

Utilisation optimale de l'information pluviométrique des MCGA aux échelles hydrologiques au Sahel

ABDOU ALI¹, ABOU AMANI¹, THIERRY LEBEL² & SIDIBÉ IBRAHIMA¹

¹ Centre Régional Agrhymet, BP 1101, Niamey, Niger
a.ali@agrhyment.ne

² Institut de Recherche pour le développement (IRD), BP 11416, Niamey, Niger

Résumé Une méthodologie simple, permettant d'élaborer des scénarios de pluie aux échelles hydrologiques au Sahel, tout en respectant la tendance pluviométrique des décennies futures, que pourrait fournir un MCGA, est proposée. Cette méthodologie est basée sur la caractéristique fondamentale de la climatologie des pluies sahéliennes, à savoir le nombre d'événements comme étant le moteur principal de la variabilité interannuelle et intra-saisonnière. La mise en œuvre d'une Chaîne de Markov d'ordre 1 a permis d'évaluer le modèle et de montrer sa performance à bien restituer la variabilité interannuelle de la pluie, le signal intra-saisonnier, les séquences sèches séparant deux jours pluvieux.

Mots clés Sahel; pluies des MCGA; scénarios de pluie; échelle hydrologique

Optimal use of GCM rainfall information at the hydrological scale in the Sahel

Abstract A simple methodology that enables the production of rainfall scenarios at the hydrological scale in the Sahel, while taking into account the coming decades' rainfall trends as provided by a Global Circulation Model (GCM), is proposed. This methodology is based on the fundamental characteristic of the Sahelian rainfall climatology, namely the number of events as the major factor in the inter-annual and intra-seasonal variability. The application of a first order Markov Chain made it possible to assess the model and to show its performance in terms of simulating well the interannual and intra-seasonal variability of Sahelian rainfields with respect to the dry spells between two rainy days.

Key words Sahel; GCM rainfall outputs; rainfall scenarios; hydrological scale

INTRODUCTION

Les modèles de circulation générale atmosphérique (MCGA) en mode couplé Atmosphère–Océan sont, actuellement, les seuls outils disponibles pour la prédiction du climat futur. Cette prédiction est faite à de larges résolutions spatiales et temporelles sur la base d'un scénario de production de gaz à effet de serre. La pluie est le paramètre atmosphérique le plus déterminant pour étudier l'impact de la variabilité et du changement climatique sur l'écosystème et les activités socio-économiques au Sahel. La question classique qui vient en tête quand on considère les sorties pluviométriques des MCGA pour des études hydrologiques est le problème d'échelle. La résolution spatiale des MCGA, de l'ordre de $3^\circ \times 3^\circ$, est trop grossière par rapport aux échelles utilisées en hydrologie, de l'ordre $0.1^\circ \times 0.1^\circ$. La problématique de l'utilisation des pluies des MCGA en hydrologie, ne porte pas, cependant, sur la seule question de l'échelle spatiale ou temporelle. Un aspect important de cette problématique concerne l'erreur associée aux pluies des MCGA. Nous proposons, dans la présente étude, une méthodologie simple, qui permet de produire des scénarios de pluie aux échelles hydrologiques. Cette méthodologie, utilise de façon optimale la modélisation stochastique à l'échelle de l'événement pluvieux et l'information sur la tendance future de la pluie, susceptible d'être fournie par les MCGA.

PLUIES DES MCGA

Nous rappelons dans cette section quelques caractéristiques des pluies des MCGA couplés. Les MCGA actuels ne restituent pas la sécheresse observée au Sahel. Quand on compare le cycle saisonnier moyen entre pluie observée et pluie simulée par un MCGA, on observe un important biais. Les modèles surestiment fortement la pluie des marges de la saison, mais sous-estiment celle d'août et de septembre. Ce biais dans le cycle saisonnier peut conduire, même en cas de désagrégation, à une très mauvaise évaluation de l'impact du climat sur les ressources en eau. De même quand on compare les distributions statistiques, on observe que la fréquence des pluies journalières nulles des MCGA est plus faible que celle de l'observation. Les pluies comprises entre 1.5 et 8.5 mm sont, cependant, plus fréquentes au niveau des modèles (Hamatan, 2006; Ardoin-Bardin, 2004).

NOTRE PROPOSITION POUR ELABORER DES SCENARIOS DE PLUIE AUX ECHELLES HYDROLOGIQUES AU SAHEL

Nous avons rappelé à la section qui précède que les sorties pluviométriques des MCGA couplés ne reproduisent ni la variabilité interannuelle de la pluie au Sahel, ni le signal saisonnier, ni la distribution statistique des pluies journalières. Les méthodes de désagrégation utilisant les variables de la circulation à grande échelle (comme le champ de vent, de pression et de température) fournies par un MCGA ne permettent pas d'obtenir les caractéristiques haute résolution de la pluie au Sahel. La méthode que nous proposons consiste à exploiter le fait qu'au Sahel le nombre d'événements est le principal moteur de la variabilité intra-saisonnière et interannuelle de la pluie (Balme, 2004), d'une part, et que la moyenne et la distribution du cumul événementiel paraît stable entre années humides et sèches (Le Barbé & Lebel, 1997), d'autre part. La loi des Fuites et le modèle de Chaîne de Markov, sont deux modèles mixtes qui font explicitement apparaître le nombre et le cumul des événements. Ils sont par conséquent bien adaptés à l'étude des pluies au Sahel. En effet, *toute augmentation ou diminution de la pluie moyenne annuelle pourra se traduire dans les paramètres relatifs au nombre d'événements*: ceci est la base de notre proposition. Ainsi pour générer des scénarios de pluie à partir de ces deux modèles, tout en tenant compte de la tendance pluviométrique des décennies futures fournie par un MCGA, ce sont les paramètres relatifs à l'occurrence des événements qui seront modifiés. On cherche, dans cette approche, que les MCGA soient seulement capables de fournir la tendance de la pluie moyenne interannuelle et, de notre point de vue, c'est le minimum d'information qu'on peut exiger d'eux pour faire des études d'impact. Nous évaluons cette proposition en utilisant l'exemple d'une Chaîne de Markov.

MISE EN ŒUVRE ET EVALUATION DE LA METHODE PROPOSEE

Paramètres des chaînes de Markov au Sahel

Nous considérons une Chaîne de Markov d'ordre 1 pour la modélisation de l'occurrence des jours pluvieux. Une Chaîne de Markov d'ordre 1 est caractérisée par deux paramètres: la probabilité (P_{01}) qu'il pleuve au jour $j + 1$ sachant qu'il n'a pas plu au jour j et la probabilité (P_{11}) qu'il pleuve au jour $j + 1$ sachant qu'il a plu au jour j . Ces deux probabilités sont appelées probabilité de transition. Pour estimer ces paramètres au Sahel, 244 stations, bien réparties sur toute la zone CILSS (Comité Inter-états de Lutte contre la Sécheresse au Sahel) et ayant fonctionné sur toute la période (1961–1990), ont été choisies (Fig. 1). Nous allons vérifier que ces deux paramètres (P_{01} , P_{11}) expliquent bien la variabilité interannuelle et intra-saisonnière de la pluie au Sahel, avant de présenter la procédure de simulation.

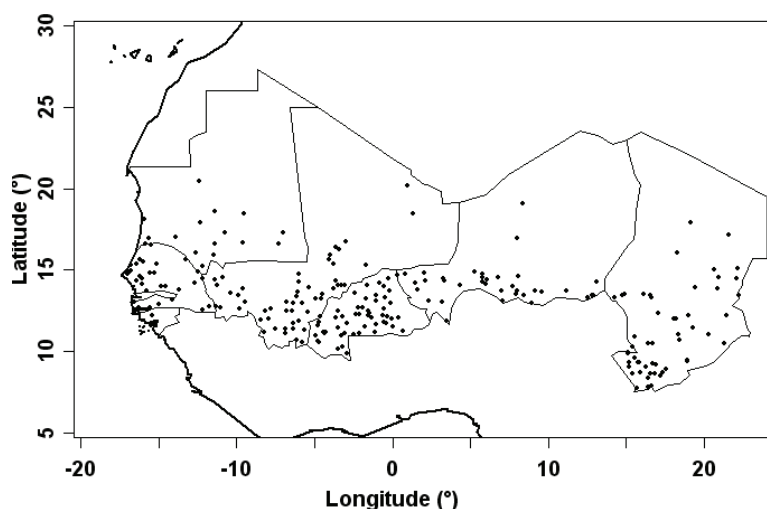


Fig. 1 Le réseau de 244 stations du Centre AGRHYMET utilisé dans le présent travail. Toutes ces stations possèdent des données journalières complètes sur la période 1961–1990.

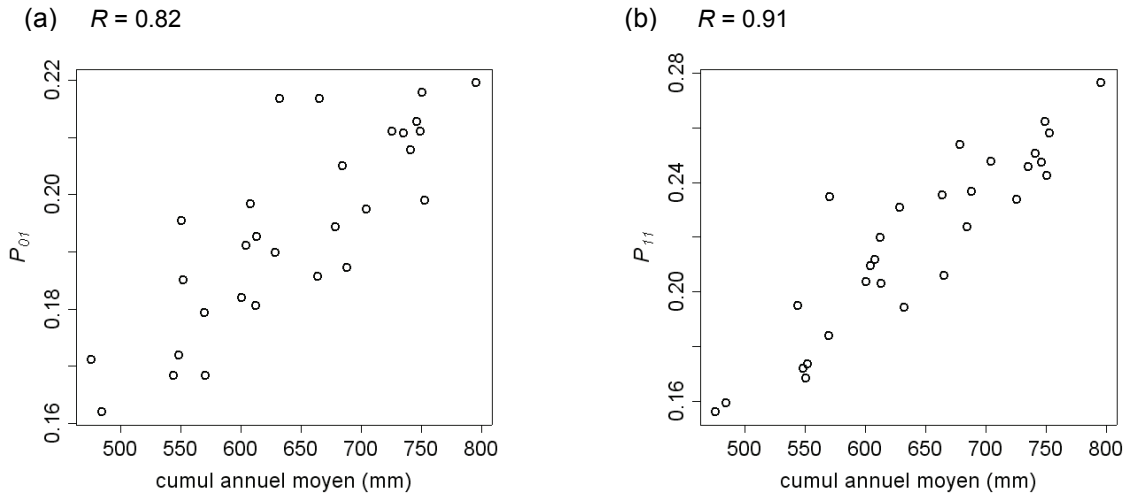


Fig. 2 Corrélation entre les probabilités de transition de la Chaîne de Markov et le cumul annuel. (a) corrélation entre la probabilité de transition de jour sec / jour de pluie (ou P_{01}), et (b) corrélation entre la probabilité de transition jour de pluie/jour de pluie (ou P_{11}).

Variabilité interannuelle En Fig. 2, sont représentées les relations entre la moyenne du cumul annuel de la pluie, d'une part, et la moyenne annuelle des paramètres P_{01} et P_{11} , d'autre part. Les valeurs annuelles de P_{01} et P_{11} sont notées P_{01}^a et P_{11}^a et sont calculées de la manière suivante:

$$P_{01}^a = \frac{1}{N_S} \left[\sum_{k=1}^{N_S} \left(\frac{N_{01}}{N_0} \right)_k \right] \quad (1)$$

$$P_{11}^a = \frac{1}{N_S} \left[\sum_{k=1}^{N_S} \left(\frac{N_{11}}{N_1} \right)_k \right] \quad (2)$$

avec N_{01} nombre de couples (jour sec, jour pluvieux) pour une station k sur la saison (la période considérée dans ce travail va du premier mai au 31 octobre); N_{11} nombre de couples (jour pluvieux, jour pluvieux); N_0 nombre de jours sans pluie; N_1 nombre de jours pluvieux; N_S nombre de stations de l'année ($N_S = 244$ pour toutes les années). Un jour pluvieux est un jour pour lequel le cumul de pluie journalière est supérieure ou égale à 1 mm.

On observe des relations satisfaisantes entre le cumul annuel et ces probabilités de transition de la Chaîne de Markov d'ordre 1. Ces relations entre la pluie moyenne annuelle et les paramètres de la Chaîne de Markov confortent les résultats antérieurs sur la climatologie des pluies au Sahel, à savoir que le nombre d'événements est le moteur principal de la variabilité interannuelle des pluies au Sahel (Le Barbé & Lebel, 1997). L'hypothèse de notre démarche, selon laquelle toute diminution ou augmentation de la pluie moyenne annuelle peut être directement reportée dans les paramètres de la Chaîne de Markov, se trouve renforcée.

Variabilité intra-saisonnière Voyons maintenant si le signal intra-saisonnier de la pluie est aussi expliqué par les paramètres de la Chaîne de Markov. En Fig. 3, nous avons calculé les paramètres P_{01} et P_{11} pour chaque jour de la saison en utilisant les 30 années (1960–1990). On peut remarquer de cette figure que le signal intra-saisonnier de la pluie se retrouve parfaitement expliqué par les probabilités de transition de la Chaîne de Markov (avec le maximum des valeurs pour le mois d'août). Un résultat important à souligner dans ce signal intra-saisonnier est la présence du saut de Mousson (Sultan & Janicot 2000) dans l'évolution intra-saisonnière de la probabilité qu'il pleuve au lendemain d'un jour pluvieux (P_{11}). Il se situe dans les environs du 25 juin. Ce résultat est d'autant plus important car il laisse espérer de retrouver le saut de Mousson dans les simulations de la pluie.

Procédure de la simulation

Nous avons vu dans les sections précédentes que la variabilité interannuelle et le signal intra-saisonnier des pluies au Sahel sont expliqués par les probabilités de transition d'une Chaîne de

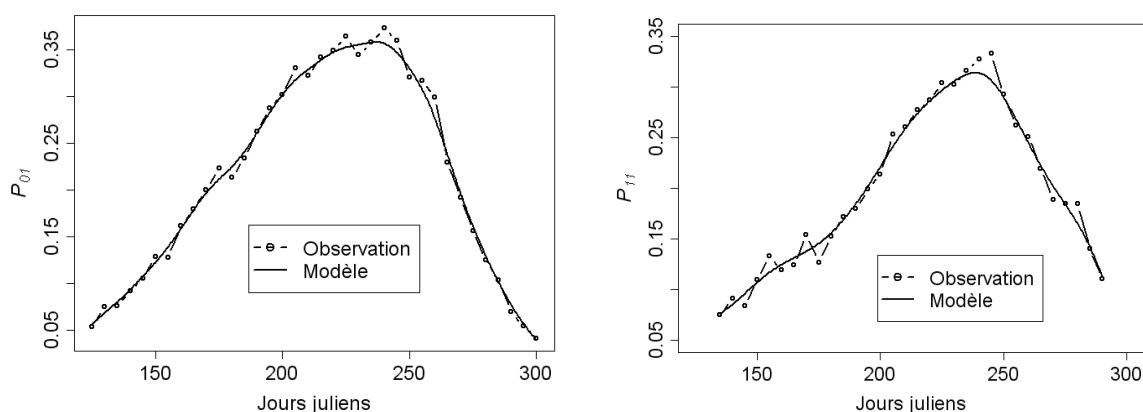


Fig. 3 Signal intra-saisonnier des probabilités de transition de la Chaîne de Markov. Un modèle non paramétrique est calé sur ce signal.

Markov d'ordre 1. Nous allons maintenant élaborer un simulateur de Chaîne de Markov non stationnaire. La Chaîne de Markov est non stationnaire, car les probabilités de transition changent chaque jour au cours de la saison. Cette Chaîne de Markov d'ordre 1 est caractérisée par la matrice

P suivante: $P = \begin{bmatrix} 1 - P_{01}(t) & P_{01}(t) \\ 1 - P_{11}(t) & P_{11}(t) \end{bmatrix}$ où t représente les jours de la saison. Pour utiliser cette

matrice non stationnaire, il faut modéliser la variation intra-saisonniers de P_{01} et P_{11} . Vu la forme du signal intra-saisonnier de P_{01} et P_{11} , il a été difficile d'ajuster un modèle paramétrique. Nous avons alors opté pour une solution non paramétrique. La forme du modèle adopté est représentée par l'équation (3) (Bowman & Azzalini, 1997):

$$P_{x1}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N K\left[\frac{t - t_j}{\varphi_{x1}}\right] \quad (3)$$

où $K(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{z^2}{2}\right]$ est la fonction de densité normale constituant le noyau du modèle;

N est le nombre de jours de la saison, t_j les jours de la saison, φ_{x1} la largeur de la bande de lissage du modèle non paramétrique. $\varphi_{01} = 6.80$ et $\varphi_{11} = 5.87$ sont les largeurs des bandes respectivement pour le modèle de P_{01} et de P_{11} . La Fig. 3 montre que le modèle proposé s'ajuste bien aux observations de P_{01} et P_{11} . Le saut de Mousson apparaît plus ou moins bien reproduit par le modèle. La procédure de simulation est la suivante:

- on simule en un point les occurrences des pluies (jour pluvieux codé 1 et jour sec codé 0) en utilisant le modèle ainsi proposé pour les probabilités de transition de la Chaîne de Markov;
- on tire ensuite le cumul de pluie associé à chaque jour pluvieux suivant une distribution exponentielle obtenue par ajustement aux cumuls observés (la moyenne des pluies journalières supérieures à 1mm est de 16 mm).

RESULTATS

Variabilité intra-saisonniers

Pour savoir si le modèle reproduit bien le cycle saisonnier, nous avons effectué 200 simulations et chaque simulation représente une saison. La Fig. 4 représente la moyenne de ces 200 simulations. On peut ainsi constater que le signal saisonnier de la pluie moyenne journalière est bien reproduit. La courbe de lissage pour les simulations et pour l'observation sont en bon accord. Ces lissages ont été effectués en utilisant l'équation (3) pour les 200 simulations et les trente années d'observation (1961–1990).

Les séquences sèches

La répartition temporelle des jours de pluie est importante en hydrologie, car un cumul de 200 mm tombé en deux jours ou en dix jours n'aura pas le même impact hydrologique. Nous avons calculé

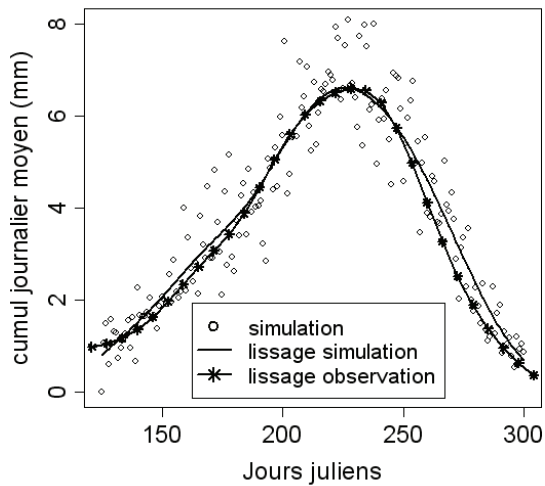


Fig. 4 Simulation, à partir de la Chaîne de Markov et d'une distribution exponentielle des cumuls journaliers, de la variabilité intra-saisonnière de la pluie journalière. On compare le lissage de 200 simulations et celui des 30 années observées (1961–1990).

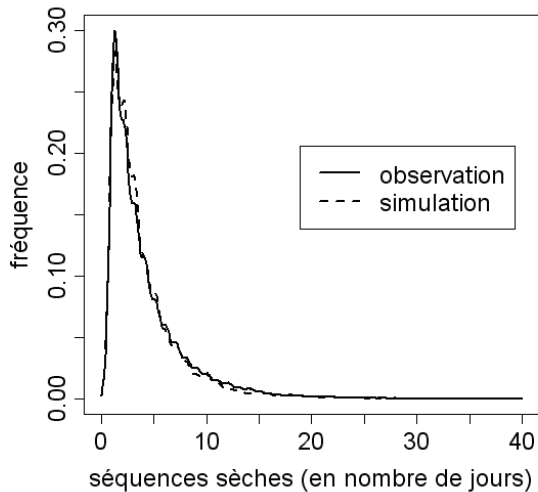


Fig. 5 Comparaison des séquences sèches simulées par l'approche d'une Chaîne de Markov et celles obtenues à partir des pluies observées.

r les séquences sèches séparant deux jours de pluie (nous appelons qu'un jour de pluie est un jour dont le cumul est supérieur ou égal à 1 mm) sur 10 années simulés et 10 années observées et pour la période allant du premier mai au 31 octobre. Les distributions des séquences simulées et observées sont comparées en Fig. 5. Nous notons une forte ressemblance entre l'observation et la simulation.

Variabilité interannuelle

Nous avons noté que, pour le moment, la seule importante information pluviométrique qu'on peut espérer obtenir des MCGA est la tendance générale de la pluviométrie, c'est à dire le pourcentage d'augmentation ou de diminution de la pluie par rapport à une référence donnée. Nous évaluons dans ce paragraphe, la capacité de notre approche à reproduire la variabilité interannuelle des pluies au Sahel sur la base de la seule connaissance de la pluie moyenne interannuelle. Nous considérons pour cela 30 ans de période humide (1941–1970) et 30 ans de période sèche (1971–2000). Une augmentation de 20% par rapport à la moyenne calculée sur (1941–2000) est considérée pour la période humide et une diminution de 20% est considérée pour la période sèche. Ces pourcentages sont reportés dans les probabilités de transition de la Chaîne de Markov pour simuler les soixante ans de la période 1941–2000. On retrouve en Fig. 6, une forme de variabilité

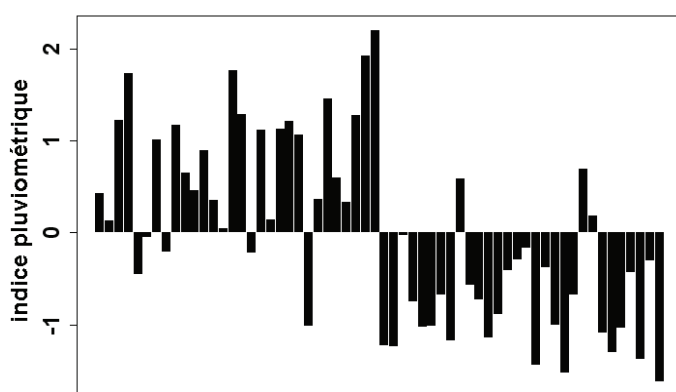


Fig. 6 Simulation de la variabilité interannuelle de la pluie à partir du modèle de Chaîne de Markov et de la distribution exponentielle des cumuls journaliers. Les probabilités de transition de la Chaîne de Markov ont été augmentées de 20% pour la période 1941–1970 et diminuées de 20% pour la période 1971–2000.

interannuelle qui ressemble bien à ce qui est observé. La période 1941–1970 sur laquelle on a opéré l'augmentation, montre une persistance des années humides avec quelques occurrences brutes d'années sèches. De même la période 1971–2000 sur laquelle on a opéré la diminution, montre une persistance des années sèches avec quelques occurrences brutes d'années humides.

CONCLUSION

Les techniques de désagrégation des sorties des MCGA rencontrées dans la littérature ne permettent pas, au Sahel, de passer de manière adéquate de l'information à grande échelle fournie par un MCGA à la pluie à haute résolution aux échelles locales, d'une part. Les méthodes de simulation calées sur les observations prennent difficilement en compte l'information fournie par un MCGA, d'autre part. Partant de ce constat, nous avons, sur la base des propriétés spécifiques de la climatologie des pluies sahéniennes, proposé une approche simple de production des scénarios de pluie au Sahel. L'information sur la tendance générale de la pluviométrie que pourrait fournir par un MCGA est simplement reportée dans les probabilités de transition d'une Chaîne de Markov. La mise en œuvre et l'évaluation de l'approche ont montré que cette procédure permet de reproduire toutes les caractéristiques importantes de la pluie au Sahel: le signal saisonnier, la variabilité interannuelle, la distribution des fréquences sèches. Cette évaluation montre donc, le potentiel que présente une telle approche. Il est envisagé d'utiliser ces scénarios de pluie dans un modèle hydrologique pour tester la pertinence des scénarios hydrologiques qui en résultent. Un aspect important de cette recherche reste, cependant, à poursuivre: il s'agit de la prise en compte de la corrélation spatiale entre les stations lors de la génération des pluies.

REFERENCES

- Ardoin-Bardin, S. (2004) Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. Thèse de Doctorat, Université Montpellier II, France.
- Balme, M. (2004) Analyse du régime pluviométrique sahéni et de son impact sur le rendement mil à l'aide des données de l'Observatoire AMMA-CATCH, Niger. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, France.
- Bowman, A. W. & Azzalini, A. (1997) *Applied Smoothing Techniques for Data Analysis: The Kernel Approach with S-PLUS Illustrations*. Oxford University Press, Oxford, UK.
- Hamatan, M. (2006) Evaluation des Modèles de la circulation générale atmosphérique au Sahel et des modèles hydrologiques. Thèse en cours au Centre Régional AGRHYMET.
- Le Barbé, L. & Lebel T. (1997) Rainfall climatology of the HAPEX-Sahel region during the years 1950–1990. *J. Hydrol.* **188**, 43–73.
- Sultan, B. & Janicot, S. (2000) Abrupt shift of the ITCZ over West Africa and intra-seasonal variability. *Geophys. Res. Lett.* **27**, 3353–3356.