



**HAL**  
open science

## Approche multi-scalaire du démarrage de la saison des pluies au Sahel central et occidental : cohérence spatiale et prévisibilité.

Romain Marteau, Vincent Moron, Nathalie Philippon, Bernard Fontaine

### ► To cite this version:

Romain Marteau, Vincent Moron, Nathalie Philippon, Bernard Fontaine. Approche multi-scalaire du démarrage de la saison des pluies au Sahel central et occidental : cohérence spatiale et prévisibilité.. Bulletin de l'Association de géographes français, 2010, pp.207-220. 10.3406/bagf.2010.8153 . hal-00551978

**HAL Id: hal-00551978**

**<https://hal.science/hal-00551978v1>**

Submitted on 4 Mar 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NoDerivatives 4.0 International License

Approche multi-scalaire du démarrage de la saison des pluies au  
Sahel central et occidental : cohérence spatiale et prévisibilité  
(*Multiscalar approach of the onset of rainy season in central and  
western Sahel : spatial coherence and predictability*)

Romain Marteau, Nathalie Philippon, Bernard Fontaine, Vincent Moron

---

**Citer ce document / Cite this document :**

Marteau Romain, Philippon Nathalie, Fontaine Bernard, Moron Vincent. Approche multi-scalaire du démarrage de la saison des pluies au Sahel central et occidental : cohérence spatiale et prévisibilité (*Multiscalar approach of the onset of rainy season in central and western Sahel : spatial coherence and predictability*). In: Bulletin de l'Association de géographes français, 87e année, 2010-2. Approches spatiales multiscalaires en climatologie. pp. 207-220;

doi : <https://doi.org/10.3406/bagf.2010.8153>

[https://www.persee.fr/doc/bagf\\_0004-5322\\_2010\\_num\\_87\\_2\\_8153](https://www.persee.fr/doc/bagf_0004-5322_2010_num_87_2_8153)

---

Fichier pdf généré le 08/09/2020

## Abstract

The spatial coherence of boreal monsoon onset (July-September) over the western and central Sahel is studied through the analysis of daily rainfall records for 136 rain-gauges from 1950-2000. Onset of the rainy season has been defined using 3 definitions which rely on 3 overlapping spatial scales : (i) the regional scale, i. e. the northward ITCZ jump from Guinean to Soudano-Sahelian latitudes, (ii) the meso-scale related with the first occurrence of the main rainfall-generating phenomenon, that is squall line and (iii) the local-scale of the first rainfall recorded at the rain-gauge. Local and meso-scale onsets show a weak degree of instantaneous and interannual spatial coherence, meaning that onset is almost never simultaneously recorded across a regional network but also that its interannual variability is not in-phase across such areas. In consequence, the seasonal predictability of the monsoon onset coming from planetary and zonal sea surface temperature variations is, at best, weak.

## Résumé

La cohérence spatiale du démarrage des pluies de mousson (juillet-septembre) au Sahel occidental et central a été analysée à partir d'un réseau de 136 stations de 1950 à 2000. La date de démarrage de la saison des pluies a été appréhendée selon trois échelles imbriquées : (i) l'échelle régionale du «saut de mousson », c'est-à-dire la migration brutale (le mot anglais est un faux-ami) de la zone de convergence inter-tropicale des latitudes guinéennes vers la bande soudano-sahélienne, (ii) la méso-échelle, c'est-à-dire la première occurrence du principal système pluviogène à l'origine de la grande majorité des pluies à savoir les «lignes de grains » et (iii) l'échelle locale des premières précipitations significatives (~ 20 mm) relevées dans un pluviomètre. La date de démarrage de la saison des pluies définie selon les définitions locale et méso-échelle présente une faible cohérence spatiale à l'échelle interannuelle. Le démarrage de la saison des pluies n'affecte donc pas simultanément un espace très vaste et ses variations interannuelles ne sont pas en phase entre des stations géographiquement proches. Ainsi, une faible cohérence spatiale des anomalies interannuelles suggère que la prévisibilité saisonnière du démarrage de la mousson au Sahel, issue de forçages océaniques d'échelle planétaire, zonale et/ou régionale, est relativement faible.

# ***Approche multi-scalaire du démarrage de la saison des pluies au Sahel central et occidental : cohérence spatiale et prévisibilité.***

(MULTISCALAR APPROACH OF THE ONSET OF RAINY SEASON IN CENTRAL AND WESTERN SAHEL : SPATIAL COHERENCE AND PREDICTABILITY)

**Romain MARTEAU<sup>\*</sup>, Vincent MORON<sup>\*\*</sup>,  
Nathalie PHILIPPON<sup>\*</sup> & Bernard FONTAINE<sup>\*</sup>**

RÉSUMÉ – *La cohérence spatiale du démarrage des pluies de mousson (juillet-septembre) au Sahel occidental et central a été analysée à partir d'un réseau de 136 stations de 1950 à 2000. La date de démarrage de la saison des pluies a été appréhendée selon trois échelles imbriquées : (i) l'échelle régionale du « saut de mousson », c'est-à-dire la migration brutale (le mot anglais est un faux-ami) de la zone de convergence inter-tropicale des latitudes guinéennes vers la bande soudano-sahélienne, (ii) la méso-échelle, c'est-à-dire la première occurrence du principal système pluvio-gène à l'origine de la grande majorité des pluies à savoir les « lignes de grains » et (iii) l'échelle locale des premières précipitations significatives (~ 20 mm) relevées dans un pluviomètre. La date de démarrage de la saison des pluies définie selon les définitions locale et méso-échelle présente une faible cohérence spatiale à l'échelle interannuelle. Le démarrage de la saison des pluies n'affecte donc pas simultanément un espace très vaste et ses variations interannuelles ne sont pas en phase entre des stations géographiquement proches. Ainsi, une faible cohérence spatiale des anomalies interannuelles suggère que la prévisibilité saisonnière du démarrage de la mousson au Sahel, issue de forçages océaniques d'échelle planétaire, zonale et/ou régionale, est relativement faible.*

Mots-clés : *Démarrage de la saison des pluies ; Sahel ; Cohérence Spatiale ; Prévisibilité saisonnière*

---

\* Centre de Recherches de Climatologie, UMR 5210/CNRS, Université de Bourgogne, Dijon, France, [Romain.Marteau@u-bourgogne.fr](mailto:Romain.Marteau@u-bourgogne.fr), [nphilipp@u-bourgogne.fr](mailto:nphilipp@u-bourgogne.fr), [bernard.fontaine@u-bourgogne.fr](mailto:bernard.fontaine@u-bourgogne.fr)

\*\* Professeur à l'Université de Provence Aix-Marseille I - CEREGE Centre Européen de Recherches et d'Enseignement en Géosciences de l'Environnement, CNRS UMR 6635, Europôle Méditerranéen de l'Arbois, BP 80, 13545 Aix-en-Provence, [moron@cerege.fr](mailto:moron@cerege.fr)

**ABSTRACT** – *The spatial coherence of boreal monsoon onset (July-September) over the western and central Sahel is studied through the analysis of daily rainfall records for 136 rain-gauges from 1950-2000. Onset of the rainy season has been defined using 3 definitions which rely on 3 overlapping spatial scales: (i) the regional scale, i.e. the northward ITCZ jump from Guinean to Soudano-Sahelian latitudes, (ii) the meso-scale related with the first occurrence of the main rainfall-generating phenomenon, that is squall line and (iii) the local-scale of the first rainfall recorded at the rain-gauge. Local and meso-scale onsets show a weak degree of instantaneous and interannual spatial coherence, meaning that onset is almost never simultaneously recorded across a regional network but also that its interannual variability is not in-phase across such areas. In consequence, the seasonal predictability of the monsoon onset coming from planetary and zonal sea surface temperature variations is, at best, weak.*

**Key-words:** *Onset of the rainy season ; Sahel ; Spatial coherence ; Predictability.*

## **Introduction**

La saison des pluies de mousson au Sahel (approximativement de 12°N à 17°N) se déroule principalement entre juin et septembre [Lamb 1978 ; Nicholson 1979, 1980]. Elle est gouvernée par la migration saisonnière inter-hémisphérique de la zone de convergence inter-tropicale (ZCIT). Les pluies sont fortement concentrées dans le temps. La date de démarrage de la saison des pluies apparaît d'une importance cruciale pour l'agriculture et l'organisation des sociétés. En effet, la planification des tâches agricoles, par exemple le semis, est largement tributaire du démarrage de la saison des pluies [Sivakumar 1992]. Dans ce contexte une prévision à moyen terme (~ 1 à 2 mois à l'avance) du démarrage de la saison des pluies serait d'une importance capitale dans l'organisation des exploitations agricoles, notamment en termes de préparation des champs, de mobilisation de semences et de la main d'œuvre. Une telle prévision réduirait le risque de semer à des périodes défavorables [Omosho & al. 2000]. Les travaux réalisés au cours des 30 dernières années ont identifié 3 définitions du démarrage de la saison des pluies fondées sur l'approche spatiale du phénomène. Ainsi, le démarrage de la saison des pluies peut être appréhendé aux échelles (i) régionale, c'est-à-dire celle du « saut » de mousson vers le nord sur l'ensemble de l'Afrique sahélienne, soudanienne et guinéenne [Sultan & Janicot 2000 ; Sultan & al. 2003], (ii) méso (entre 10 et 1000 km), c'est-à-dire celle de la première occurrence du principal système pluviogène (« les lignes de grains ») engendrant des précipitations au-dessus de la bande sahélienne et (iii) locale (< 10 km), c'est-à-dire celle des premières pluies significatives relevées ponctuellement dans un pluviomètre.

La prévisibilité saisonnière au moins un mois à l'avance d'un phénomène climatique quelconque implique un certain degré de synchronisation spatiale. Au Sahel, la variabilité interannuelle des cumuls de pluies saisonniers organisés en modes de variations régionaux ou zonaux est potentiellement prévisible à partir des variations lentes des températures de surface océanique (TSO) d'échelle globale associé à l'El Niño Southern Oscillation (ENSO), [Janicot & al. 1996, 2001]. En raison

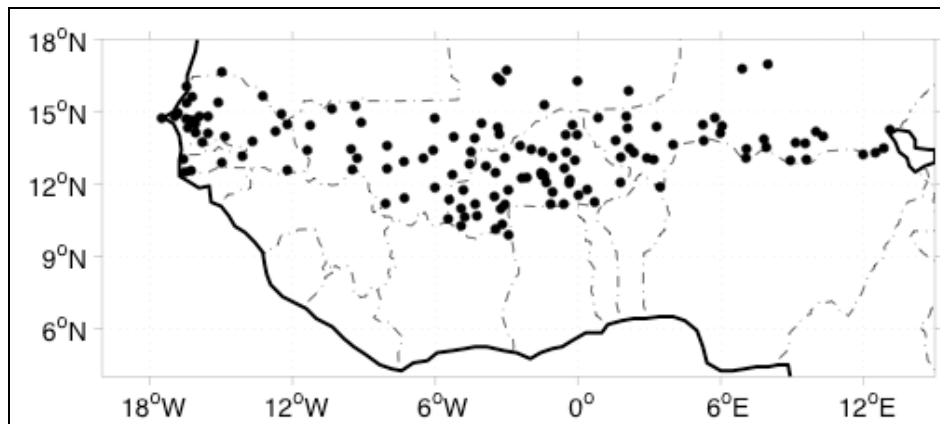
de l'importante inertie du contenu thermique océanique, ces dernières impriment des anomalies de polarité uniforme à des échelles régionale dans la variabilité des cumuls de pluies au Sahel, favorisant leur prévisibilité. Moron & al. [2006, 2007] ont montré que la cohérence spatiale des anomalies interannuelles d'une variable climatique quelconque est associée à sa prévisibilité potentielle saisonnière. En effet, un signal interannuel peu cohérent a peu de chance d'être prévisible car cela indique que deux stations proches ne sont pas synchronisées systématiquement dans un sens ou dans l'autre. A partir de cette hypothèse, l'objectif de l'étude est triple, il s'agira :

- de quantifier la cohérence du démarrage de la saison des pluies à différentes échelles spatiales;
- de montrer le lien entre ces différentes échelles spatiales;
- d'estimer le niveau de prévisibilité potentielle en lien avec les forçages planétaires et régionaux de TSO.

Ces questions seront analysées à partir d'un réseau de 136 stations réparties sur la partie occidentale et centrale du Sahel sur la période 1950-2000 (du Sénégal au Niger en incluant le Mali et le Burkina-Faso). Les données et la méthodologie sont décrites en section 1. La section 2 présente les définitions du démarrage de la saison des pluies à différentes échelles. La section 3 présente les principaux résultats en termes (i) de cohérence spatiale de la date de démarrage de la saison des pluies, (ii) de relations inter-échelles et (iii) de performance de la prévision saisonnière à partir des TSO.

## 1. Données et méthodes

### 1.1. Les précipitations quotidiennes



**Figure 1** – Localisation des 136 pluviomètres issus de la base FRIEND-AOC (Mali, Burkina-Faso, Niger) et de la DMN du Sénégal couvrant la période 1950-2000.

Les enregistrements pluviométriques journaliers de 136 stations (1950-2000) proviennent de la base de données FRIEND-AOC (Flow Regimes from International Experimental and Network Data - Afrique de l'Ouest et Centrale ; (<http://armspark.msem.univ-montp2.fr/FRIENAOC>) et des directions météorologiques nationales (Fig. 1). Les enregistrements journaliers comportent moins de 2% de valeurs lacunaires.

### 1.2. Les Températures de Surface Océanique

Le fichier de température de surface océanique, HaDISST (Hadley centre's sea Ice and Sea Surface Temperature, Rayner & al. 2003], retenu pour l'étude de prévisibilité est une mise à jour du fichier GISST version 3.0 (Global sea Ice and Sea Surface Temperature) élaborée par Rayner & al. (1996) au service météorologique britannique (UKMO). Les TSO disponibles depuis 1871, sont fournies sur une grille globale régulière à une résolution spatiale de 1° de longitude et 1° de latitude selon un pas de temps mensuel. Les données de TSO, réactualisées mensuellement, sont disponibles en accès libre sur le site web du Met Office à l'adresse suivante: <http://hadobs.metoffice.com/hadisst/data/download.html>.

### 1.3. Estimation de la cohérence spatiale

La cohérence spatiale peut être estimée par de nombreux scores statistiques, dont deux sont utilisés ici : le nombre de degrés de liberté spatio-temporel (DOF) [Moron 1994 ; Fraedrich & al. 1995 ; Bretherton & al. 1999 ; Moron & al. 2006, 2007] et la variance temporelle de la moyenne des anomalies standardisées (var[SAI]) [Katz & Glantz 1986].

- *Le nombre de degrés de liberté spatial (DOF)*

Le DOF est une mesure empirique et relative de l'interdépendance entre les  $M$  stations d'un même réseau ou point de grille et considère l'estimation du nombre de variables indépendantes ou degrés de liberté dans le réseau. Le DOF est calculé à partir de la distribution des valeurs propres de la matrice de corrélation. La formulation mathématique du DOF est la suivante :

$$DOF = \frac{M}{\sum_{i=1}^M e_i^2}$$

où  $M$  représente le nombre de stations ou points de grille et  $e_i$  indique les valeurs propres de la matrice de corrélation. Les valeurs de DOF varient entre 1 et le rang de la matrice de corrélation (ici 50 correspondant au nombre d'années -1 à cause de la standardisation). Dans le cas restrictif où  $e_i = 1$  pour l'ensemble des stations alors  $DOF = M$  (ou  $DOF = N - 1$  si  $N < M$ ), ce qui signifie que chaque station apporte une information indépendante, le signal commun entre les stations est alors

nul. D'autre part, si une seule valeur propre prend en compte la totalité de la variance,  $\text{DOF} = 1$  ce qui signifie que chaque station contient la même information à une constante près, et que le bruit est proche de 0. En d'autre terme, le  $\text{DOF}$  correspond à une quantité théorique fondée sur le nombre de structures spatiales orthogonales nécessaires pour représenter un champ quelconque.

- *La variance temporelle de la moyenne des anomalies standardisées ( $\text{var}[\text{SAI}]$ )*

La variance temporelle de la moyenne des anomalies standardisées ( $\text{var}[\text{SAI}]$ ) est le second score d'estimation de cohérence spatiale retenu dans notre étude. Ce score est fondé sur l'utilisation des chroniques temporelles standardisées du démarrage de la saison des pluies calculée individuellement pour chaque station comme suit :

$$x'_{ij} = \frac{(x_{ij} - \bar{x}_j)}{\sigma_j} \quad \text{éq. 2}$$

où  $\bar{x}_j$  correspond à la moyenne temporelle à long terme et  $\sigma_j$  représente l'écart-type interannuel pour la station  $j$ . L'indice d'anomalies standardisées (SAI) se définit comme la moyenne des chroniques temporelles normalisées des  $M$  stations chaque année [Katz & Glantz 1986] :

$$\text{SAI}_i = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M x'_{ij} \quad \text{éq. 3}$$

Le SAI est une estimation empirique du signal commun, en phase, au sein d'un réseau de station. Le bruit est défini ici comme les écarts par rapport à la moyenne spatiale. Par ailleurs, la variance interannuelle de l'indice SAI ( $\text{var}[\text{SAI}]$ ) mesure la cohérence spatiale d'un champ puisqu'elle dépend de la corrélation interstation ( $\rho_{ij}$ ).

$$\text{var}(\text{SAI}) = \frac{1}{M} + \left(1 - \frac{1}{M}\right) \bar{\rho} \quad \text{éq. 4}$$

où  $\bar{\rho}$  est la moyenne spatiale des corrélations inter-stations. Si toutes les corrélations sont égales à 0 alors  $\bar{\rho} = 0$  et  $\text{var}[\text{SAI}] = 1/M$  et si toutes les paires de stations sont parfaitement corrélées alors  $\bar{\rho} = 1$  et  $\text{var}[\text{SAI}] = 1$ . Notons que  $\text{DOF}$  et  $\text{var}[\text{SAI}]$  sont étroitement reliés puisqu'ils dépendent de la corrélation entre les



stations. Une forte cohérence spatiale correspond à un DOF et une var[SAI] tendant vers 1, alors qu'un DOF tendant vers le rang de la matrice et une var(SAI) tendant vers zéro indiquent une faible cohérence spatiale.

## 2. Définitions multi-échelles du démarrage de la saison des pluies

Le démarrage de la saison des pluies (DSP) a été appréhendé selon 3 échelles spatiales : (i) l'échelle régionale [Sultan & Janicot 2000], (ii) la méso-échelle [Balme & al. 2005] et (iii) l'échelle locale ou agronomique [Marteau et al. 2009].

Sultan & Janicot (2000) proposent une définition d'échelle régionale de la mise en place de la mousson fondée sur le déplacement méridien brutale de la ZCIT vers le nord. A partir de champs moyens pluviométriques et de rayonnements infra-rouge sortant intégrés entre 10°W et 10°E, un déplacement méridien saccadé de la zone de précipitations maximales correspondant à la ZCIT est observé avec une alternance de phases stationnaires et de déplacements rapides. Une analyse en composantes principales permet d'identifier deux latitudes moyennes d'équilibre de la ZCIT, à 5°N et 10°N, constituant les points de départ et d'arrivée de sa principale migration. La date de DSP au-dessus des latitudes soudano-sahéliennes est détectée au moment où l'on observe simultanément une forte baisse de la pluviométrie vers 5°N et sa hausse rapide vers 10°N. Cette migration abrupte de la ZCIT vers le nord est nommée « saut de mousson ». Notons que cette date d'échelle régionale n'est disponible qu'à partir de 1968.

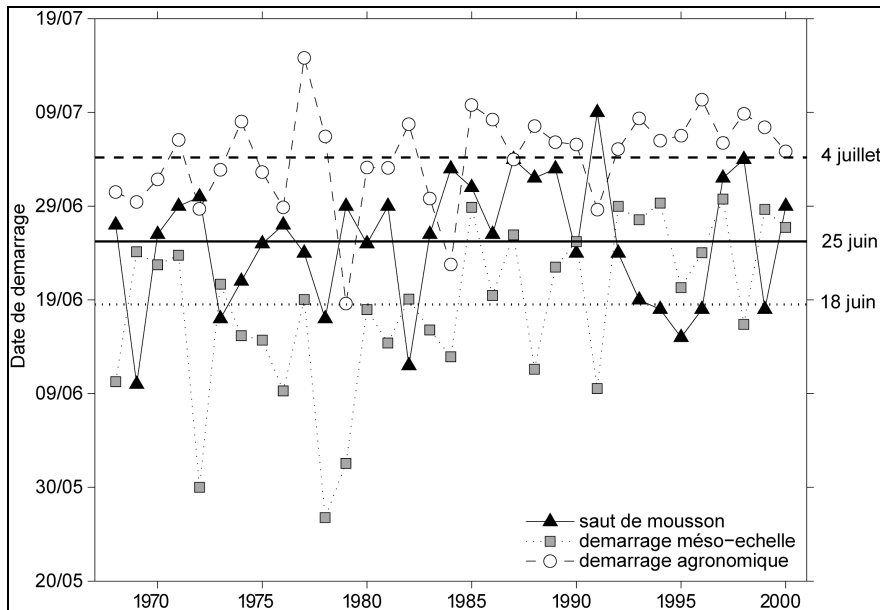
Balme & al. (2005), à partir d'un critère « climatique », définissent le début et la fin de la saison des pluies à partir du premier et dernier événement pluvieux associé avec une convection organisée, c'est-à-dire dépassant la taille d'un cumulonimbus de base (< 10 km). Les pluies sahéliennes sont principalement associées à des systèmes convectifs de méso-échelle, les « lignes de grains » qui ont une taille de l'ordre de 300 à 500 km d'extension horizontale. Elles sont constituées d'un arc antérieur de cumulo-nimbus suivi d'un secteur stratiforme plus calme et se déplacent en moyenne d'est en ouest. Le DSP s'appuie sur un critère fréquentiel et correspond à la date où 80% des stations dans un rayon de 300km enregistrent une pluie significative (> 1 mm) sur 2 jours consécutifs. Cette définition doit donc permettre de repérer empiriquement les pluies associées à la première « ligne de grains ».

Marteau & al. (2009), combinant les critères établis par Sivakumar (1988) et un seuil de satisfaction des besoins en eau pour la culture utilisé par Omotosho (2000) définissent le DSP, à partir du 1<sup>er</sup> Mai, comme le premier jour humide (> 1 mm) d'une séquence d'un ou 2 jours pluvieux consécutifs enregistrant au moins 20 mm sans être suivi d'une séquence sèche de plus de 7 jours consécutifs recevant moins de 5 mm dans les 20 jours qui suivent. Dans ce cas l'accent est donc mis sur l'eau disponible à l'échelle locale.

### 3. Résultats

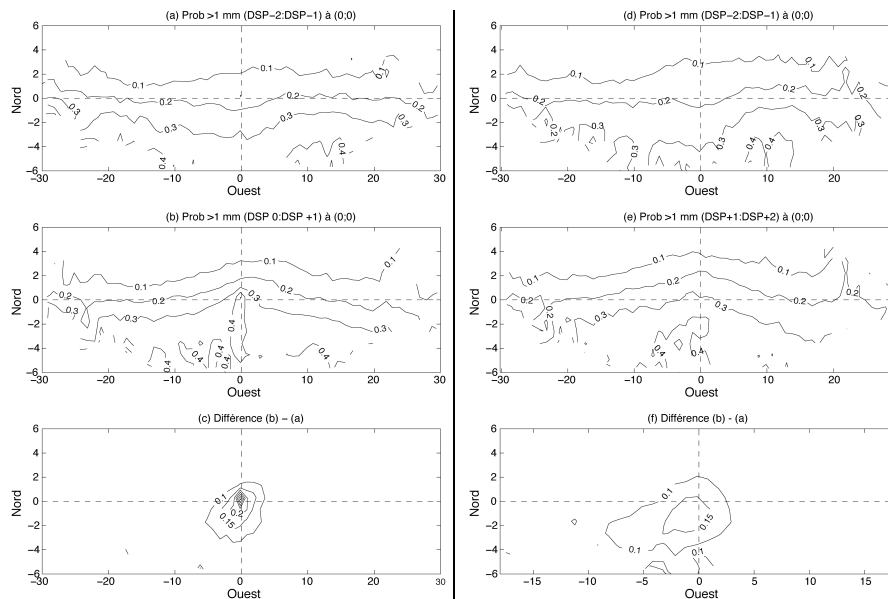
#### 3.1. Cohérence spatiale du démarrage de la saison des pluies

La Figure 2 présente l'évolution des dates de démarrage de la saison des pluies obtenues selon les trois critères sur la période commune 1968-2000. On constate de fortes disparités. Le démarrage d'échelle régionale (moyenne = 25 juin) apparaît enveloppé entre le démarrage méso-échelle plus précoce (moyenne des 136 stations = 18 juin) que le démarrage local (moyenne des 136 stations = 4 juillet), plus tardif.



**Figure 2** – Dates moyennes (1968-2000) du démarrage de la saison des pluies selon les 3 échelles spatiales.

La cohérence spatiale du DSP a été abordée selon deux niveaux d'échelle: le premier se fonde sur le caractère instantané du DSP (i.e. cohérence spatiale de « première espèce »), autrement dit sa synchronisation spatio-temporelle instantanée, et le second sur la synchronisation des anomalies interannuelles du DSP (i.e. cohérence spatiale de « seconde espèce »). Notons que seule la cohérence spatiale des définitions « méso-échelle » et « locale » peut être quantifiée selon la méthodologie proposée car le saut de mousson est défini de façon unique pour l'ensemble de l'Afrique sahélienne et guinéenne.



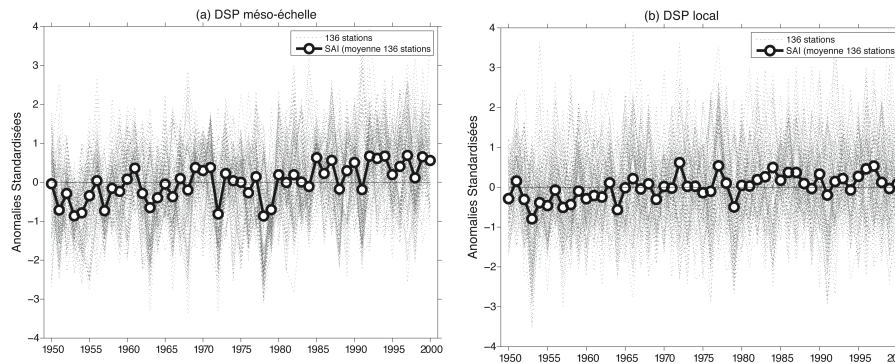
**Figure 3** – Fréquence d’occurrence moyenne (1950-2000) des pluies journalières  $> 1$  mm cumulées sur (a, d) 2 jours avant et (b, e) après le démarrage méso-échelle (panel de droite) et local (panel de gauche) de la saison des pluies et (c, f) différence (b) – (a) et (e) – (d). Tous les champs ont été reportés selon une position relative considérant chaque station comme station de référence (aux coordonnées 0, 0).

- **Cohérence spatiale de « première espèce »**

La Figure 3 présente la structure spatiale relative du champ de pluie autour du DSP d’échelle locale et de méso-échelle. Pour chaque station et chaque année, la fréquence d’occurrence des jours pluvieux  $> 1$  mm sur 2 jours consécutifs avant et après le DSP d’échelle locale et de méso-échelle a été calculée sur l’ensemble du champ de pluies relocalisé par rapport à la station de référence (coordonnées (0,0) sur la Figure 3). Les Figures 3b, c, e, f illustrent la cohérence spatiale de « première espèce » qui indique la fréquence d’occurrence d’un jour pluvieux autour d’une station lorsque le démarrage de la saison des pluies se produit à la station de référence. Les Figures 3a et 3d représentent la probabilité des pluies avant le DSP. Elles sont caractérisées par un gradient S-N similaire à la climatologie moyenne de ce domaine. L’occurrence du démarrage de la saison des pluies selon les définitions locale et méso-échelle modifie légèrement cette géographie (Fig.3b et 3e) surtout à travers l’augmentation de la fréquence d’occurrence selon une forme

étirée W-SW/E-NE autour de la station de référence par rapport à 2 jours avant le DSP. Il n'y a ni une augmentation zonale des pluies, conforme à un hypothétique saut méridien d'ensemble de la ceinture pluvieuse, ni une propagation d'une anomalie positive depuis l'est conforme avec une ligne de grains. Par conséquent, la Figure 3 suggère que le démarrage de la saison des pluies semble être difficilement relié systématiquement à des signaux d'échelle régionale et/ou méso-échelle. Ainsi, on peut supposer que le démarrage local peut être relié indifféremment à des structures pluvieuses de petite ou de relativement grande taille, isolées ou propagatives.

• **Cohérence spatiale de « seconde espèce »**

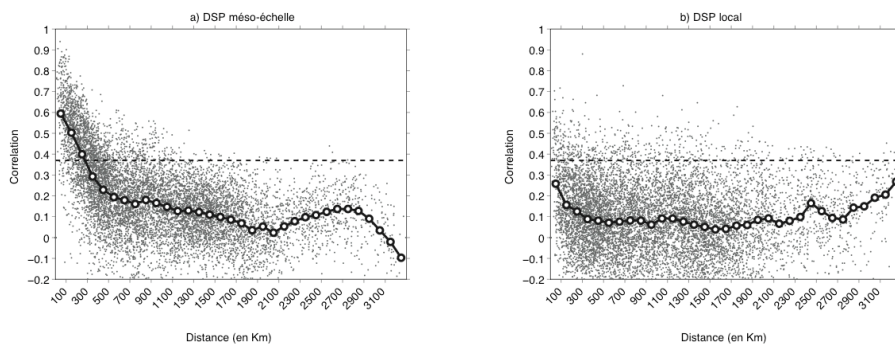


**Figure 4** – Anomalies standardisées des dates de démarrage de la saison des pluies (a) de méso-échelle et (b) d'échelle locale pour chaque station du réseau de 136 stations (pointillés) et de l'indice régional (SAI) correspondant à la moyenne des 136 séries standardisées (cercle noir).

La Figure 4 montre la variabilité interannuelle des anomalies standardisées des dates de démarrage de la saison des pluies d'échelle locale et de méso-échelle. L'information climatique commune en phase entre les DSP estimés selon la méthode locale et méso-échelle prend en compte une fraction modérée (faible) de la variance totale à l'échelle d'une station pour le démarrage méso-échelle (local) de la saison des pluies ( $\text{var}[\text{SAI}]_{\text{Més0-échelle}} = 0.20$  ;  $\text{var}[\text{SAI}]_{\text{Local}} = 0.09$ ). Cela indique un signal inter-station bruité où chaque station véhicule une information relativement différente des autres. De plus, les valeurs de DOF du DSP méso-échelle et d'échelle locale, 12.1 et 22.3 respectivement, confirment une faible cohérence spatiale de « seconde espèce ». Bien entendu, la définition méso-échelle lisse par définition l'information dans l'espace.

**3.2. Cohérence spatiale et échelle spatiale des processus précipitants**

Dans le but de mieux comprendre l'effet de l'intégration spatiale dans la croissance ou la décroissance de la cohérence spatiale, les échelles spatiales de la variation interannuelle du DSP sont analysées. Les Figures 5a et 5b présentent la fonction de distribution des corrélations temporelles entre tous les couples de stations en considérant le DSP défini aux échelles locales et méso. La distribution présente systématiquement une décroissance exponentielle négative des corrélations avec l'augmentation de la distance. Toutefois, la décroissance des corrélations est nettement plus marquée pour le DSP méso-échelle en raison de corrélations plus élevées ( $> 0.6$ ) pour des distances inférieures à 300 km. Ainsi, la distance de décorrélation du DSP méso-échelle est de l'ordre de 300 km. Ces corrélations élevées sont au moins en partie le fruit de la paramétrisation de la définition méso-échelle puisqu'elle implique une certaine cohérence de « première espèce » dans un rayon de 300 km. A l'inverse, à l'échelle locale, les valeurs moyennes de corrélations sont très faibles et non significatives, même sur de faibles distances ( $< 100$  km).



**Figure 5** – Corrélation temporelle (1950-2000) en fonction de la distance en km du démarrage (a) local et (b) méso-échelle de la saison des pluies. Les corrélations sont calculées pour chaque paire de stations, représentées par un point gris. Les cercles noirs donnent la corrélation moyenne par tranche de distance de 100 km, 0-99 km, 100-199 km, ... La ligne pointillée indique le seuil de significativité des corrélations  $1/e = 0.37$ .

	Saut de mousson	Balme	Marteau
Saut de mousson	1		
Balme	- 0.16	1	
Marteau	+ 0.10	- 0.12	1

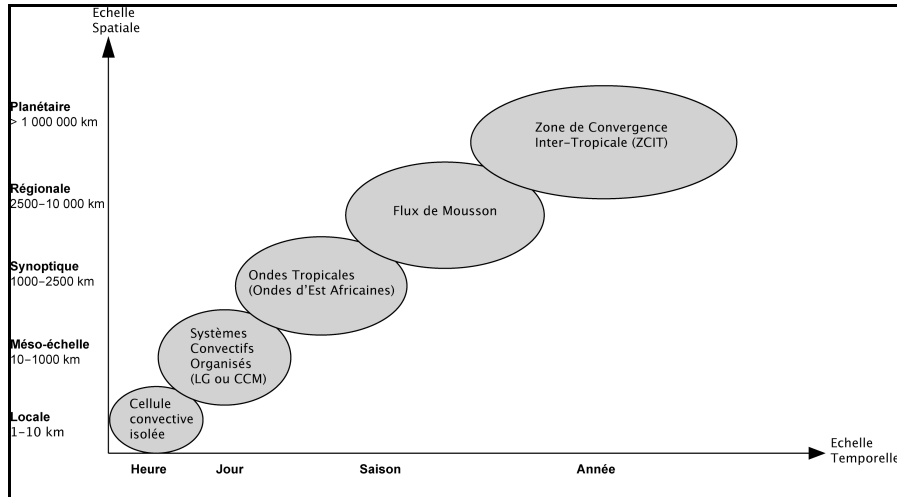
**Tableau 1** – Corrélation temporelle (1968-2000) entre la moyenne spatiale des anomalies standardisées (SAI) des DSP estimés selon l'échelle locale et la méso-échelle et le « saut » de la mousson d'échelle régionale.

Le tableau 1 quantifie la relation entre la moyenne spatiale du démarrage défini selon les 2 approches, locale et méso-échelle, ainsi qu'avec le « saut » de mousson

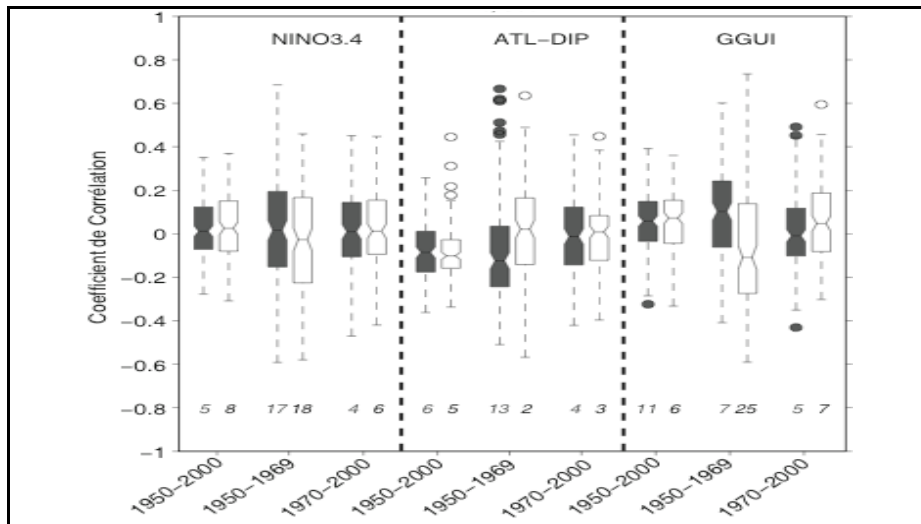
d'échelle régionale. Les corrélations sont non significatives selon un test de Bravais-Pearson au seuil de confiance de 95%. Ce résultat suggère que le signal du « saut de mousson » est localement faiblement perceptible et n'enclenche pas forcément le démarrage des pluies. En d'autres termes, le « saut » de mousson et le démarrage des pluies sont synchronisés par le cycle annuel sans aucun systématisme à l'échelle interannuelle, c'est-à-dire qu'un saut de mousson tardif (précoce) ne se traduira pas nécessairement par un retard (une précocité) du DSP à l'échelle locale. En effet, d'un point de vue aérologique, le système de mousson peut être installé sans obligatoirement induire des précipitations. Cela s'explique par la multiplicité des échelles spatiales en jeu, de l'orage convectif local aux lignes de grains en passant par d'autres structures méso-échelles plus ou moins organisées et plus ou moins stationnaires (Fig. 6).

### **3.3. Téléconnexions entre le DSP et les TSO**

Les téléconnexions entre le DSP et 4 indices de températures de surface océanique (TSO), capturant des secteurs océaniques reconnus pour leur influence sur la mousson ouest africaine ont été considérées (Nicholson 1986 ; Ropelewki and Halpert 1987 ; Rowell et al. 1995). Ces indices se situent sur le Pacifique équatorial (NINO3.4 : 5°S-5°N – 170°-120°W), l'Atlantique tropical nord et sud (NATL : 5°-20°N – 60°-30°W ; SATL : 20°S-0° – 30°W-10°E) et le Golfe de Guinée (GGUI : 5°S-5°N – 10°E-10°W). La Figure 7 présente la distribution des coefficients de corrélations entre les DSP d'échelles locale et méso et chaque indice de TSO en mai-juin-juillet, c'est-à-dire où le DSP se produit localement, pour les périodes 1950-2000, 1950-1969 (période anormalement humide) et 1970-2000 (période anormalement sèche). On constate qu'au moins 50% des coefficients de corrélation sont compris entre -0.2 et 0.2 quelle que soit la période étudiée et la définition utilisée pour définir le DSP. Par conséquent, les téléconnexions entre les TSO liées au phénomène ENSO, au dipôle Atlantique ou au Golfe de Guinée d'une part et le démarrage de la saison des pluies d'échelles locale et de méso d'autre part sont faibles. Ce résultat suggère que le DSP (méso-échelle et local) est fortement indépendant des forçages océaniques d'échelle régionale, zonale et planétaire. Ainsi, sa prévisibilité potentielle à l'échelle saisonnière est faible.



**Figure 6** – Schématisation de l'échelle spatiale et temporelle des principaux systèmes précipitants en Afrique intertropicale.



**Figure 7** – Boîte à moustache des coefficients de corrélation entre les dates de démarrage local de la saison des pluies (gris) et les indices de TSO Pacifique (Nino 3.4), Atlantique (Dipôle Atlantique – ATL-DIP –) et du Golfe de Guinée (GGUI), idem pour le démarrage méso-échelle de la saison des pluies (blanc) pour les périodes 1950-2000, 1950-1969 et 1970-2000. Les valeurs en italique indiquent le nombre de stations dont les chroniques temporelles de démarrage de la saison des pluies sont corrélées significativement aux TSO selon un test de Bravais-Pearson au seuil de confiance bilatéral de 95%.

## Conclusion

La cohérence spatiale et la prévisibilité potentielle de la date de démarrage de la saison des pluies (DSP) de la mousson ouest-africaine au-dessus de la bande soudano-sahélienne ont été analysées à partir d'un réseau de 136 stations (Sénégal, Mali, Burkina-Faso, Niger) de 1950 à 2000.

Au Sahel, malgré l'existence d'un signal bien identifié à l'échelle régionale, c'est-à-dire le « saut de la mousson », la cohérence spatiale du démarrage de la saison des pluies à l'échelle locale est très faible. La cohérence spatiale de « première espèce » montre une faible augmentation de l'occurrence des pluies post-DSP par rapport à celles pré-DSP, mais il n'y a pas de mouvement systématique vers le nord et/ou vers l'ouest qui pourrait indiquer une influence systématique du saut méridien de la ZCIT et/ou de lignes de grains se déplaçant vers l'ouest, sur le DSP (mésos-échelle ou local). La cohérence spatiale de « seconde espèce », c'est-à-dire la synchronisation des anomalies interannuelles, est également faible. L'intégration spatiale des pluies induites par la paramétrisation de la définition du DSP méso-échelle, c'est-à-dire sans un rayon de 300 km, augmente faiblement la cohérence spatiale de « première » et « seconde espèce » mais n'améliore pas la prévisibilité du démarrage de la saison des pluies à l'échelle interannuelle. De même, le signal d'échelle régionale du « saut » de mousson n'est pas perceptible à l'échelle des stations.

Une partie de la faible cohérence spatiale du DSP peut être attribuée à sa définition même, notamment pour l'échelle locale puisqu'on considère une durée très brève, contrairement par exemple à un cumul saisonnier où la longue période d'intégration filtre une partie plus ou moins importante du bruit spatial. On peut également considérer que le DSP ne correspond pas non plus à deux jours tirés au hasard durant la saison des pluies. En effet, le DSP, au moins en théorie, indique une phase de la saison. Cette phase temporelle marque ainsi la transition entre la saison sèche et la saison des pluies estivales. Par ailleurs, des définitions analogues à l'échelle locale considérée ici montrent que sur d'autres régions tropicales, en Indonésie par exemple, la phase temporelle du DSP concentre l'essentiel du signal climatique covariant à l'échelle régionale et saisonnière [Moron et al. 2009]. Enfin, la faible prévisibilité du démarrage de la saison des pluies aux 3 niveaux spatiaux considérés (local, méso-échelle et régional) renforce l'idée que cette imprévisibilité n'est pas un simple artefact de son échelle de définition ainsi que des paramètres utilisés pour le déterminer. Ce résultat n'est pas trivial compte tenu de l'exemple indonésien montrant que la faible cohérence spatiale ne peut être imputée à ce niveau d'intégration temporelle.

## Références bibliographiques

- BALME, M., GALLE, S. & LEBEL, T., 2005 – « Démarrage de la saison des pluies au Sahel : variabilité aux échelles hydrologique et agronomique, analysée à partir des données EPSAT-Niger. », *Sécheresse*, vol. 16, n° 1, pp. 15-22.



- BRETHERTON, C., WIDMANN, M., DYMNIKOV, V., WALLACE, J. & BLADÉ, I., 1999 - « The effective number of degrees of freedom of a time varying field. » *Journal of Climate*, vol. 12, n° 7, pp. 1990-2009.
- FRAEDRICH, K., ZIEHMANN, C. & SIELMANN, F., 1995 - « Estimates of spatial degrees of freedom. » *Journal of Climate*, vol. 8, n° 2, pp. 361-369.
- INES, A. & HANSEN, J., 2006 - « Bias correction of daily GCM outputs for crop simulation studies », *Agriculture and Forest Meteorology*, vol. 138, n° 1-4, pp. 44-53.
- KATZ, R. & GLANTZ, M., 1986 - « Anatomy of a rainfall index. », *Monthly Weather Review*, vol. 114, n° 4, pp. 764-771.
- JANICOT, S., MORON, V. & FONTAINE, B., 1996 - « Sahel drought and ENSO dynamics. », *Geophysical Research Letters*, vol. 23, n° 5, pp. 515-518.
- JANICOT, S., TRZASKA, S. & POCCARD, I., 2001 - « Summer Sahel-ENSO teleconnection and decadal time scale SST variations. » *Climate Dynamics*, vol. 18, n° 3-4, pp. 303-320.
- LAMB, P., 1978 - « Case studies of tropical Atlantic surface circulation patterns associated with subsaharan weather anomalies: 1967 and 1968. », *Monthly Weather Review*, vol. 106, n° 4, pp. 1052-1055.
- MARTEAU, R., MORON, V. & PHILIPPON, N., 2009 - « Spatial coherence of monsoon onset over Western and Central Sahel (1950-2000) », *Journal of Climate*, vol. 22, n° 5, pp. 1313-1324.
- MORON, V., 1994 - « Guinean and Sahelian rainfall anomaly indices at annual and monthly scales (1933-1990). », *International Journal of Climatology*, vol. 14, n° 3, 325-341.
- MORON, V., ROBERTSON, A. & WARD, M., 2006 - « Seasonal predictability and spatial coherence of rainfall characteristics in the tropical setting of Senegal », *Monthly Weather Review*, vol. 134, n° 11, pp. 3248-3262.
- MORON, V., ROBERTSON, A., WARD, M. & CAMBERLIN, P., 2007 - « Spatial coherence of tropical rainfall at the regional scale. », *Journal of Climate*, vol. 20, n° 21, pp. 5244-5263.
- MORON, V., ROBERTSON, A. & BOER, R., 2009 - « Spatial coherence and seasonal predictability of monsoon onset over Indonesia. » *Journal of Climate*, vol. 22, n° 3, pp. 840-850.
- NICHOLSON, S., 1979 - « Revised rainfall series for the West-African subtropics », *Monthly Weather Review*, vol. 107, n° 5, pp. 620-623.
- NICHOLSON, S., 1980 - « The nature of rainfall fluctuations in sub-tropical Africa », *Monthly Weather Review*, vol. 108, n° 4, pp. 473-487.
- NICHOLSON, S., 1986 - « The quasi-periodic behavior of rainfall variability in Africa and its relationship to the Southern Oscillation. », *Meteorology and Atmospheric Physics*, vol. 34, n° 3-4, pp. 311-348.
- OMOTOSHO, J., BALOGUN, A. & OGUNJOBI, K., 2000 - « Predicting monthly and seasonal rainfall, onset and cessation of the rainy season in West Africa using only surface data. », *International Journal of Climatology*, vol. 20, n° 8, pp. 865-880.
- RAYNER, N., HORTON, E., PARKER, D. FOLLAND, C. & HACKETT, R., 1996 - *Version 2.2 of the global sea-ice and sea-surface temperature data set, 1903-1994*, CRTN 74, technical note, 21 p.
- ROPELEWSKI, S. & HALPERT, M., 1987 - « Global and regional scale precipitations associated with El Niño/Southern Oscillation. », *Monthly Weather Review*, vol. 115, n° 8, pp. 985-996.
- ROWELL, D., FOLLAND, C., MASKELL, K. & WARD, M., 1995 - « Variability of summer rainfall over tropical North Africa (1906-1992) : Observations and modelling. » *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 121, n° 523, pp. 669-674.
- SCHMIDL, J., FREI, C. & VIDALE, P. 2006 - « Downscaling from GCM precipitation : a benchmark for dynamical and statistical downscaling methods. », *International Journal of Climatology*, vol. 26, n° 5, pp. 679-689.
- SIVAKUMAR, M., 1992 - « Empirical analysis of dry spells for agricultural applications in West Africa ». *Journal of Climate*, vol. 5, n° 5, pp. 532-539.
- SULTAN, B. & JANICOT, S. - « Abrupt shift of the ITCZ over West Africa and intra-seasonal variability », *Geophysical Research Letters*, vol. 27, n° 20, pp.3353-3356.
- SULTAN, B., JANICOT, S. & DIEDHIOU, A., 2003 - « The West African monsoon dynamics. Part I : Documentation of intraseasonal variability », *Journal of Climate*, vol. 16, n° 21, pp. 3389-3406.
- WIDMANN, M., BRETHERTON, C. & SALATHÉ, P., 2003 - « Statistical precipitation downscaling over the Northwestern United States using numerically simulated precipitation as a predictor », *Journal of Climate*, vol. 16, n° 5, pp. 799-816.