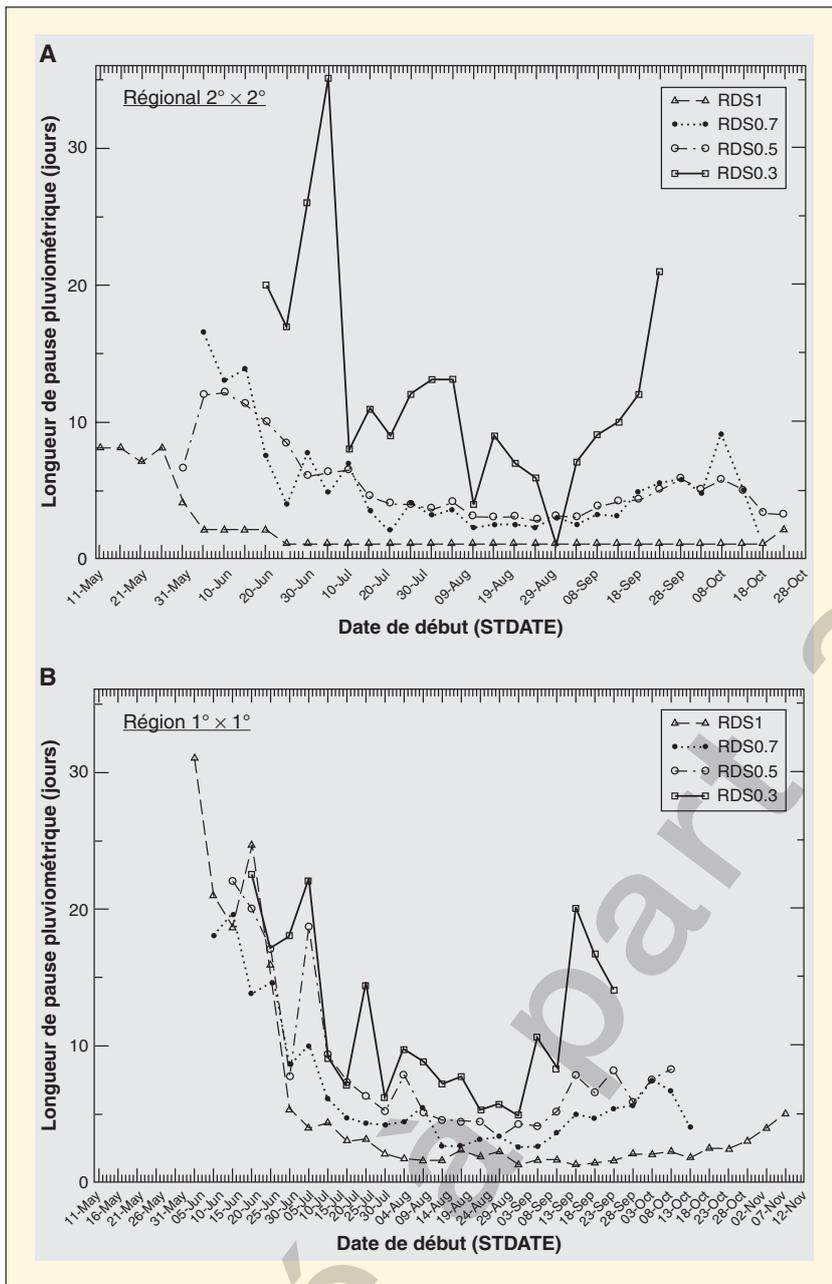


Figure 5. Distribution moyenne saisonnière des pauses régionales. A) région d'un degré carré (GB5) ; B) région de deux degrés carrés (B2x2).

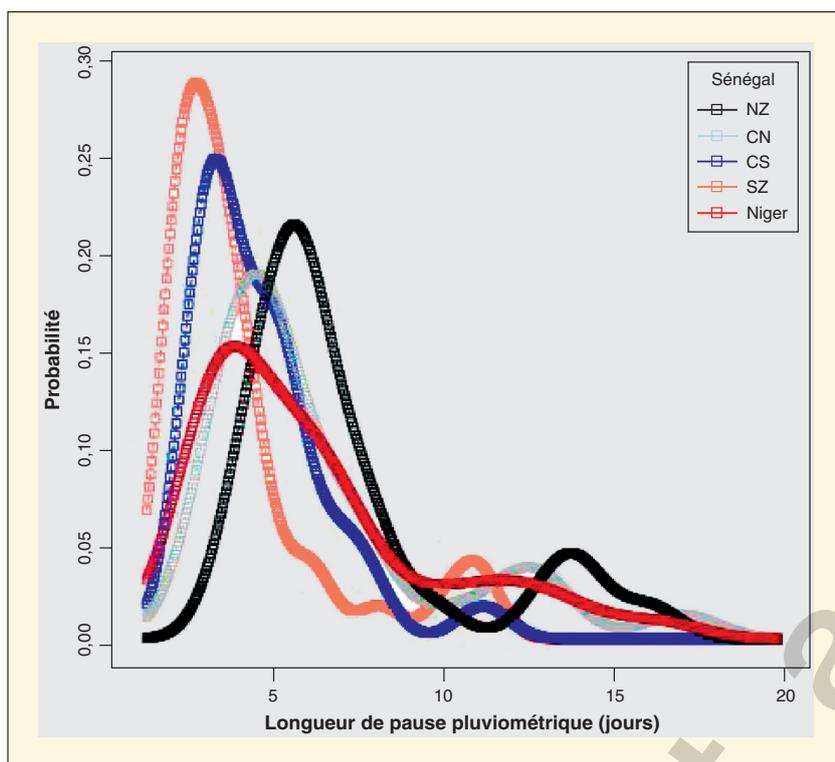
révèle une certaine corrélation entre la fréquence des pauses locales supérieures à 14 jours et les pauses régionales de même longueur. Par conséquent, la simultanéité des pauses locales sur une région (1x1 degré ou 2x2 degrés) ou une portion des sites d'une région dépend de la période intrasaisonnière 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



**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

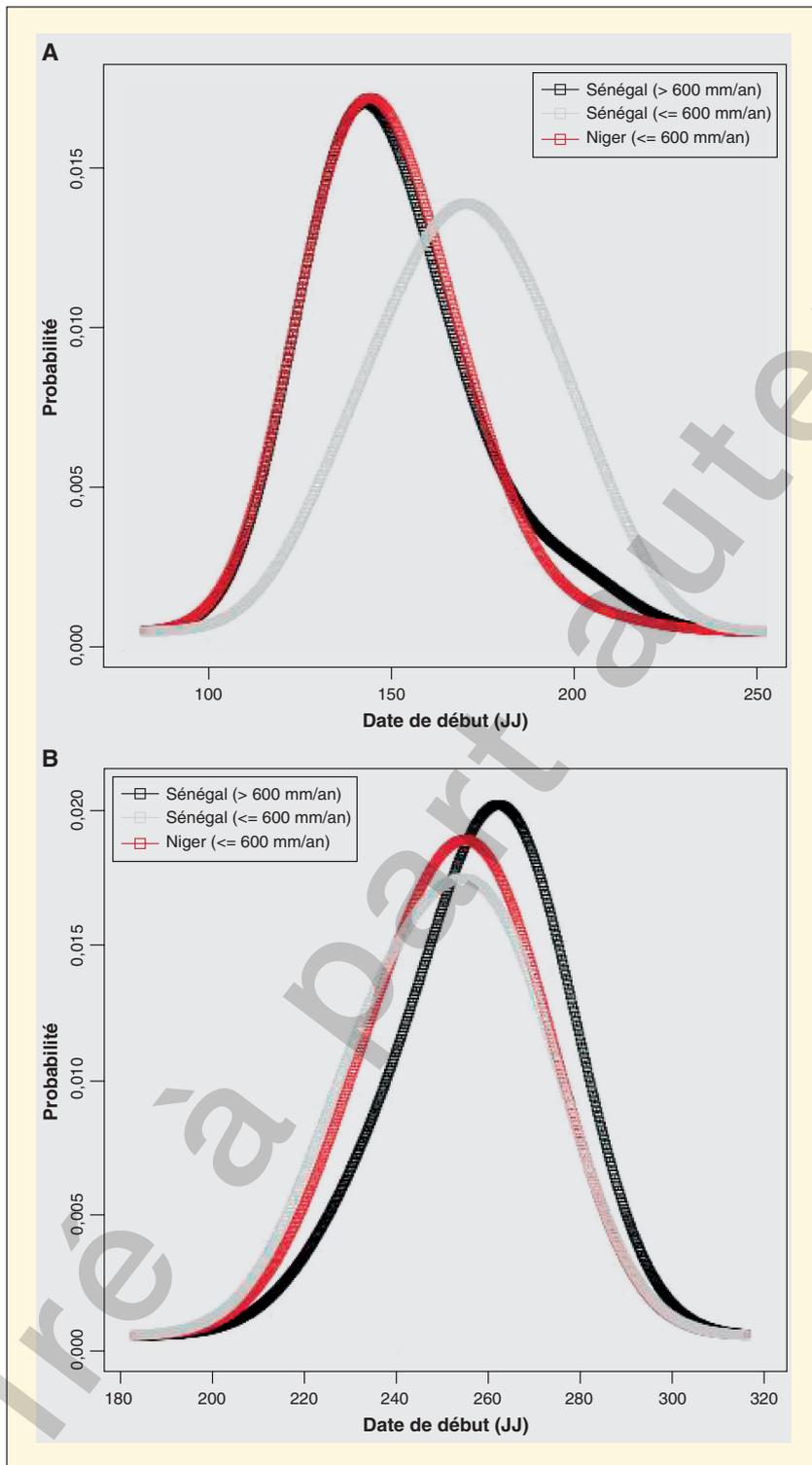
La figure 7 est l'intercomparaison de la distribution des dates de début au Niger et au Sénégal. Les dates sont extraites de toute la base de données disponible au Niger (1971-2000) et au Sénégal (1950-2010). Les dates de début (STDATE) d'une pause de catégorie DS4, dans les régions sud du Sénégal (plus 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<sup>e</sup> et 95<sup>e</sup> 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. A 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



**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.

**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 75 <sup>e</sup> centile	Date au 95 <sup>e</sup> 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
<b>Catégorie DS3</b>			
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
<b>Niger</b>		
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

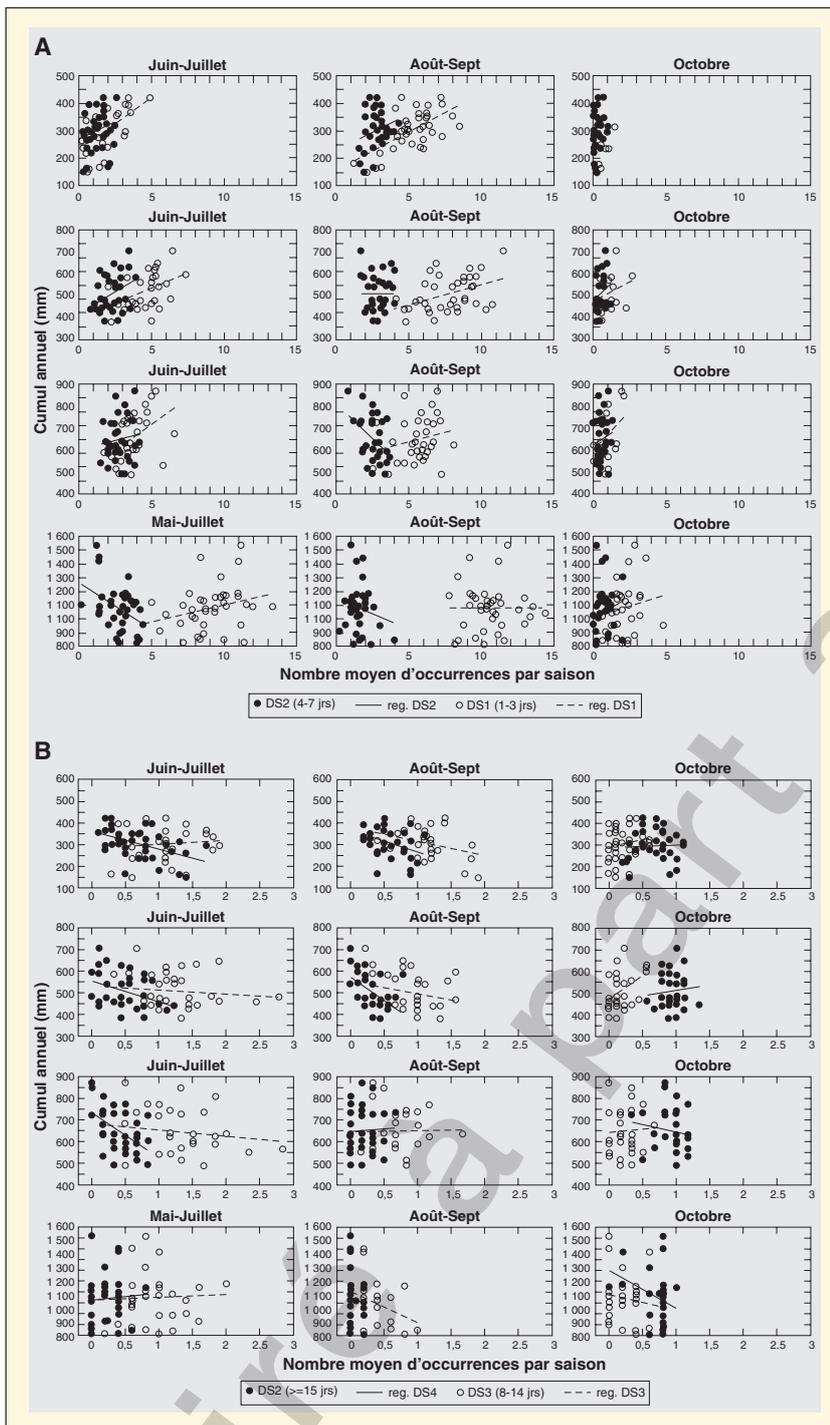
localement normales ou sèches (tableau 3). Quelques exceptions sont observées sur les occurrences des pauses DS3 dans les années 1952, 1956, 1957, 1960, 1961, 1964 et 1968 reconnues pour leur caractère excédentaire.

### 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



**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 ( $\geq 15$  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. A 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, Mougouin E, Kergoat L, Arjounin M *et al.*, 2009. Rainfall regime across the Sahel band in the Gourma

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.

## Annexe F

Article (b) paru dans le 1<sup>er</sup> numéro 2012

du Journal *Science et Changements*

*Planétaires/Sécheresse*



L'essentiel de l'information  
scientifique et médicale

[www.jle.com](http://www.jle.com)

Le sommaire de ce numéro

[http://www.john-libbey-eurotext.fr/fr/revues/agro\\_biotech/sec/sommaire.md?type=text.html](http://www.john-libbey-eurotext.fr/fr/revues/agro_biotech/sec/sommaire.md?type=text.html)



Montrouge, le 28/03/2012

Amadou T. Gaye

**Vous trouverez ci-après le tiré à part de votre article au format électronique (pdf) :**  
Représentation de la pluie dans les modèles régionaux de climat et application à l'estimation des rendements du mil 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

# Représentation de la pluie dans les modèles régionaux de climat et application à l'estimation des rendements du mil au Sénégal

Seyni Salack<sup>1,2</sup>  
Benjamin Sultan<sup>3</sup>  
Pascal Oettli<sup>4</sup>  
Bertrand Muller<sup>5,6</sup>  
Amadou T. Gaye<sup>1</sup>  
Frédéric Hourdin<sup>7</sup>

<sup>1</sup> Université Cheikh Anta Diop de Dakar (UCAD)  
Laboratoire de physique de l'atmosphère  
et l'océan Siméon Fongang (LPAO-SF)  
École doctorale Eau, qualité  
et usage de l'Eau (EDEQUE)  
BP 5085

Dakar-Fann  
Dakar  
Sénégal  
<abutawakalt@gmail.com>  
<atgaye@ucad.edu.sn>

<sup>2</sup> Centre d'étude régional pour l'amélioration  
de l'adaptation à la sécheresse (CERAAS)  
BP 3320

Thiès Escalé

Thiès

Sénégal

<sup>3</sup> IRD

Laboratoire d'océanographie et climat :  
expérimentations et analyses numériques  
(LOCEAN)

Institut Pierre Simon Laplace

4, place Jussieu

Case 100

75252 Paris cedex 5

France

<Benjamin.sultan@locean-ipsl.upmc.fr>

<sup>4</sup> University of Tokyo

Tokyo

Japan

<oettli@eps.s.u-tokyo.ac.jp>

Tirés à part : A. T. Gaye

## Résumé

Les très fortes répercussions des aléas climatiques sur l'agriculture et la sécurité alimentaire en Afrique subsaharienne, auxquelles se rajoute la perspective du changement climatique, ont poussé la communauté scientifique à documenter les impacts du climat dans cette région. Cependant, si la plupart des études quantifiant les impacts du climat se basent sur des sorties de modèles régionaux de climat, très peu font part de l'incertitude associée à leur utilisation. Pourtant le choix d'un modèle régional plutôt qu'un autre, voire même d'une paramétrisation plutôt qu'une autre, peut influencer fortement sur le résultat final car les modèles agronomiques sont très sensibles à la qualité du forçage climatique en entrée. L'objectif de cette étude est d'explorer cette question en analysant la dispersion de la représentation des pluies issues d'un ensemble de huit modèles régionaux et la façon dont cette dispersion se traduit dans l'estimation des rendements du mil au Sénégal, simulés par le modèle agronomique SARRAH. L'étude montre qu'il existe une grande dispersion dans la représentation de la pluviométrie d'un modèle régional à l'autre (et même pour un même modèle régional avec deux jeux de paramètres différents) tant à l'échelle saisonnière qu'à l'échelle intrasaisonnière. Ces biais introduisent des erreurs importantes dans l'estimation des impacts agronomiques. Ces erreurs peuvent être à même d'invalider des conclusions sur les impacts du changement climatique basés sur l'utilisation d'un seul modèle régional. L'utilisation de méthodes de correction de biais s'avère ainsi indispensable.

**Mots clés :** impact local, modèle climatique régional, modèle de culture, Sahel, Sénégal, simulation d'ensemble.

## Abstract

**Representation of rainfall in regional climate models and application to millet yield estimations in Senegal**

The strong influence of climatic factors on agriculture and food security in sub-Saharan Africa in addition to climate change perspectives have prompted the scientific community to document the impacts of climate in this region. However, if many studies quantifying the impacts of climate rely on downscaling, very few address the uncertainty associated with their use. However, the choice of a particular method and

Pour citer cet article : Salack S, Sultan B, Oettli P, Muller B, Gaye AT, Hourdin F, 2012. Représentation de la pluie dans les modèles régionaux de climat et application à l'estimation des rendements du mil au Sénégal. *Sécheresse* 23 : 14-23. doi : 10.1684/sec.2012.0332

<sup>5</sup> Cirad  
UMR AGAP  
F-34398 Montpellier  
France

<Bertrand.muller@cirad.fr>

<sup>6</sup> Africa Rice Center  
AfricaRice  
Sahel Regional Station  
BP 96

Saint-Louis

Sénégal

<sup>7</sup> CNRS

Laboratoire de météorologie dynamique

(LMD)

Institut Pierre Simon Laplace

Ecole Polytechnique

Aile 5 - LMD

Route de Saclay

91128 Palaiseau cedex

France

<Frederic.Hourdin@lmd.jussieu.fr>

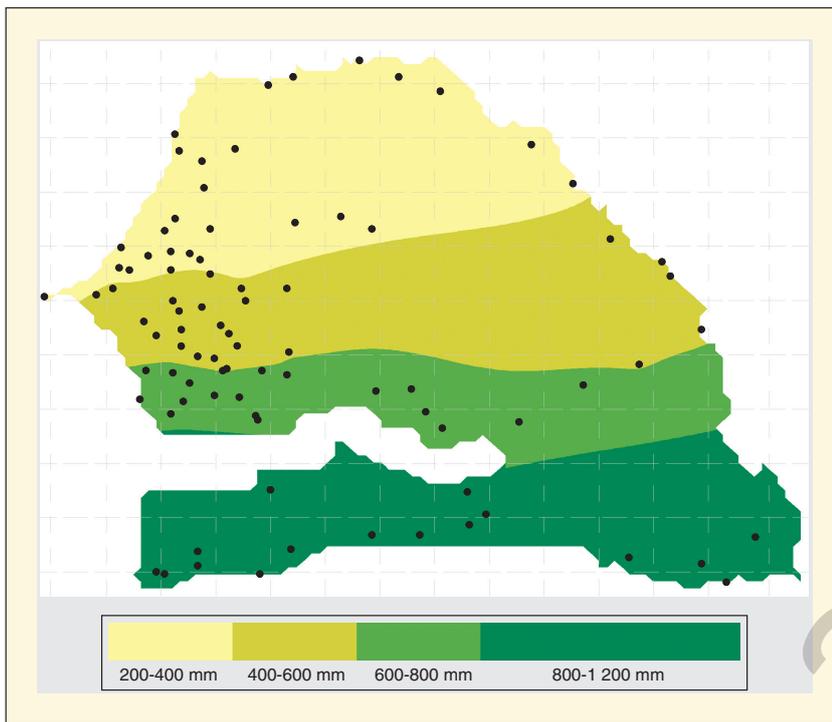
of a particular regional model can strongly influence the final result since crop models are very sensitive to the quality of the input climate forcing. The objective of this study is to address this issue by analysing the dispersion of rainfall provided by eight regional models and how this dispersion spreads in the estimation of millet yields in Senegal. The SARRAH crop model is used to simulate millet yields. The study shows that there is a wide dispersion in the representation of rainfall from one regional model to another (and even sometimes for the same regional model with two sets of parameters) at both the seasonal and intra-seasonal scales. These biases introduce significant errors in estimating the agronomic impacts, which might invalidate conclusions about the impacts of climate change based on the use of a single regional model. The use of a bias correction method is indispensable.

**Key words:** crop model, ensemble-based simulation, local impact, regional climate model, Sahel, Senegal.

Les très fortes répercussions des aléas climatiques sur l'agriculture et la sécurité alimentaire en Afrique subsaharienne auxquelles s'ajoute la perspective du changement global ont poussé la communauté scientifique à orienter ses efforts vers le couplage entre le climat et l'agriculture de manière à ce que les progrès en termes de compréhension et de prévision de la variabilité et des changements de la mousson en Afrique puissent être bénéfiques pour les sociétés (Sultan *et al.*, 2008). Cette approche doit tirer profit des progrès récents de chacune des deux disciplines : d'un côté, le développement continu, par les agronomes, de modèles de cultures mécanistes de plus en plus précis a permis d'analyser et de quantifier les effets des facteurs abiotiques (édaphiques, climatiques et chimiques) sur la croissance et la production des plantes (Berg *et al.*, 2010) ; de l'autre, des progrès importants ont été accomplis par la communauté des physiciens du climat dans le développement des modèles de circulation générale (MCG) pour prévoir le climat que ce soit pour la saison à venir ou bien pour le siècle prochain (van der Linden *et al.*, 2009). Bien que ces deux types d'outils aient été développés séparément, l'intérêt de coupler les modèles agronomiques aux modèles de climat apparaît de façon évidente : cela peut permettre, à l'échelle saisonnière, de prédire les rendements attendus des semaines voire des mois avant la récolte (Hansen *et al.*, 2006), et, à l'échelle pluri-décennale de réaliser des projections de la productivité agricole en réponse à l'évolution du climat afin de développer des stratégies d'adaptation appropriées (Berg *et al.*, 2010).

Cependant, ce couplage pose un certain nombre de problèmes méthodologiques notamment en raison du saut d'échelles entre les modèles agronomiques conçus pour appréhender des processus impliquant la plante, le sol et l'atmosphère à l'échelle de la parcelle et les MCG qui simulent le climat sur des mailles de plusieurs centaines de kilomètres de côté (Sultan *et al.*, 2008). De fait, comme beaucoup de modèles environnementaux ou de modèles d'impacts, les modèles de cultures sont spécifiques d'une échelle donnée, dans leur cas l'échelle parcellaire, et nécessitent des données d'entrée à cette échelle (Baron *et al.*, 2005 ; Heuvelink, 1998). Il apparaît donc inapproprié de forcer directement un modèle agronomique avec des sorties de MCG. Il est donc nécessaire de traduire les sorties des modèles globaux en une information locale utilisable par les modèles agronomiques à partir de l'information établie à plus grande échelle par les modèles de climat. Pour réaliser ce transfert d'échelle, on utilise des méthodes dites de descente d'échelle (ou « *downscaling* ») ; (Herrera *et al.*, 2006). Ces méthodes se répartissent en deux grandes catégories : i) les méthodes statistiques (Zorita et von Storch, 1999) ; et ii) les méthodes dynamiques (Paeth *et al.*, 2011) qui reposent sur des modèles de climat à aires limitées, appelés « modèle régional de climat » (MRC), simulant le climat local d'une région déterminée à résolution fine (20-50km). Ces méthodes dynamiques, sur lesquelles portera la présente étude, sont coûteuses en temps de calcul et reproduisent, voire amplifient, les biais des MCG mais elles peuvent s'avérer très pertinentes dans le

contexte du changement climatique puisque les modèles régionaux de climat (MRC) simulent toute la complexité du climat local (Sylla *et al.*, 2010a ; Jones *et al.*, 2004 ; Sylla *et al.*, 2010b). Les méthodes statistiques sont très simples à mettre en place, peu coûteuses en terme de temps, et peuvent également corriger efficacement les biais des MCG comme le montrent Ndiaye *et al.* (2011). En revanche, elles nécessitent d'avoir à disposition des jeux de données longs et fiables à l'échelle locale et font une hypothèse forte de stationnarité (les relations entre la grande échelle et l'échelle locale sont invariables dans le temps) qui peut être mise à défaut si le climat change. Cependant, si la plupart des études quantifiant les impacts du climat se basent sur des sorties de modèles régionaux de climat (MRC), très peu font part de l'incertitude associée à leur utilisation. Pourtant le choix d'un MRC plutôt qu'un autre, voire même d'une paramétrisation plutôt qu'une autre, peut influencer fortement sur le résultat final car les modèles agronomiques sont très sensibles à la qualité du forçage climatique en entrée. Ainsi Oettli *et al.* (2011) ont mis en évidence des biais importants dans les simulations de rendement utilisant les sorties de modèles régionaux. Ils ont montré que la mauvaise représentation de la pluie, mais également du bilan radiatif, important pour le bilan carboné et la production de biomasse, est à l'origine des contre-performances de la plupart des modèles régionaux. L'objectif de cette étude est d'aller plus avant dans le diagnostic des biais introduits par les modèles régionaux en faisant un bilan exhaustif de l'attribution



**Figure 1.** Mailles des modèles régionaux de climat (traits gris), réseau de stations d'observations ANAMS-CERAAS (points noirs) et zonage agroclimatique du Sénégal.

des erreurs pour la variable « pluie » des MRC. Nous analysons plus particulièrement la dispersion de la représentation des pluies issues d'un ensemble de huit modèles régionaux et la façon dont cette dispersion se traduit dans l'estimation des rendements du mil au Sénégal simulés par un modèle agronomique. On quantifiera les erreurs dans l'estimation des rendements liées aux erreurs sur les pluies simulées, et on décomposera et hiérarchisera les caractéristiques des pluies simulées à l'origine de ces erreurs. On évaluera uniquement les pluviométries issues des modèles tout en sachant que les autres variables simulées par les MRC, comme le rayonnement ou les températures, peuvent également présenter des biais importants qui pourraient engendrer des biais dans des simulations de modèles agronomiques Oettli *et al.* (2011).

## Matériel et méthode

### Les données climatiques observées et simulées

Les données de pluie observée 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 est un centre de l'Institut sénégalais de recherches agricoles (Isra). Elles proviennent de divers réseaux d'observations dont celui de l'Agence nationale de la météorologie du Sénégal (ANAMS) (stations synoptiques, climatologiques et pluviométriques) et celui mis en place par l'Isra/CERAAS dans le cadre du suivi agro-sylvopastoral national. Ce sont des données journalières (1991-2007) dont les séries sont complètes et n'ont pas été interpolées (figure 1). Sur la base des cumuls annuels de ces données et des caractéristiques agroclimatiques rencontrés, quatre zones agroclimatiques sont considérées (Salack *et al.*, 2011) : la zone nord (NZ), située entre les isohyètes 200 et 400 mm ; la zone centre nord (CN), entre les isohyètes 400 et 600 mm ; la zone centre sud (CS), entre 600 et 800 mm ; et la zone pluviométrique sud (SZ) qui enregistre des cumuls annuels supérieurs à 800 mm en moyenne (figure 1). Malgré des différences de l'ordre de 200 mm/an, ces zones pluviométriques sont considérées ici comme des régions ayant une certaine homogénéité climatique vis-à-vis des cycles

saisonniers de pluie à l'échelle locale (Salack *et al.*, 2011).

Les données de précipitations journalières simulées sont issues des expériences de simulations de huit modèles régionaux (MRC) à fine résolution (0.44°x0.44°) forcés par les mêmes conditions latérales des réanalyses ERA-Interim (résolution spatiale de 0,75°x0,75°)<sup>1</sup>. Elles couvrent l'Afrique de l'Ouest sur la période 1991-2007 à une résolution spatiale d'environ 50 km x 50 km (figure 1). Ces données, fruits d'une collaboration étroite entre les projets ENSEMBLES<sup>2</sup> (van der Linden, 2009) et AMMA (Analyses multidisciplinaires de la mousson africaine) (Redelsperger, 2006), sont disponibles et accessibles à tous (<http://ensemblesrt3.dmi.dk/>). Ces modèles sont développés et/ou maintenus par différentes institutions. Parfois, deux institutions peuvent avoir le même modèle mais avec différentes configurations ou paramétrisations (tableau 1).

Toutes les analyses ont été faites en considérant et comparant, pour une station pluviométrique donnée, les pluviométries observées avec celles simulées par les MRC dans la maille dont le centre est le plus proche de la station. Il n'y a pas de moyenne ni d'interpolation de valeurs simulées venant de mailles voisines.

Les autres variables climatiques journalières nécessaires aux simulations agronomiques (températures, humidités, rayonnement, vent) ont été recueillies auprès de l'ANAMS pour 12 stations du Sénégal. Des moyennes interannuelles ont été calculées pour chaque station. Elles sont utilisées dans toutes les simulations. Ainsi seules les différences entre pluviométries peuvent avoir un impact sur les rendements dans nos analyses.

### Le modèle SARRAH

SARRAH est un simulateur du développement et du rendement des cultures, développé par le Centre

<sup>1</sup> Les réanalyses ERA-Interim sont la nouvelle génération de réanalyse (1989 à nos jours) du Centre européen de prévisions météorologiques à moyen terme développées pour remplacer les réanalyses ERA-40 du même Centre (pour plus d'information voir <http://www.ecmwf.int>).

<sup>2</sup> Les expériences tirées du projet ENSEMBLES sont actuellement mise à profit dans le cadre de CORDEX (COordinated Regional Downscaling EXperiments), un projet global de désagrégation dynamique des scénarii de changements climatiques pour le prochain 5e rapport du Groupe intergouvernemental d'experts du climat (voir <http://wcrp.ipsl.jussieu.fr>).

**Tableau 1.** Noms et origines des huit modèles régionaux de climat (MRC) utilisés, et acronymes considérés pour l'étude.

Nom du modèle régional	Institution	Acronyme
HIRAM	Danish Meteorological Institute (DMI)	DMI
CLM	GKSS Forschungszentrum Geesthacht GmbH (GKSS)	GKSS
HadRM3P	UK Met Office, Hadley Centre for Climate Prediction and Research (HC)	HC
RegCM3	The Abdus Salam Intl. Centre for Theoretical Physics (ICTP)	ICTP
RACMO	The Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI)	KNMI
HIRAM	Meteorologisk Institut	METNO
REMO	Max-Planck-Gesellschaft	MPI
RCA	Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI)	SMHI

international de recherche agronomique pour le développement (Cirad), fonctionnant au pas de temps journalier, qui s'est révélé particulièrement bien adapté à l'étude des impacts du climat sur les céréales en milieu semi-aride (Sultan *et al.*, 2005 ; Baron *et al.*, 2005 ; Mishra *et al.*, 2008 ; Traoré *et al.*, 2011). Pour cette étude le modèle est calibré pour simuler une variété de mil appelée « *Souna III* » à cycle constant de l'ordre de 90 jours et à haut potentiel de rendement (Dingkuhn *et al.*, 2003 ; Sultan *et al.*, 2005). Cette variété a été développée au Sénégal après la sécheresse des années 1970 et est très largement vulgarisée dans l'ensemble du Sénégal.

### Les forçages pluviométriques utilisés pour les simulations

Quatre forçages pluviométriques ont été construits de manière à être utilisés en entrées du modèle SARRAH.

1. Le forçage de référence basé sur les observations pluviométriques (*Ctrl*) : le modèle SARRAH est forcé avec les pluies journalières observées en station. C'est la simulation de référence.

2. Le forçage basé sur les pluies brutes des modèles régionaux (*MRC<sub>orig</sub>*) : le modèle SARRAH est forcé avec la pluviométrie journalière issue des modèles régionaux. Pour ce faire, on extrait la valeur de la pluie du point de maille le plus proche de la station d'observation. Cette approche permet d'obtenir la pluie telle que simulée par les MRC sans l'interpoler. Il représente le scénario de forçage de la pluie originale de chaque MRC.

3. Le forçage basé sur la distribution des pluies des modèles régionaux (*MRC<sub>dist</sub>*) : on calcule dans un premier

temps le biais relatif mensuel du cumul pluviométrique de chaque MRC de la façon suivante :

$$I_m = (y_m - o_m) / o_m$$

où  $I_m$  représente le biais d'un MRC pour le mois  $m$ ,  $y_m$  le cumul pluviométrique du MRC pour le mois  $m$  et  $o_m$  le cumul pluviométrique observé. Ce biais relatif est calculé pour chaque année de la période 1991-2007 et chacune des 12 stations.

Ensuite ce biais relatif est utilisé pour redimensionner les valeurs journalières de pluie simulées par le MRC :

$$\hat{y}_{i,m} = y_{i,m} \times I_m$$

où  $y_{i,m}$  représente la valeur de pluie du MRC au jour  $i$  et au mois  $m$ , et  $\hat{y}_{i,m}$  la nouvelle valeur de pluie redimensionnée. Cette transformation n'affecte que les jours où la pluie est non nulle dans les MRC. Ainsi pour une année et une station considérée, le cumul des valeurs de  $\hat{y}_{i,m}$  sur le mois  $m$ , notée  $\hat{y}_m$ , est identique à celui du cumul des pluies observée  $o_m$ . Néanmoins, la distribution intrasaisonnière des événements pluvieux dans chaque MRC reste inchangée. L'objectif de ce scénario de forçage est de conserver la fréquence d'occurrence des événements de pluies spécifiques à chaque MRC mais pas le cumul mensuel pluviométrique.

4. Le forçage basé sur les cumuls pluviométriques des modèles régionaux (*MRC<sub>cum</sub>*) : On adopte la même méthode de perturbation que le scénario *MRC<sub>dist</sub>* à la différence qu'elle s'applique aux pluies observées :

$$\hat{o}_{i,m} = o_{i,m} \times I_m$$

où  $o_{i,m}$  représente la valeur de pluie observé au jour  $i$  et au mois  $m$ , et  $\hat{o}_{i,m}$  la

nouvelle valeur de pluie redimensionnée. Cette transformation est réalisée pour chaque MRC et chaque station. Ainsi pour une année et une station considérée, le cumul des valeurs de  $\hat{o}_{i,m}$  sur le mois  $m$ , notée  $\hat{o}_m$ , est identique à celui du cumul des pluies simulées  $y_m$  pour le MRC considéré. Néanmoins la distribution intrasaisonnière des événements pluvieux est celle des observations. L'objectif de ce scénario de forçage est de conserver le cumul mensuel des pluies spécifiques à chaque MRC mais pas la distribution intrasaisonnière.

De ce fait, les scénarii de forçage *MRC<sub>dist</sub>* et *MRC<sub>cum</sub>* sont des perturbations apportées à la pluie brutes issues des MRC (*MRC<sub>orig</sub>*). Ils permettent de dissocier les biais des modèles en termes de cumul pluviométrique et de distribution intrasaisonnière. L'utilisation de ces forçages en entrée du modèle de culture SARRAH permet ainsi d'attribuer et de hiérarchiser l'erreur dans l'estimation des rendements agricoles liée à la représentation de ces deux caractéristiques de la pluviométrie dans les MRC en comparant les rendements simulés issus des simulations de contrôle (*Ctrl*) avec ceux issus des 3 forçages *MRC<sub>orig</sub>*, *MRC<sub>dist</sub>* et *MRC<sub>cum</sub>*. La comparaison entre le jeu *MRC<sub>orig</sub>* et la simulation de contrôle (*Ctrl*) permet de quantifier le biais total sur les rendements des modèles régionaux tandis que les comparaisons avec *MRC<sub>dist</sub>* et *MRC<sub>cum</sub>* permettent d'analyser les effets marginaux sur les rendements des biais affectant, respectivement, les distributions intrasaisonnières des pluies simulées et leurs cumuls.

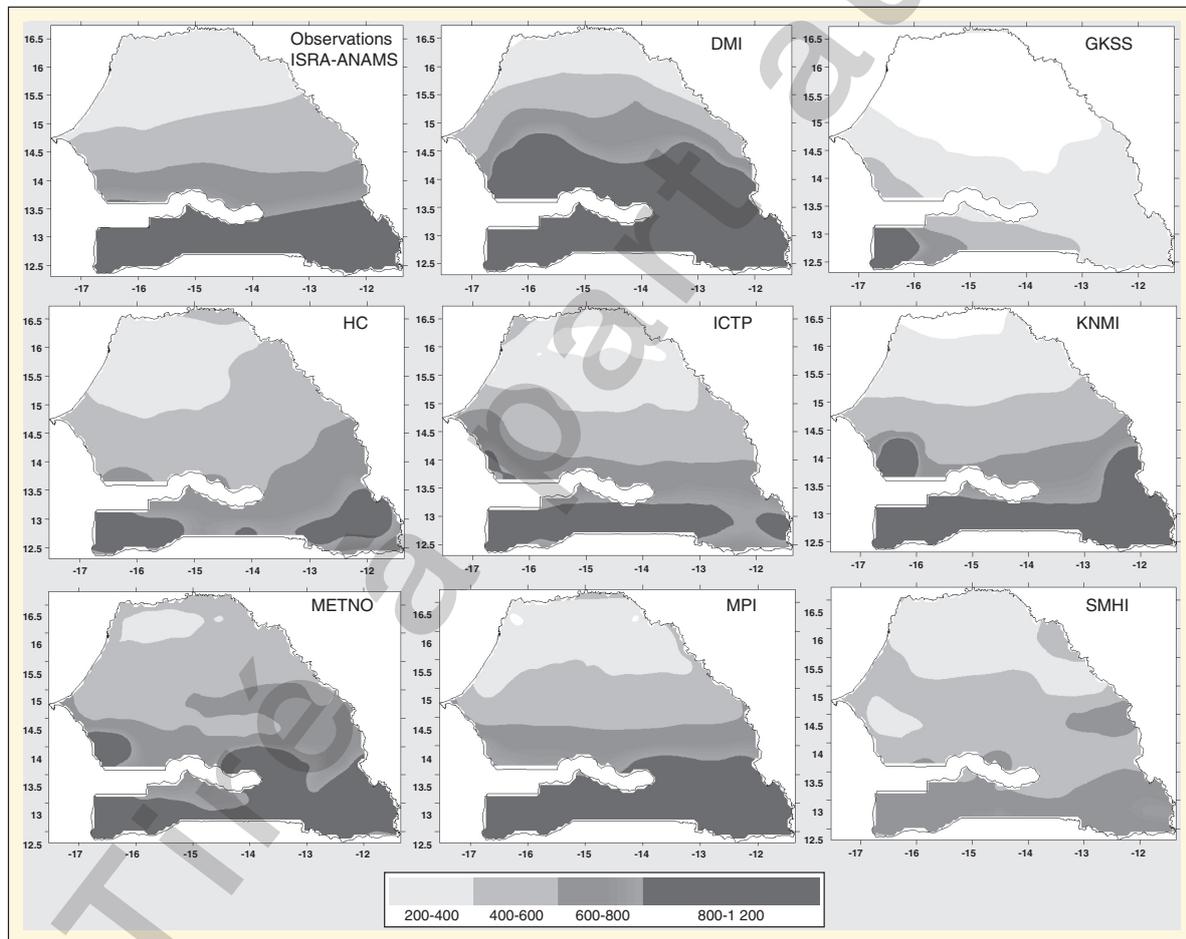
## Résultats

### Les biais des modèles régionaux dans leur représentation de la pluie

Tous les modèles reproduisent le gradient latitudinal de pluviométrie mais ils ont du mal à retracer les limites exactes des zones pluviométriques, zone nord, centre nord, centre sud, zone sud (NZ, CN, CS, SZ) (tableau 2 et figure 2). Le modèle GKSS se démarque clairement avec des sous-estimations très importantes des pluviométries sur toutes les zones, allant jusqu'à - 63 % pour la zone nord. Le modèle DMI se distingue également car il est le seul à surestimer systématiquement les précipitations. Le modèle METNO surestime partout sauf dans la zone sud. Les autres modèles ont plutôt tendance à

**Tableau 2.** Évaluation des cumuls pluviométriques annuels simulée par les modèles régionaux de climat (MRC) sur la période 1991-2007.

Zone	Paramètre	Obs	DMI	GKSS	HC	ICTP	KNMI	METNO	MPI	SMHI	Moy.MRC
Nord (NZ)	Moy. (mm/an)	326	396	122	362	261	277	439	295	339	311
	Biais (%)		21	-63	11	-20	-15	35	-9	4	-5
	Cv (%)	25	26	58	25	31	25	26	29	29	31
Centre nord (CN)	Moy. (mm/an)	541	701	203	479	477	478	588	503	482	489
	Biais (%)		30	-62	-11	-11	-12	9	-7	-11	-9
	Cv (%)	27	22	44	25	20	19	21	23	26	25
Centre sud (CS)	Moy. (mm/an)	698	972	335	646	709	729	835	789	567	698
	Biais (%)		39	-52	-7	1	4	20	13	-19	0
	Cv (%)	20	17	34	18	14	16	18	17	28	20
Sud (SZ)	Moy. (mm/an)	1 111	1 222	544	796	868	916	957	1 120	649	884
	Biais (%)		10	-51	-28	-22	-17	-19	1	-41	-21
	Cv (%)	17	16	22	12	9	12	15	10	21	15
Sénégal	Moy. des biais (%)		25	-57	-9	-13	-10	11	-1	-17	-9



**Figure 2.** Les cumuls saisonniers moyens des pluies observées (observations) et simulées par les huit modèles régionaux de climat (MRC), organisées en quatre zones agroclimatiques : nord (< 400 mm/an), centre nord (400-600 mm/an), centre sud (600-800 mm/an) et sud (> 800 mm/an).

sous-estimer les pluies, mais peuvent également les surestimer pour certaines zones. Si l'on considère l'ensemble des sorties des modèles, les zones pour lesquelles ils sont globalement les plus cohérents entre eux sont le centre nord et la zone sud avec 6 biais négatifs pour 2 positifs, alors que les résultats sont moins cohérents dans la zone nord (4 biais positifs et 4 négatifs) et au centre sud (5 positifs et 3 négatifs). Les variabilités interannuelles des cumuls sont, dans l'ensemble, bien reproduites avec des coefficients de variations (CV) conformes aux observations (tableau 2), sauf en ce qui concerne le modèle GKSS pour lequel on observe une variabilité interannuelle deux fois supérieure aux autres, qui s'explique cependant en partie par la faiblesse des précipitations simulées.

Les modèles ont tous tendance à surestimer très fortement le nombre d'événements pluvieux : les nombres de jours pluvieux simulés sont en moyenne 2 à 3 fois supérieurs à ce que l'on observe dans la réalité, et peuvent même être 5 fois supérieurs à celle-ci (tableau 3). Cette augmentation du nombre de jours pluvieux s'observe du nord vers le sud sauf pour le MPI dont le minimum se trouve au centre avec 114 jours. Les biais positifs sur la fréquence des jours pluvieux observés pour les MRC sont proches de ceux des modèles de circulation générale (MCG) (Goddard *et al.*, 2001 ; Sylla *et al.*, 2010a), et il a été montré que les MRC surestiment en particulier les fréquences des traces de pluie (< 1 mm/jour) et faibles (< 10 mm/jour) (Salack, 2007). On

peut noter (tableau 3) que les modèles qui génèrent les cumuls pluviométriques les plus biaisés (DMI, GKSS, SMHI) sont ceux qui surestiment le moins les nombres de jours de pluie : ainsi le modèle GKSS qui était le moins performant pour les cumuls est le plus performant pour le nombre des jours de pluie en ne les surestimant que 1,5 à 2 fois. Les variabilités interannuelles sur les nombres de jours pluvieux semblent conformes aux observations, c'est-à-dire relativement faibles (entre 10 et 15 %), mais compte tenu des fortes surestimations cela signifie qu'en réalité les variabilités simulées sont nettement plus faibles que dans la réalité. La figure 3 présente les distributions moyennes interannuelles des pauses pluviométriques pour les quatre zones pluviométriques. La surestimation importante des nombres de jours pluvieux par les modèles régionaux se traduit au nord et au centre nord par une surestimation des nombres de pauses de moins de 5 jours. Par contre cela n'est pas le cas pour les autres zones, ce qui signifie que les modèles y simulent souvent des séquences d'événements pluvieux sur plusieurs jours successifs. Les occurrences de pauses de 5 à 15 jours sont globalement sous-estimées par l'ensemble des modèles sur toutes les zones. Cela découle clairement de la surestimation des nombres de jours pluvieux. Enfin on note que les MRC ont tendance à générer un peu trop de pauses de plus de 15 jours, et surtout de plus de 20 jours. Mais cependant pour ces types de pause on reste quoi qu'il en soit dans des fréquences d'occurrence

extrêmement faibles. Dans l'ensemble c'est le modèle GKSS qui reproduit le mieux la distribution des pauses.

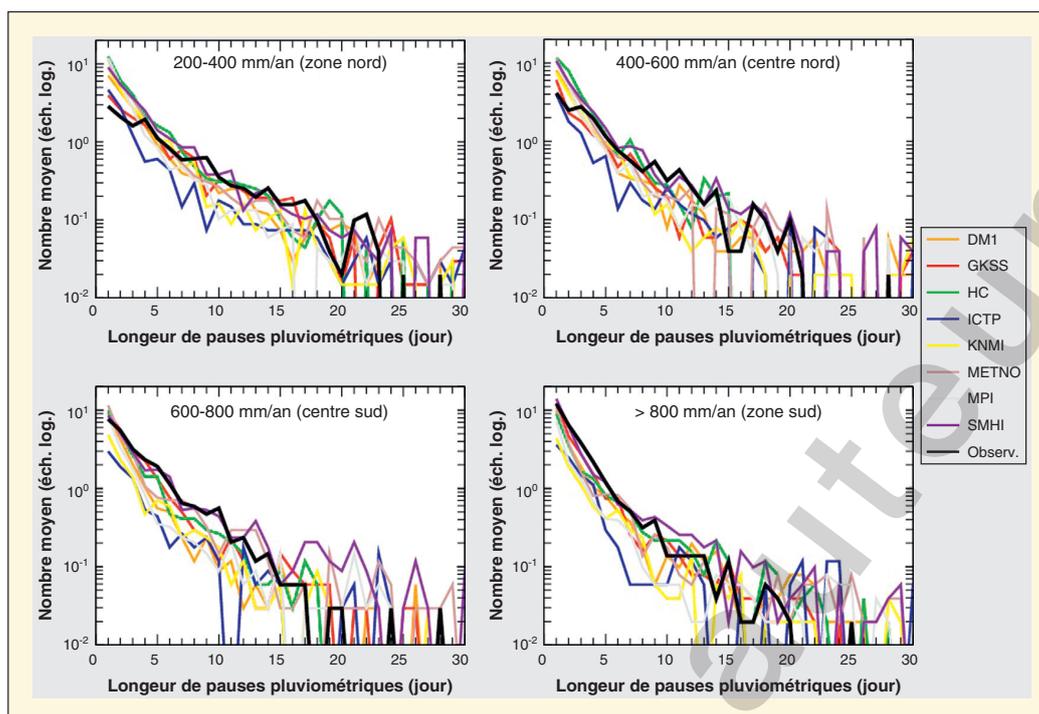
### Les biais des modèles régionaux dans la simulation des rendements

Les insuffisances des modèles régionaux pour représenter correctement la pluie se répercutent sur les simulations des rendements (tableau 4). Ainsi on remarque des biais sur les rendements qui varient de - 66 à 60 % du nord au centre sud du pays alors qu'à l'extrême sud ces biais vont de - 33 à 5 %. Les biais les plus importants sont observés pour le modèle GKSS. La variabilité interannuelle des rendements est assez mal représentée avec des coefficients de variation le plus souvent inférieurs à ceux des rendements estimés à partir des observations, mais qui parfois sont très supérieurs à la réalité (tableau 4).

Le biais dans la représentation de la quantité d'eau totale disponible au cours du cycle de la plante est la première cause dans le biais des rendements simulés par les MRC (figure 4), expliquant globalement 36 % de la variance des erreurs dans les simulations de rendement. Les erreurs sur les pluviométries simulées ont plus d'impact sur les rendements au nord (64 % d'explication de la variance des erreurs) qu'au sud (25 %). L'amplitude des biais liés à une mauvaise représentation du cumul pluviométrique mensuel ( $MRC_{cum}$ ) est la plus forte (avec des biais variant de - 80 à + 60 % environ ; figure 5, au centre) alors que le biais lié à la variabilité

**Tableau 3.** Évaluation des nombres de jours pluvieux annuels simulés par les modèles régionaux de climat (MRC) sur la période 1991-2007.

Zone	Paramètre	Obs	DMI	GKSS	HC	ICTP	KNMI	METNO	MPI	SMHI	Moy.MRC
Nord (NZ)	Moy. (/an)	21	63	39	135	79	128	91	119	72	83
	Biais (%)		197	84	536	272	499	328	457	240	327
	Cv (%)	14	0	30	0	12	9	9	7	0	13
Centre nord (CN)	Moy. (/an)	33	84	53	144	99	135	105	114	84	95
	Biais (%)		153	61	336	198	307	218	246	154	209
	Cv (%)	12	0	22	0	10	7	8	6	0	10
Centre sud (CS)	Moy. (/an)	41	108	76	157	123	152	118	127	85	110
	Biais (%)		163	86	283	201	272	189	211	107	189
	Cv (%)	13	0	14	0	9	6	8	6	0	9
Sud (SZ)	Moy. (/an)	62	123	107	179	148	175	144	157	127	136
	Biais (%)		98	73	190	139	182	133	154	105	134
	Cv (%)	11	0	11	0	6	5	6	5	0	7
Sénégal	Moy. des biais (%)		153	76	336	203	315	217	267	152	215



**Figure 3.** Distributions intrasaisonniers des pauses pluviométriques (périodes de jours successifs sans pluie) observées et simulées par les modèles régionaux de climat (MRC) pour les quatre zones agroclimatiques considérées.

intrasaisonniers ( $MRC_{dist}$ ) est plus faible (entre - 40 et +40 % ; figure 5, à droite). La variabilité intrasaisonniers a un rôle important dans la façon dont les pluies sont utilisées au cours de la saison de croissance de la plante : la figure 6 met

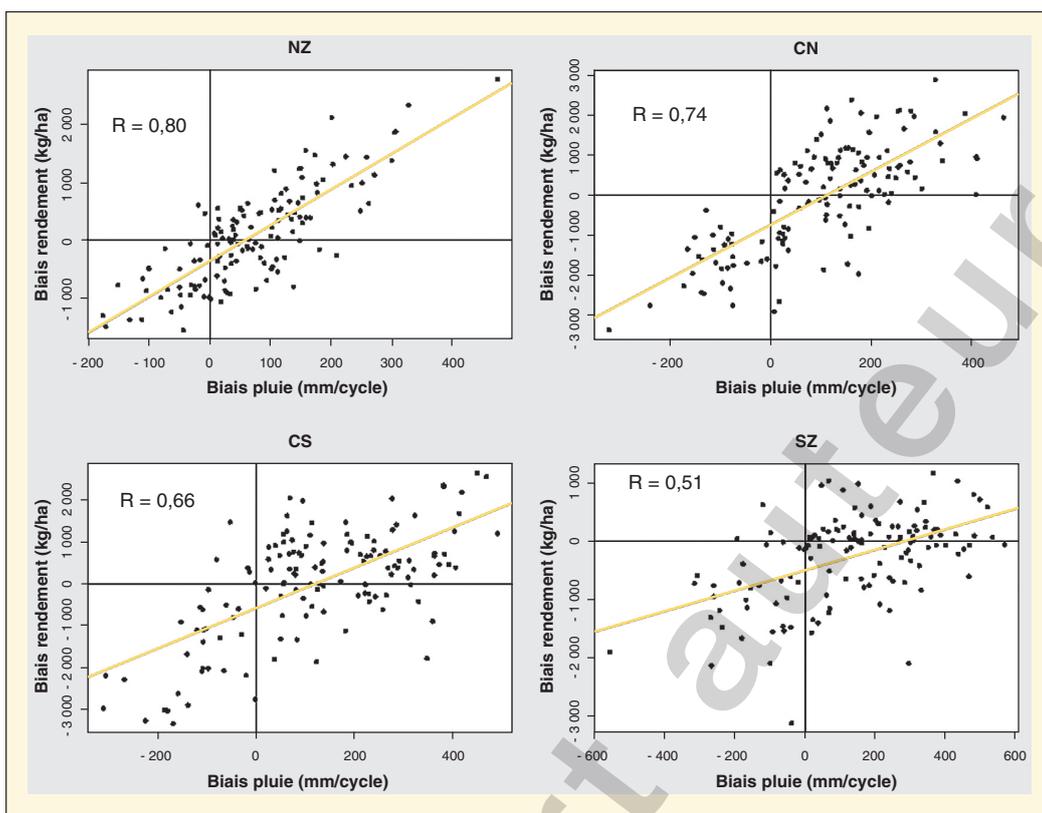
en évidence la relation non linéaire entre les rendements simulés et la pluie cumulée pendant le cycle de culture. Les rendements maximaux peuvent être obtenus dès 350 mm environ et avec les pluies observées ils sont toujours atteints

au-delà de 550 mm. Les rendements obtenus avec les pluies observées ne diminuent pas quand les cumuls pluviométriques augmentent au-delà de 550 mm alors que dans la réalité ce peut-être le cas car le rayonnement peut

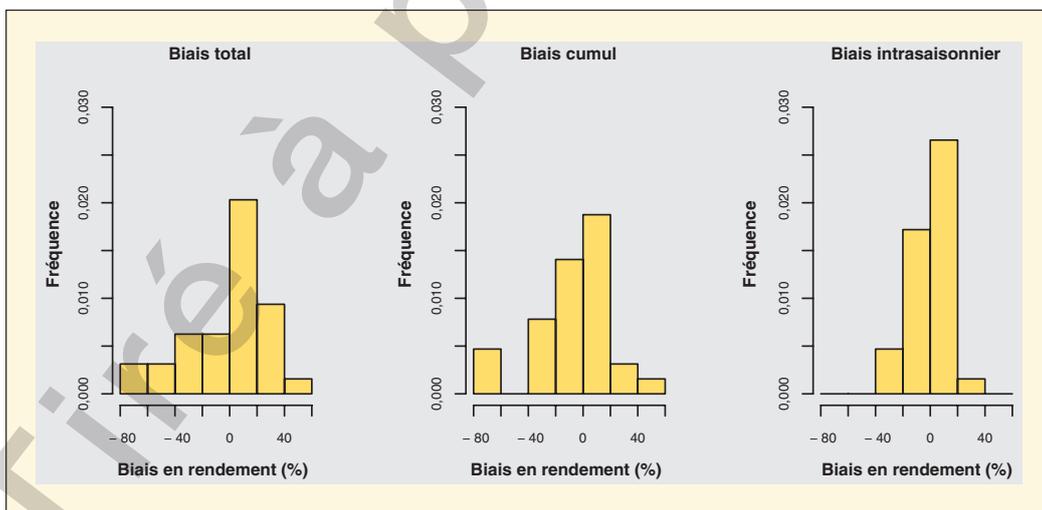
**Tableau 4.** Évaluation des rendements simulés par les forçages  $MRC_{orig}$  de SARRAH sur la période 1991-2007.

Zone	Paramètre	Obs	DMI	GKSS	HC	ICTP	KNMI	METNO	MPI	SMHI	Moy.MRC
Nord (NZ)	Moy. (kg/ha)	1 054	1 239	612	1 234	1 465	1 402	1 681	929	786	1 169
	Biais (%)		18	-42	17	39	33	59	-12	-25	11
	Cv (%)	60	16	73	57	76	9	26	49	41	43
Centre nord (CN)	Moy. (kg/ha)	2 140	3 106	867	2 408	3 028	2 774	2 336	2 534	1 372	2 303
	Biais (%)		45	-59	13	42	30	9	18	-36	8
	Cv (%)	32	6	11	6	6	1	6	8	15	7
Centre sud (CS)	Moy. (kg/ha)	2 851	3 472	967	3 067	3 360	3 487	3 162	3 235	2 147	2 862
	Biais (%)		22	-66	8	18	22	11	13	-25	0
	Cv (%)	10	4	5	0	9	1	0	8	30	7
Sud (SZ)	Moy. (kg/ha)	3 619	3 795	2 410	3 345	3 815	3 795	3 050	3 765	2 789	3 346
	Biais (%)		5	-33	-8	5	5	-16	4	-23	-8
	Cv (%)	8	6	47	6	8	6	10	8	16	13
Sénégal	Moy. des biais (%)		23	-50	8	26	23	16	6	-27	3

MRC : modèles régionaux de climat.

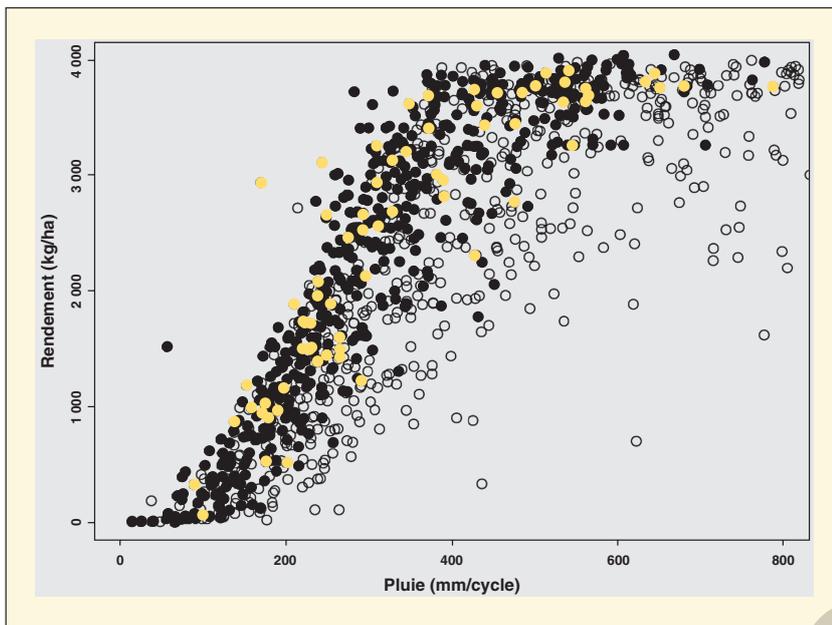


**Figure 4.** Relation entre les biais sur les rendements simulés (kg/ha) et les biais sur les pluies simulées (cumulées sur les cycles) (mm/cycle) des modèles régionaux de climat (MRC).



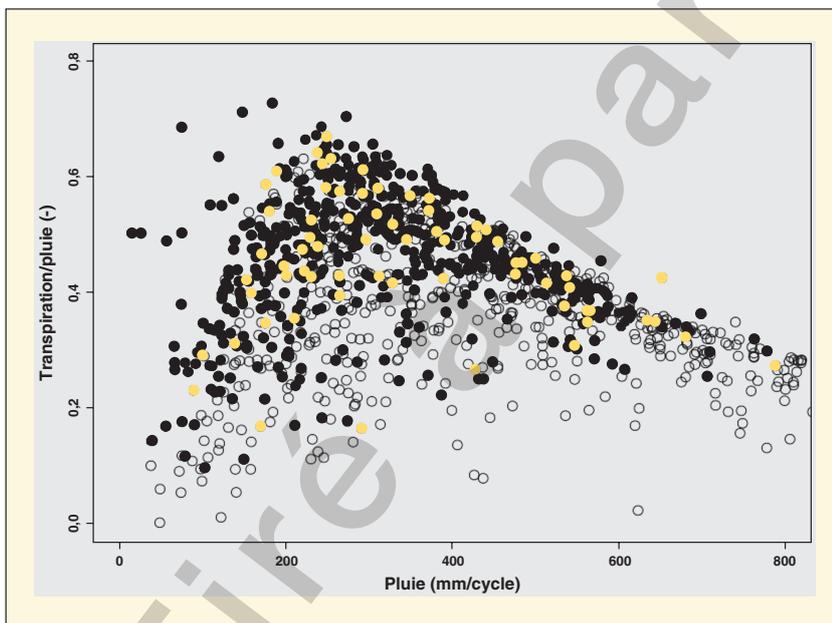
**Figure 5.** Distributions des biais sur les rendements simulés (%) issus des différents forçages.

À gauche, les biais moyens issus des données originales des modèles régionaux de climat (MRC<sub>orig</sub>). Au centre, les biais largement attribués aux cumuls journaliers de la pluie dans MRC (scénario de forçage MRC<sub>cum</sub>). À droite les biais largement attribués aux cumuls journaliers de la pluie dans MRC (scénario de forçage MRC<sub>dist</sub>).



**Figure 6.** Rendements simulés (kg/ha) en relation avec les pluies (cumulées sur les cycles de culture) pour les différents forçages selon les pluies observées (points jaunes), les pluies simulées originales  $MRC_{orig}$  (cercles blancs) et les pluies  $MRC_{cum}$  pour lesquelles l'intrasaisonnier est corrigé mais il y a des biais sur les cumuls (points noirs).

MRC : modèles régionaux de climat.



**Figure 7.** Efficacité des pluies (rapport entre la transpiration et la pluie) en relation avec la pluviométrie (cumulées sur les cycles de culture) pour les différents forçages selon les pluviométries observées (points jaunes), les pluviométries simulées originales  $MRC_{orig}$  (cercles blancs), et les pluviométries  $MRC_{cum}$  pour lesquelles l'intrasaisonnier est corrigé mais il y a des biais sur les cumuls (points noirs).

MRC : modèles régionaux de climat.

devenir limitant (Baron *et al.*, 2005), l'engorgement du sol également ainsi que les problèmes biotiques : la raison en est que nous travaillons avec des moyennes climatiques interannuelles et les aspects biotiques et d'engorgement ne sont pas considérés.

Le modèle SARRAH simule séparément l'évaporation du sol et la transpiration de la plante (Sultan *et al.*, 2005, Baron *et al.*, 2005). Ces deux processus s'effectuent de façon simultanée (évapotranspiration) et varient en fonction de la demande atmosphérique, du taux de couverture et des phases phénologiques de la plante. Cependant SARRAH distingue la demande potentielle de la consommation réelle, pour chaque processus en fonction de l'eau disponible pour la partie évaporation et la partie transpiration. L'évaporation potentielle est contrainte par l'eau disponible pour ce processus (notion de réservoir de surface), la transpiration potentielle est contrainte par la fraction d'eau disponible aux racines (notion de réservoir des racines). Le rapport entre la transpiration de la culture et la pluie cumulée sur son cycle, que l'on peut considérer comme un indicateur de l'efficacité de la pluie, est maximal dès 250 mm de pluie (figure 7). Lorsque la variabilité intrasaisonniers des pluies est correctement représentée (simulation de contrôle en rouge et simulation  $MRC_{cum}$  en noir sur les figures 6 et 7), on observe une plus grande efficacité des pluies et des rendements plus importants pour un même cumul pluviométrique.

## Conclusions et perspectives

Si la majeure partie des études sur les impacts du climat utilise de MRC, cette étude est l'une des premières à mettre en évidence les erreurs liées au choix d'un modèle régional dans la quantification des impacts. À travers l'exemple de l'agriculture au Sénégal et l'utilisation d'un ensemble unique de simulations régionales sur l'Afrique de l'Ouest, on montre qu'il existe une grande dispersion dans la représentation de la pluviométrie d'un modèle régional à l'autre (et même quelques fois pour un même modèle régional avec deux jeux de paramètres différents) tant à l'échelle saisonnière qu'à l'échelle intrasaisonniers. Ces biais introduisent des erreurs importantes dans l'estimation des impacts agronomiques du climat. De telles erreurs peuvent être à même d'invalider des conclusions sur les impacts du changement climatique basés sur l'utilisation d'un seul modèle régional.

Notre étude confirme également l'intérêt de développer des méthodes de correction des biais (Oetli *et al.*, 2011). On a pu constater que l'essentiel des biais dans les rendements simulés avec les modèles régionaux provient de leur mauvaise représentation de la quantité totale de pluie pendant le cycle de la plante. Néanmoins, on montre le rôle non négligeable de la représentation de la variabilité intrasaisonnière qui modifie l'efficacité des pluies au cours du cycle de croissance de la plante et affecte le rendement.

Enfin cette étude souligne l'importance d'une approche multimodèle pour quantifier les incertitudes dans les études d'impacts comme cela est préconisé par les projets et programmes internationaux (ENSEMBLES, CORDEX). Nos résultats mettent également en évidence l'urgence de réduire l'incertitude dans les processus atmosphériques qui contrôlent les pluies de mousson dans les modèles de climat afin d'améliorer la simulation des pluies. Le projet AMMA et AMMA-MIP (Hourdin *et al.*, 2010) est un cadre idéal pour réaliser des avancées en ce sens. ■

#### Remerciements

Nous sommes particulièrement reconnaissants à l'Agence universitaire de la Francophonie (AUF) pour le soutien à la mobilité et à la *Deutscher Akademischer Austauschdienst German Academic Exchange (DAAD)* pour son soutien financier. Les données « *ENSEMBLES data* » utilisées ici proviennent du EU FP6 Integrated Project ENSEMBLES (Contract number 505539). <http://ensemblesrt3.dmi.dk>. Ce travail a bénéficié du support de l'Agence nationale de la recherche (ANR) à travers le projet ESCAPE (ANR-10-CEPL-005 ; <http://www.locean-ipsl.upmc.fr/~ESCAPE>).

#### Références

Baron C, Sultan B, Balme M, Sarr B, Traoré S, Lebel T, Janicot S, Dingkuhn M, 2005. From GCM grid cell to agricultural plot : scale issues affecting modeling of climate impact. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 360 (1463) : 2095-108. doi : 10.1098/rstb.2005.1741.

Berg A, Sultan B, De Noblet N, 2010. What are the dominant features of rainfall leading to realistic large-scale crop yield simulations in West Africa? *Geophysical Research Letters* 37. doi : 10.1029/2009GL041923.

Dingkuhn M, Baron C, Bonnal V, *et al.*, 2003. Decision-support tools for rainfed crops in the Sahel at the plot and regional scales. In : Struif-Bontkes TE, Wopereis MCS, eds. *A practical guide to decision-support tools for agricultural productivity and soil fertility enhancement in sub-Saharan Africa*. Muscle Shoals (Alabama, États-Unis) : International Fertilizer Development Center (IFDC) ; Center for Agricultural & Rural Cooperation (CTA).

Goddard L, Mason SJ, Zebiak SE, Ropelewski CF, Basher R, Cane MA, 2001. Current approaches to seasonal-to-interannual climate predictions. *International Journal of Climatology* 21 : 1111-52.

Hansen JW, Challinor A, Ines A, Wheeler T, Moron V, 2006. Translating climate forecasts into agricultural terms : advances and challenges-Translating. *Climate Research* 33. 27-41.

Herrera E, Ouarda TBMJ, Bobée B, 2006. Méthodes de désagrégation appliquées aux modèles du climat global Atmosphère-Océan (MCGAO). *Revue des Sciences de l'eau* 19 : 297-312.

Heuvelink GBM, 1998. Uncertainty analysis in environmental modelling under a change of spatial scale. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 50 : 255-64.

Hourdin F, Musat I, Guichard F. *et al.*, 2010. Amma-model intercomparison project. *Bulletin of the American Meteorological Society*. doi : 10.1175/2009BAMS2791.1.

Jones RG, Noguier M, Hassell DC, Hudson D, Wilson SS, Jenkins GJ, Mitchell JFB, 2004. *Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS*. Exeter (UK) : Met. Office Hadley Center.

Mishra A, Hansen JW, Dingkuhn M, Baron C, Traoré SB, Ndiaye O, Ward MN, 2008. *Agricultural and forest meteorology* 148 : 1798-814.

Ndiaye O, Ward NM, Thiaw W, 2011. Predictability of seasonal sahel rainfall using GCMs and lead-time improvements through the use of a coupled model. *Journal of Climate* 24 : 1931-49. doi : 10.1175/2010JCLI3557.1.

Oetli P, Sultan B, Baron C, Vrac M, 2011. Are regional climate models relevant for crop yield prediction in West Africa? *Environmental Research Letters* 6 : 014008 (9pp). doi : 10.1088/1748-9326/6/1/014008.

Paeth H, Hall MJN, Gaertner AM *et al.*, 2011. Progress in regional downscaling of West African precipitation. *Atmospheric Science Letter* 12 : 75-82. doi : 10.1002/asl.306.

Redelsperger J-L, Thorncroft C, Diedhiou A, Lebel T, Parker D, Polcher J, 2006. African monsoon, multidisciplinary analysis (AMMA) : an International research project and field campaign. *Bulletin of the American Meteorological Society* 87 : 1739-46.

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 en Sciences de l'ingénieur, université Cheikh Anta Diop de Dakar (Ucad), Sénégal.

Salack S, Muller B, Gaye AT Gaye, 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*. doi : 10.1007/s00704-011-0414-z.

Sultan B, Baron C, Dingkuhn 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, Dingkuhn M, Muller B, Traoré S, Sarr B, 2008. Les impacts agronomiques du climat en Afrique de l'Ouest : une illustration des problèmes majeurs. *Sécheresse* 19 : 29-37. doi : 10.1684/sec.2008.0122.

Sylla MB, Gaye AT, Pal JS, Jenkins GS, Bi XQ, 2010a. High-resolution simulations of West African climate using regional climate model (RegCM3) with different lateral boundary conditions. *Theoretical and Applied Climatology*. doi : 10.1007/s00704-009-r-0110-4.

Sylla MB, Dell'Aquila A, Ruti PM, Giorgi F, 2010b. Simulation of the intraseasonal and the interannual variability of rainfall over West Africa with RegCM3 during the monsoon period. *International Journal of Climatology*. doi : 10.1002/joc.2029.

Traoré SB, Agali A, Muller B, *et al.*, 2011. Characterizing and modeling the diversity of cropping situations under climatic constraints in West Africa. *Atmospheric Science Letter* 12 : 89-95. doi : 10.1002/asl.295.

van der Linden P, Mitchell JFB, 2009. *ENSEMBLES : Climate Change and its Impacts : Summary of Research and Results from the ENSEMBLES Project*. Exeter (UK) : Met. Office Hadley Center.

Zorita E, Von Storch H, 1999. The analog method - a simple statistical downscaling technique : comparison with more complicated methods. *Journal of Climate* 12 : 2474-89.

Annexe G

Poster Lauréat d'un Prix WCRP 2011

(Meilleures présentations Poster)

# Dry spells analysis: Multi-scale detection, attribution of impacts and sources of uncertainty using an integrative approach

Seyni Salack<sup>1,2,\*</sup>, Bertrand Muller<sup>2</sup>, Amadou T. Gaye<sup>1</sup>, Frédéric Hourdin<sup>3</sup>

1 - Laboratoire de Physique de l'Atmosphère et de l'Océan - *Siméon Fongang* - Ecole Supérieure Polytechnique de l'Université Cheikh Anta Diop (UCAD) Dakar, Senegal  
 2 - Centre d'Étude Régional pour l'Amélioration de l'Adaptation à la Sécheresse (CERAAS), Thiès, Senegal and CIRAD, Montpellier, France  
 3 - Laboratoire de Météorologie Dynamique, Université Pierre et Marie Curie (UPMC), BP 99, 75292 Paris Cedex 05, France

## Introduction

The analyses of rainfall in the last one and half decade have revealed the persistence of « dry days episodes » (dry spells, DS) in the seasonal distribution of rainfall events (Salack *et al.* 2011a). This poster reports results of studies which objectives were to (i) improve our understanding of DS space-time distribution, (ii) detect DS implications in rainfall patterns (Salack *et al.* 2011b), (iii) estimate DS impacts on local millet production and associated uncertainties using crop and climate models (Salack *et al.* 2011c). DS analysis is essential for drought monitoring and food crisis alleviation in the Sahel and Sudan zones of West Africa.

## Data and Methods

Data consists of 87-rain gauge daily data and 8 Regional climate models (RCM) ensemble simulations (fig. 1). The rain gauge network is divided into catchments of different dimensions (fig. 2). Following a multiple scale extraction algorithm (equation 1), the rain gauge data is assessed to detect the intraseasonal starting dates (STDATE), duration (L), seasonal frequency of occurrence (F) and interannual oscillations of dry spells (DS) at station, 1°x1°, 2°x2° and rainfall regions. Both observed and 8-RCM ensemble simulation rainfall are used to force crop models in order to identify and estimate the potential impacts of DS on millet production.

The integration of 8-RCM ensemble rainfall to a crop model (SARRAH) shows how much the biases in the distribution of DS is propagated into impact assessments studies on potential millet yield at local scale.

$$RRD_{Na} = \begin{cases} 0 & \text{if } \sum_{j=1}^M RD_{ij} \leq M(1-\alpha) \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

The rain gauge network of each catchment (fig 2) is crypted into a binary matrix of 0 and 1 elements for dry and rain day respectively (RD). Equation 1 is used to define regional dry spell ( $RRD_{Na}$ ).  $M$  is the total number of rain gauge per region,  $RD_{ij}$  is a dry (rainy) day at each rain gauge,  $N$  is the day of the calendar,  $\alpha = ]0,1[$  represents the fraction of the rain gauge network of the region or box (fig. 2). More details can be taken from in Salack *et al.* (2011b).

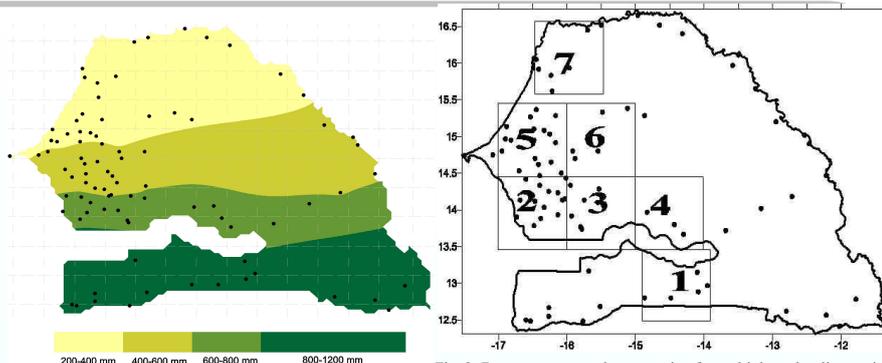


Fig. 1: Agroclimatic zones (colors), rain gauge location (dots) and RCM grid mesh over Senegal (grey lines).

Fig. 2: Degree square catchment setting for multiple scales diagnostic of dry spell. Boxes 1-7 are 1°x1° (GB1-7) and boxes 2, 3, 5, 6 make a 2°x2° degrees (B2x2).

### Algorithm of local to and multiple sites (regional) dry spells extraction

## Results and Discussions

### 1. Multiple scales characteristics of dry spells

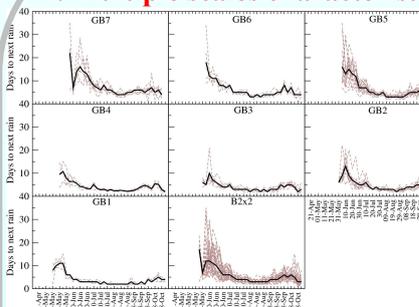


Fig. 3. Average seasonal starting dates (STDATE) and duration of local dry spells observed at individual (dotted lines) and area average (black thick line) over sub-regional rain gauge networks (GB1-7 & B2x2).

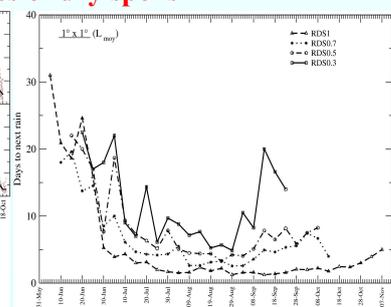


Fig. 4. Average seasonal distribution of regional dry spells, RDS, for different fractions of the local rain gauge network of a 1°x1° region (i.e GB5).

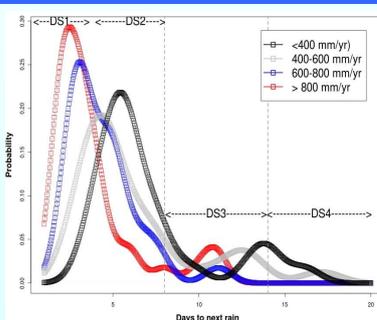


Fig. 5. Seasonal frequency of occurrence of dry spell categories in the agroclimatic zones of Senegal. DS1, 2 are short, DS3 are medium and DS4 are major dry spell categories.

### Discussion 1

- \*\* Short dry spell category (DS=1-4 days, DS2=5-7 days) are more frequent in Aug-Sept (fig. 3&4).
- \*\* Medium category dry spells (DS3=8-14 days) are more frequent in Aug-Sept-October (fig. 3&4).
- \*\* Major category of dry spells (DS4 > 14 days) are prevalent in June-July.
- \*\* DS3 & DS4 have low seasonal frequency of occurrence at all rainfall zones (fig. 5). They are classified as extreme dry spells (extDS) because of their implications in crop yield loss (Sivakumar 1992) and rainfall variability (Salack *et al.* 2011a, 2011b).

### 2. Attribution of impacts and sources of uncertainty in forecasting seasonal extreme DS oscillations

#### Discussion 2

- \*\* Extreme dry spells (extDS) are associated to rainfall deficits (table1). They explain the maximum loss of millet yield in the Sahel and Sahel-Sudan regions of West Africa (Sivakumar 1992).
- \*\* Original 8-RCM ensemble forecasts are unable to describe very well the seasonal frequency-duration (fig. 6a) and starting dates of extDS (fig. 6b, c) in those regions, due to high level of noise (i.e < 1 mm/day) in RCMs' simulations. When the noise is filtered out from the original outputs during post-treatments (RCM-fil), better results are found.
- \*\* The lack of good representation of DS in RCMs ensemble forecasts explains -40 to +40% of biases in crop model simulations of potential millet yield in Senegal (fig. 6d, Salack *et al.* 2011c).

Table 1: Contingency table on the interannual oscillation of extreme dry spell categories (found on at least 30% of the rain gauge network) and the quality of rainy seasons. The green years are normal, the red years are dry and the yellow years very dry relative to the 1950-2010 mean over Sénégal (Salack *et al.* 2011b).

Quality of rainy season	DS4 Category (June-July)	DS3 Category (Aug-Sept)
DS4 Category (June-July)	1973, 1974, 1975, 1980, 1982, 1983, 1986, 1987, 1988, 1995, 2002	1972, 1976, 1977, 1991, 1992, 1997, 2007
DS3 Category (Aug-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

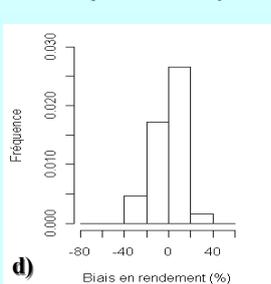
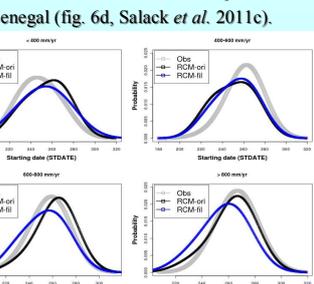
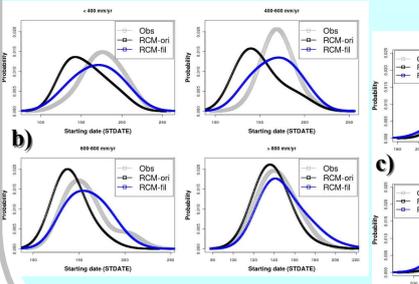
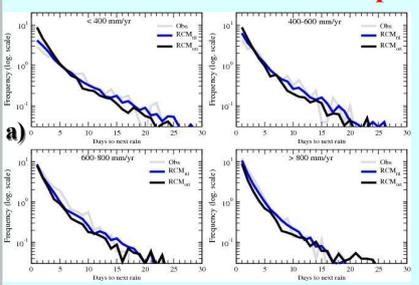


Fig. 6: Seasonal frequency and starting dates of extreme dry spells (extDS) in different rainfall regions. a) frequency-duration diagram. b) starting date of DS4 in Jun-July c) starting dates of DS3 in Aug-Sept. d) millet production rates of biases due to frequency of rainfall events in the 8-RCM ensemble forecasts.

### References

- Salack S. *et al.* (2011a). Rain-based factors of high agricultural impacts: integration of local to sub-regional trends and variability. *Theo. App. Clim. Doi. 10.1007/s00704-011-014-z*
- Salack S. *et al.* (2011b). Multi-scale analyses of dry spells in Niger and Senegal. *Secheresse (accepted)*.
- Salack S. *et al.* (2011c). Sensitivity of potential yields of millet to the representation of rainfall in regional climate models. *Secherresse (submitted)*.
- Sivakumar MVK (1992). Empirical analysis of dry spells for agricultural applications in West africa. *J. climate* 5: 532-539

## Annexe H

Archive des Lauréats du WCRP open  
science conference, Denver, USA, 24-28  
octobre 2011

# WCRP OPEN SCIENCE CONFERENCE

CLIMATE RESEARCH IN SERVICE TO SOCIETY

24–28 October 2011, Denver, Colorado, USA

conference2011.wcrp-climate.org



## The Recipients of Prizes for the Best Posters and Papers Presented at the WCRP Open Science Conference



We are pleased to announce the complete list of awardees for the best posters and papers presented at the World Climate Research Programme (WCRP) Open Science Conference on 24–28 October in Denver, Colorado, USA. All those listed in the table below, received a certificate citing “outstanding poster presentation” or “outstanding presentation” depending whether it was a poster or an oral presentation.

These recipients were selected based on rigorous evaluation of 487 posters and 26 papers

presented by students and early career scientists. These were among 1750 posters and 182 papers presented orally by more than 1900 conference participants from 86 countries. The evaluation and selection process was carried out by a team of evaluators and a panel of judges. The awards recipients were identified for each group of posters and papers presented daily. The five grand prize-winners of iPADS were selected from the combined list of best posters and papers for the entire conference.

The daily prizes consisted of memberships and books kindly provided by the American Geophysical Union (AGU), American Meteorological Society (AMS) and the European Geophysical Union (EGU). Four of the five iPADS were provided by the World Climate Research Program and its sponsors the World Meteorological Organization (WMO), Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO (IOC) and International Council for Science (ICSU). The fifth iPad was donated by the Science and Technology Corporation.

We thank all students and early career scientists who participated in the competition. We are grateful to the evaluators and judges who worked very hard and spend long hours during the conference to complete their tasks in a timely and effective manner. We congratulate all of the recipients and wish them success in their education and research pursuit. We look forward to the continued participation of all those who participated in the conference, especially more than 500 students and early career scientists, in WCRP related activities in the future.

Ghassem R. Asrar  
Director, World Climate Research Programme

72701	The chemical sensitivity of stratospheric ozone to nitrous oxide and methane	Th10A	NIWA, New Zealand	<b>Laura E Revell</b> , Greg E Bodeker, Petra E Huck, Dan Smale, Bryce E Williamson	Stratospheric Ozone and Other Trace Gases	C35	AGU Membership Student
73506	CLIVAR-SPAIN CONTRIBUTIONS Atmospheric contribution to Mediterranean sea level variability under different climate change scenarios	TH182A	IMEDEA (UIB-CSIC), Spain	<b>Gabriel Jorda</b> , Marta Marcos, Dami_Gomis, Enrique_Ivarez-Fanjul, Bego_a_P_rez, Samuel Somot	Meeting the needs for integrated climate science, information and capacity building with regard to climate variability and change in Europe	C4	AGU Membership ECS
75861	Analyzing the Pacific-North American teleconnection pattern and its relationship to climate using RegCM3, a high-resolution regional climate model	Th58B	USGS/Oregon State University, USA	<b>Andrea M Allan</b> , Steven W Hostetler, Jay Alder	Large-scale Climate Variability and Change	C36	AGU Membership Student
73383	MODELLING THE IMPACTS OF REFORORESTATION ON FUTURE CLIMATE IN WEST AFRICA	TH189B	University of Cape Town, South Africa	<b>Babatunde J Abiodun</b>	Geoengineering to counteract global warming?	C45	iPad and AGU Book
73156	Dry spells analysis: Multi-scale detection, attribution of impacts and sources of uncertainty using an integrative approach.	TH145A	University Cheikh Anta Diop, Senegal	<b>Salack Seyni</b> , Amadou T Gaye, Muller Bertrand, Frederic Hourdin	Understanding and characterizing past, present and future climate extremes through observations and model simulations	C39	AGU Membership Student
73316	The Drought Interest Group: Comparison of the performance of five indices for drought characterization in La Plata Basin. Perspectives towards a multi-scale monitoring system.	TH93B	University of Buenos Aires, Argentina	<b>Juan A Rivera</b> , Olga C Penalba	Understanding and characterizing past, present and future climate extremes through observations and model simulations	C39	AGU Book
73238	On the Sea Level Rising Rate Since 1993	Th19B	First Institute of Oceanography, SOA, People's Republic of China	<b>YING FENG</b> , Xianyao Chen, Norden E Huang, Zhaohua Wu, Fangli Qiao	Sea-Level variability and Change	C38	AGU Book
73309	The Drought Interest Group: Using Ecosystem Functional Types as Lower Boundary Conditions in Simulations of Droughts in Southern South America	TH98A	National University of Litoral (UNL), Argentina	<b>Omar V Muller</b> , Ernesto H Berbery, Domingo Alcaraz-Segura	Understanding and characterizing past, present and future climate extremes through observations and model simulations	C39	iPad and AGU Book

Local Variables : mode : latex TeX-master : "../thesis" End :

Nom et Prénom : SALACK Seyni

Titre de la thèse : Analyse des pauses pluviométriques et évaluation des incertitudes de la pluie des modèles régionaux de climat à l'aide d'un modèle de culture

**RESUME :** Les poches de sécheresse intrasaisonnière ou pauses pluviométriques sont des facteurs pluviométriques néfastes pour l'agriculture pluviale, surtout lorsqu'elles apparaissent durant les phases critiques du développement des cultures. Elles sont les indicateurs principaux de la distribution intrasaisonnière de la pluie. Une mise à jour agro-climatologique des précipitations de la sous-région montre un retour apparent des déficits pluviométriques. Les "nouvelles" tendances positives et statistiquement significatives, observées sur les cumuls annuels sont de plus en plus associées à des pauses pluviométriques. Sur la base des observations de la pluie journalière, de 1960 à 2000 (12 sites au Niger) et de 1950-2010 (84 sites au Sénégal), l'extraction et l'analyse de ces pauses pluviométriques aboutissent à l'identification de leur distribution intrasaisonnière à l'échelle locale et multi-sites sur une aire limitée (pauses régionales). La caractérisation multi-échelle des dates de pauses de début et fréquences d'occurrence montrent les similitudes et disparités entre ces deux pays, ainsi qu'une meilleure compréhension de l'implication des pauses dans la variabilité de la pluviométrie locale. En particulier, les résultats sur les dates d'occurrence des pauses extrêmes de catégories DS4 (DS3) montre qu'elles sont plus précoces dans les années humides et tardives sur le calendrier culturale des années sèches. Le nombre de cas par saison n'a pas changé significativement. Cependant, leur occurrence est corrélée aux déficits pluviométriques saisonniers dans la zone d'étude. Le caractère saisonnier, la composante méso-échelle qu'elles exhibent et leur corrélations avec les anomalies des températures des Océans prouvent que les pauses extrêmes sont potentiellement prévisibles. La connaissance des périodes intrasaisonnières à forte probabilité d'occurrence des pauses extrêmes permet d'éviter les fausses alertes de début de saison (les "faux départs"), éviter les périodes à risque de stress hydrique et d'optimiser le choix des dates de semis réussis en milieu paysan.

Les sorties d'ensemble multi-modèles régionaux de climat sont unanimes sur la bonne représentation des dates d'occurrence de ces catégories de pauses dans les zones aux cumuls annuels moyens  $\geq 600$  mm. Cependant, ils présentent une faible représentation des pauses extrêmes dans les zones à risque où les cumuls moyennes sont inférieurs à 600 mm/an. Une étude de sensibilité à travers le modèle de culture SARRAH, montre que ces biais (négatif/positifs) sur la distribution intrasaisonnière de la pluie sont plus fréquents et peuvent expliquer -40 % à +40 % des biais sur la croissance, le développement et les rendements du mil *Souna III*. Par ailleurs, les résultats de cette étude montrent aussi que les méthodes d'extraction, les artefacts de post-traitement des sorties des modèles de climat, les biais sur les cumuls journaliers tout comme les biais sur les fréquences d'occurrences des événements pluviométriques (pauses pluviométriques) sont des sources d'incertitudes importantes dans l'attribution d'impacts à la pluie.

**Mots clés :** Pause Pluviométrique, Modèles Régionaux de Climat, Prévisibilité des Pauses extrêmes, Incertitudes en évaluation d'impacts, Sénégal-Niger, Sahel Ouest-Africain.

---

Name and First name : SALACK Seyni

Thesis title : Analysis of dryspells and evaluation of uncertainties in rainfall simulated by regional climate models using a crop model.

**SUMMARY :** The intra-seasonal episodes of drought or dry spells (DS) events are rainfall hazards for rainfed agriculture, especially when they occur at crop's critical stages. They are the main indicators of rainfall distribution within the rainy season. An agro-climatologic update of rain regimes over the sub-region reveals an obvious recovery from drought. These "new" positive and statistically significant trends of annual rain amounts are embedded with an increase in dry spell occurrence. On the basis of observed daily records of rainfall, from 1960 to 2000 (12 sites in Niger) and 1950 to 2010 (84 sites from Senegal), the extraction and analysis of these dry spells led to their typology, intra-seasonal distribution at local and multi-sites over a limited area (simultaneous dry). The space-time multi-scale characterization of the onset dates and seasonal frequency of occurrence of dry spells shows the common patterns and contrasts between the two countries, including a better understanding of extreme dry spells' implication in the local rainfall variability. In particular, the results on the assessment of the starting dates reveals an early (late) occurrence of extreme dry spells of category DS4 (DS3) during wet years and a late (early) onset in dry years. The number of cases per season has not changed significantly over time. However, their occurrence is correlated to seasonal rainfall deficits. Their seasonality, méso-scale component found and their links to remote Oceans' surface temperature anomalies indicate that extreme dry spells are potentially predictable. The knowledge of high risk intra-seasonal periods of extreme dry spells occurrence helps to avoid "false onset" of rainy season, high water stress rainless days and the identification of successful on-farm cropping dates.

Regional climate models ensemble-based simulations are unanimous in describing the onset dates of extreme dry spells across regions where average annual rainfall amount is  $\geq 600$  mm. However they show low description over the regions where annual rainfall does not exceed 600 mm. A sensitivity analysis through the SARRAH crop model reveals that this biasness (negative/positive) in rainfall distribution is more frequent and can account for -40 % to +40 % bias in the development and yield of the *Souna III* millet cultivar. On the other hand, the results of this study show also that the methods of extraction, post-treatment artefacts of models products, the bias in daily rainfall amount and frequency of occurrence of rainfall events (such as extreme dry spells) are all sources of uncertainty in the attribution of impacts to rainfall.

**Keywords :** Dry Spell, Regional climate models, Predictability of extreme dryspells, Uncertainties in impacts evaluation, Senegal-Niger, West-African Sahel.

