

Variabilités interannuelle et intra-saisonnière des pluies aux échelles hydrologiques. La mousson ouest-africaine en climat soudanien

MATTHIEU LE LAY¹ & SYLVIE GALLE²

¹ LTHE – IRD, BP 53, F-38041 Grenoble Cedex 9, France
matthieu.lelay@hmg.inpg.fr

² LTHE – IRD, 08BP841, Cotonou, Bénin

Résumé En Afrique de l'Ouest, les précipitations sont caractérisées par une forte variabilité, à la fois interannuelle et décennale. La quantification des impacts hydrologiques de cette variabilité nécessite l'analyse de la pluviométrie à fine échelle. Cette étude diagnostique caractérise le régime pluviométrique soudanien aux échelles pertinentes pour l'hydrologie, grâce à l'analyse de données collectées sur le bassin de la Haute Vallée de l'Ouémé (Bénin) entre 1950 et 2002. Comme au Sahel, la sécheresse marquée des décennies 1970 et 1980 y est observable, mais la variabilité interannuelle demeure ici importante. L'étude de la dynamique saisonnière, basée sur la distinction entre les régimes de mousson océanique et continental, montre que l'essentiel des modifications pluviométriques observées est lié à la variabilité de la saison continentale. D'une part, la mise en place de ce régime, observée sur les cinquante dernières années, est de plus en plus précoce au cours de la saison. D'autre part, le caractère déficitaire d'une année est principalement corrélé à la diminution du nombre de gros systèmes convectifs au sein de cette saison.

Mots clés bassin versant; climat soudanien; déficit pluviométrique; mousson; précipitations; Afrique de l'Ouest

Seasonal cycle and interannual variability of rainfall at hydrological scales. The West African monsoon in a Sudanese climate

Abstract West African rainfall is characterized by a strong variability, both at decadal and interannual scales. In order to quantify the hydrological impacts of such a variability, analysis of rainfall patterns at fine scales is highly essential. This diagnostic study aims to characterize the Sudanese rainfall regime at hydrological scales, using a raingauge data set collected on the upper Oueme River catchment (Benin) between 1950 and 2002. A long-term drought is observed during the 1970s and 1980s, as in the Sahel. However, the interannual variability remains significant in the Sudanese region. The study of the seasonal cycle, based on the distinction between the oceanic and continental monsoon regimes, shows that the majority of rainfall changes occur in the continental regime. On the one hand, the rainfall peak associated with this regime that has been observed for the last 50 years has occurred increasingly earlier in the season. On the other hand, the annual rainfall deficit is mainly linked to the decrease in the number of large events during the continental part of the season.

Key words catchment; Sudanese climate; rainfall deficit; monsoon; precipitation; West Africa

INTRODUCTION

La pluviométrie d'Afrique de l'Ouest présente une importante variabilité interannuelle, à laquelle se superpose un signal décennal ou pluri-décennal fort, mis en évidence par de nombreux auteurs (e.g. Hubert *et al.*, 1989; Nicholson & Palao, 1993; Le Barbé & Lebel, 1997; Paturel *et al.*, 1997; Le Barbé *et al.*, 2002). Le déficit pluviométrique observé depuis les années 70 au Sahel, mais aussi plus généralement dans toute l'Afrique de l'Ouest, en est une signature aux conséquences humaines et économiques considérables. La connaissance de la mousson ouest-africaine a notablement progressé ces dernières années et permet aujourd'hui de mieux comprendre les liens entre la circulation atmos-

phérique, les conditions de surfaces océaniques et continentales, et la pluviométrie (Eltahir & Gong, 1996; Fontaine & Janicot, 1996). Néanmoins, si quelques études ont établi des liens entre la variabilité interannuelle et le cycle saisonnier des précipitations sur l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest (Le Barbé & Lebel, 1997; Le Barbé *et al.*, 2002; Lebel *et al.*, 2003; Sultan & Janicot, 2003), la plupart des travaux a analysé le régime de mousson à l'échelle interannuelle. La quantification des impacts hydrologiques de cette variabilité climatique nécessite cependant d'observer le phénomène à des échelles de temps plus fines, afin de caractériser l'intermittence des pluies dans une région où elle constitue le paramètre clef de la réponse hydrologique.

Ce travail étudie la variabilité des précipitations aux échelles intéressant l'hydrologie et sa modélisation, dans le but d'orienter le forçage des simulations d'impact climatique sur la ressource en eau. Il s'appuie sur la fenêtre d'observation du programme AMMA-CATCH (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine – Couplage de l'Atmosphère Tropicale et du Cycle Hydrologique) en zone soudanienne (Observatoire de la Haute Vallée de l'Ouémé, Bénin). Sur ce site pilote sont étudiées les interactions entre la mousson et le cycle hydrologique. Les caractéristiques pluviométriques de ce site seront discutées à la lumière de celles de la zone sahélienne (site du degré carré de Niamey), plus largement étudiée par la communauté scientifique au cours de ces dernières années, et de la région guinéenne (site de Cotonou). Le climat soudanien apparaît en effet comme une zone de transition entre les climats guinéen (régime à deux saisons des pluies) et sahélien (régime à une saison des pluies), aux dynamiques très différentes.

Nous présentons ici dans un premier temps les différents modes de variabilité de la pluie sur la région étudiée, les manifestations intra-saisonnières du déficit pluviométrique, et abordons le cas de la dernière décennie, aux conditions climatiques contrastées. Dans la seconde partie, les caractéristiques du cycle saisonnier sont étudiées aux échelles spatio-temporelles adéquates pour l'élaboration de scénarios de changements climatiques sur la région.

ZONES D'ETUDE ET DONNEES UTILISEES

Les données sont issues de l'Observatoire Hydrométéorologique de la Haute Vallée de l'Ouémé (OHHVO), au Bénin (Fig. 1). Située à une latitude comprise entre 9 et 10°N, à une longitude moyenne de 2°E et couvrant une surface d'environ 14 400 km², cette région présente un climat de type soudanien, avec un cumul pluviométrique annuel moyen de 1190 mm (période 1950–2002). La végétation est principalement composée de savane arborée et de cultures, et le relief est peu marqué (altitudes comprises entre 200 et 600 m). Au vu de plusieurs études menées sur l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest (Paturel *et al.*, 1997; Servat *et al.*, 1999; Le Barbé *et al.*, 2002), cette région montre un comportement comparable à la majeure partie de la bande soudanienne. Dans cette étude, l'homogénéité du réseau d'observations a fait l'objet d'une attention particulière. L'amélioration et l'augmentation des données disponibles au début des années cinquante a conduit au choix de la période 1950–2002 comme référence pour ce travail. Douze stations pluviométriques du réseau national béninois, situées sur ou à proximité de la zone d'étude, ont été retenues (localisation en Fig. 1). Pour chacune de ces stations, les années incomplètes ont été traitées comme années manquantes, et le

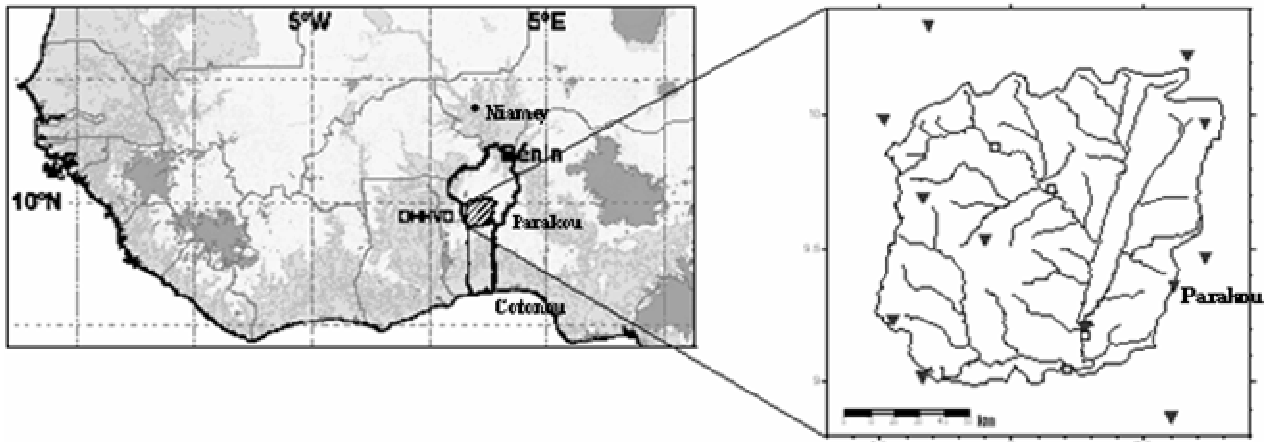


Fig. 1 Observatoire de la Haute Vallée de l'Ouémé (OHHVO). Réseau de stations pluviométriques (▼) et exutoires des bassins versants jaugés (□).

Tableau 1 Liste des stations pluviométriques étudiées.

Station	Longitude	Latitude	Date d'installation	Nombre d'années manquantes (période 1950–2002)
Bembéréké	2.66	10.22	1921	1
Djougou	1.66	9.69	1921	10
Parakou	2.61	9.36	1921	0
Kouandé	1.68	10.33	1931	4
Tchaourou	2.60	8.87	1937	9
Ina	2.73	9.97	1947	5
Bassila	1.67	9.02	1950	14
Birni	1.52	9.98	1954	12
Bétérou	2.27	9.20	1954	9
Okpara	2.73	9.47	1957	9
Partago	1.90	9.53	1969	23
Pénéssoulou	1.55	9.23	1969	20

réseau réellement utilisé dans tout ce qui suit est composé de 9 à 12 pluviomètres suivant les années. Les données disponibles, ainsi que les lacunes éventuelles, sont résumées dans le Tableau 1. Les stations installées tardivement (Partago et Pénéssoulou) ont été retenues après vérification de la cohérence de leurs données avec le reste du réseau. L'analyse de la variabilité spatiale des précipitations, réalisée sur l'OHHVO par Varado (2004) à partir du réseau AMMA-CATCH (environ 40 stations pluviométriques) sur la période 1997–2002, a permis le calage d'un variogramme exponentiel de portée 90 km sur les données journalières. Comparées à l'interdistance moyenne des stations du réseau national (60 km), ces propriétés géostatistiques justifient l'utilisation d'un interpolateur statistique (krigeage) pour le calcul des moyennes spatiales journalières (krigeage effectué à partir des 9 à 12 pluviomètres disponibles chaque année).

Les données pluviométriques du degré carré de Niamey (maille de $1^\circ \times 1^\circ$ comprise entre 13 et 14°N , 2 et 3°E , réseau de 12 stations pluviométriques), ainsi que celles de la station de Cotonou (6.3°N , 2.5°E), permettront de mettre en lumière les analogies et les différences entre ces zones climatiquement contrastées.

VARIABILITE INTERANNUELLE ET CYCLE SAISONNIER DE LA MOUSSON

Variabilité interannuelle et décennale

Le déficit pluviométrique observé dans les années 1970 et 1980 tend à montrer l'existence d'un signal décennal fort dans le climat ouest-africain. Afin de distinguer ce signal de la variabilité interannuelle des précipitations, plusieurs auteurs (Hubert *et al.*, 1989; Paturel *et al.*, 1997; Servat *et al.*, 1999; Mahé *et al.*, 2001) ont cherché à détecter une rupture statistique dans les séries pluviométriques. Si cette rupture apparaît clairement à la fin des années 1960 au Sahel, elle semble moins nette dans les zones soudaniennes et guinéennes, où d'importantes disparités spatiales demeurent. L'analyse spectrale des précipitations annuelles réalisée par Nicholson & Palao (1993) met également en évidence des différences entre les régions situées de part et d'autre de 10°N. La variabilité du signal sahélien est en effet dominée par des fluctuations de basses fréquences alors que les hautes fréquences prévalent dans les régions soudaniennes et guinéennes.

La comparaison des indices pluviométriques réduits ($I_i = (P_i - P_{\text{moy}})/\sigma$, avec P_i le cumul annuel de l'année i , P_{moy} et σ respectivement la moyenne et l'écart type des précipitations annuelles sur la période considérée) sur le degré carré de Niamey et sur l'OHHVO (Fig. 2), deux zones de tailles similaires, illustre les différences notables entre les régimes sahélien et soudanien. Conformément aux résultats cités précédemment, l'alternance de longues périodes humides et sèches sur l'OHHVO est largement bruitée par les fluctuations interannuelles, excepté lors de la première moitié des années 1980, systématiquement déficitaire. D'autre part, les années 1990 semblent voir le retour de conditions plus humides sur l'OHHVO (en considérant pour l'indice I un seuil de significativité de ± 0.5 , on observe six années humides contre trois années sèches depuis 1988), alors que la région de Niamey conserve une pluviométrie légèrement déficitaire, malgré quelques années remarquablement humides (1994, 1998 et 1999). L'Hôte *et al.* (2002) considèrent à ce sujet que la période sèche n'est actuellement pas terminée au Sahel, même si certains auteurs soulignent la nécessité d'avoir plus de recul pour pouvoir l'affirmer étant données les procédures statistiques employées (Ozer *et al.*, 2003). On notera cependant, avec Balme *et al.* (2005), que le retour à des conditions plus humides dans les régions sub-sahéliennes distingue ces dernières années de la sécheresse généralisée des décennies 1970 et 1980.

L'Afrique de l'Ouest sub-saharienne n'est donc pas affectée de la même façon par cette variabilité de grande échelle, et dans certaines régions la forte variabilité interannuelle peut rester le signal pluviométrique prédominant. Il est dès lors délicat d'attribuer à une année donnée un caractère sec ou humide à l'échelle régionale, et il convient de tenir compte des fortes hétérogénéités spatiales des champs de précipitations par des analyses à plus fine échelle. Ces aspects spatiaux seront plus largement discutés par la suite.

Cycle saisonnier

La vision classique de la mousson ouest-africaine est basée sur un déplacement progressif de la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT) sur le continent entre 5°N

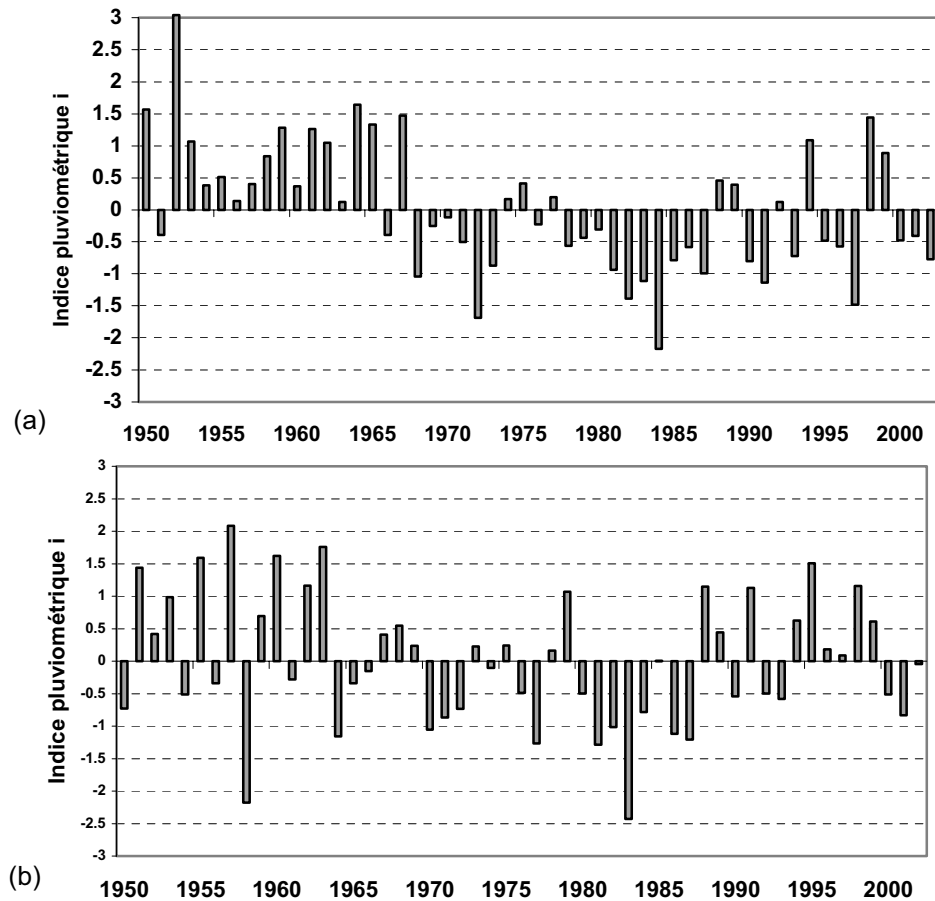


Fig. 2 Indices pluviométriques réduits ($I_i = (P_i - P_{\text{moy}})/\sigma$) de 1950 à 2002, (a) sur le degré carré de Niamey, (b) sur l'OHHVO.

en mai et 15°N en août. Les études récentes du cycle saisonnier (Le Barbé *et al.*, 2002; Lebel *et al.*, 2003; Sultan & Janicot, 2003) remettent en cause ce schéma, en montrant la non linéarité du déplacement de la ZCIT sur le continent entre deux positions de quasi-équilibre à 5°N et 10°N , et l'existence d'un "saut de mousson" entre ces deux latitudes. Deux régimes pluviométriques, directement associés aux mouvements méridiens de la ZCIT, sont dès lors distingués, à savoir une première saison dite océanique, essentiellement due à l'apport d'humidité à partir du Golfe de Guinée, et une seconde dite continentale après le saut de mousson, mettant en jeu une dynamique très différente.

Le cycle saisonnier moyen de la période 1950–2002, observé sur un transect situé à 2°E et s'étendant de la côte guinéenne (Cotonou) au Sahel (Niamey), corrobore cette nouvelle vision (Fig. 3). Sur ce signal, moyenné sur 11 jours (fenêtre glissante de $j - 5$ à $j + 5$), trois phases sont mises en évidence. Le régime océanique est à l'origine de la première saison des pluies guinéenne, avec un premier pic de pluie mi-juin. Plus au nord, il se caractérise au même moment par un pic moins marqué à Parakou et un léger ralentissement dans l'établissement de la mousson début juin à Niamey. Le saut de mousson est très net à la fin du mois de juin. Il se manifeste par un brusque renforcement des précipitations à Niamey et Parakou, et par la fin de la première saison des pluies à Cotonou. La date de ce saut confirme les résultats obtenus par

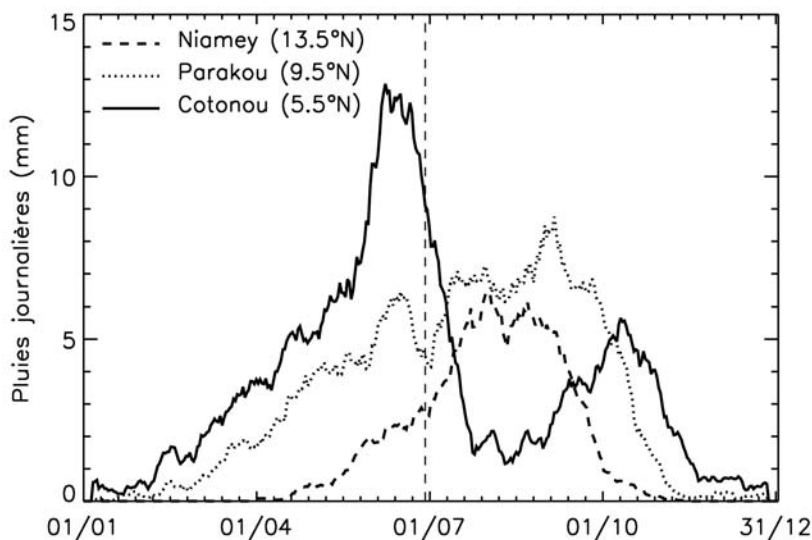


Fig. 3 Cycle saisonnier moyen des précipitations sur un transect situé à 2°E, pour la période 1950–2002. Présentation en moyenne glissante sur 11 jours.

Sultan & Janicot (2003) sur la fenêtre 10°O–2°E et la période 1968–1990. Le régime continental, enfin, constitue l'essentiel de la saison à Niamey (de juillet à septembre), le coeur de la saison à Parakou (de juillet à octobre), et l'intégralité de la seconde saison à Cotonou (de septembre à mi-novembre). Ce régime continental apporte 84% des précipitations annuelles à Niamey, 65% à Parakou, et 42% à Cotonou (moyennes sur la période 1950–2002).

Modifications du cycle saisonnier sur la période 1950–2002

Que l'on souhaite comprendre les mécanismes de la mousson ou les impacts hydrologiques de sa variabilité, il est nécessaire de caractériser les manifestations intra-saisonniers du déficit pluviométrique. Pour cela, une analyse du cycle saisonnier des précipitations est réalisée ici. Le découpage de la période d'étude (1950–2002) s'appuie sur la rupture climatologique la plus souvent située autour de 1970 sur l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest, et définit les périodes 1950–1970 (P_1) et 1971–2002 (P_2). Cependant, si la période P_2 se caractérise par une plus forte occurrence d'années sèches, la forte variabilité interannuelle au sein d'une même période incite à l'observation de sous-ensembles secs et humides. Au sein de chacune de ces deux périodes, on identifie donc un composite des sept années les plus humides (P_H) et un composite des sept années les plus sèches (P_S). Il nous est ainsi possible de distinguer les caractéristiques du déficit pluviométrique avant et après la rupture climatologique. La Fig. 4 compare les cycles saisonniers moyens sur la région (moyenne glissante sur 11 jours, moyenne spatiale sur l'OHHVO), pour les quatre périodes P_{1H} , P_{2H} , P_{1S} et P_{2S} . De façon globale, la variabilité interannuelle des précipitations est comparable pour les périodes antérieures et postérieures à 1970 ($cumul(P_{1S})/cumul(P_{1H}) = 0.70$; $cumul(P_{2S})/cumul(P_{2H}) = 0.68$). Elle est aussi bien supérieure à la variabilité pluri-décennale ($cumul(P_2)/cumul(P_1) = 0.91$). Avant comme après 1970, la comparaison des composites secs et humides montre un déficit pluviométrique réparti sur toute la saison

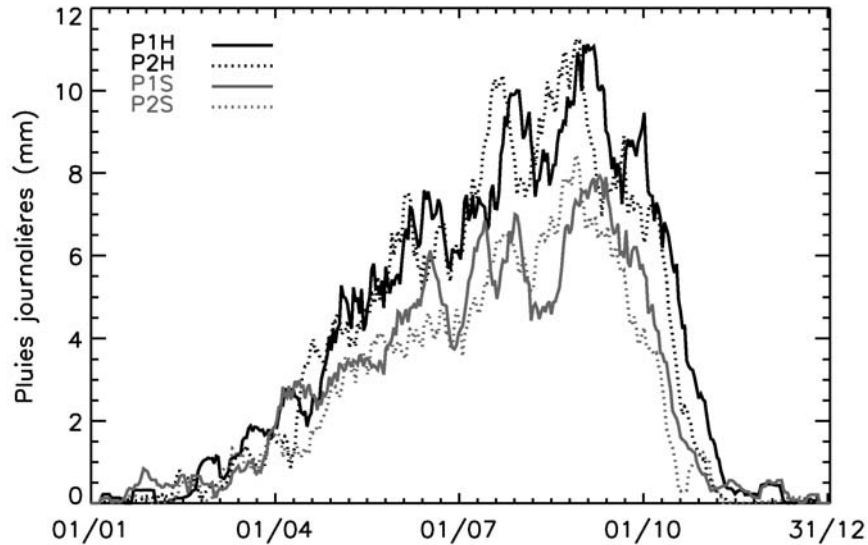


Fig. 4 Cycle saisonnier des précipitations moyennes sur l'OHHVO, pour les composites d'années humides (P_{1H} : avant 1970; P_{2H} : après 1970) et sèches (P_{1S} : avant 1970; P_{2S} : après 1970). Ces composites ont une durée de 7 ans, et les valeurs sont des moyennes glissantes sur 11 jours.

et relativement homothétique. La dynamique saisonnière des années sèches et humides est sensiblement identique, puisque les dates des trois pics de pluies (juin, fin-juillet et début septembre) et du saut de mousson (fin juin) sont identiques. A contrario, elle semble significativement différente entre les périodes P_1 et P_2 , tant pour les années sèches que humides, comme le montre le décalage du troisième (et principal) pic de précipitations et de la fin de la saison des pluies, plus précoces d'une quinzaine de jours après 1970. Ce fait, également signalé par Le Barbé *et al.* (2002), tend donc à montrer que les modifications de forçage atmosphérique responsables de la forte occurrence d'années sèches depuis 1970 ont également influé sur la dynamique saisonnière de la mousson en zone soudanienne, et plus particulièrement sur le cœur de la saison des pluies (août–septembre).

Le décalage progressif du dernier pic de pluies illustre cette évolution (Fig. 5). Afin de s'affranchir autant que possible des artefacts éventuels liés à la technique de détection de ce pic, deux méthodes ont été utilisées. A partir d'un signal moyenné sur 10 ans, la première détecte la position du centre de gravité de la période de 30 jours la plus humide (méthode 1), et la seconde la position du centre de gravité de la période pour laquelle les pluies décennales sont supérieures (pas obligatoirement de façon continue) à un certain pourcentage (faible sensibilité des résultats à ce seuil, ici 96%) du cumul de la décennie la plus humide (méthode 2). Une fenêtre glissante sur les différentes décennies comprises entre 1950 et 2002 permet de tracer la tendance observée. Le glissement de ce pic de pluies est un phénomène très progressif, particulièrement marqué à la fin des années 1950, qui semble se poursuivre actuellement, et dont résulte un décalage d'environ 25 jours entre 1950 et aujourd'hui. Les variations très rapides observées lors de la dernière décennie sont dues à quelques années au régime pluviométrique très particulier qui ont rendu imprécise la détection du maximum de pluies, et sont donc à considérer avec prudence. Cependant, ces résultats montrent que la dernière décennie, si elle voit la réapparition de saisons plus

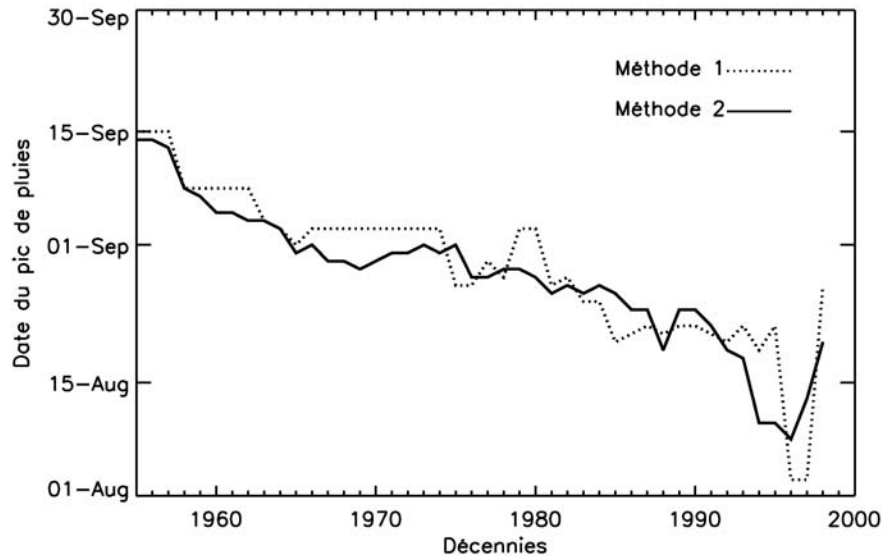


Fig. 5 Evolution de la date du maximum de pluies entre 1950 et 2002, à partir des précipitations moyennes sur l'OHHVO, calculée suivant deux méthodes.

humides sur la région, ne peut être considérée comme un retour à des conditions antérieures, puisque l'évolution du forçage atmosphérique associée à la sécheresse des années 1970 et 1980 semble se poursuivre.

Dans ce qui suit, la caractérisation intra-saisonnière du déficit pluviométrique est affinée, par la prise en compte de la variabilité spatiale des champs pluviométriques d'une part, et par l'étude du signal temporel à l'échelle de l'événement pluvieux d'autre part.

CARACTERISATION INTRA-SAISONNIERE DES ANNEES SECHES ET HUMIDES A L'ECHELLE DU BASSIN VERSANT

Nous appuyons ici notre propos sur quatre sous-bassins versants emboîtés et jaugés de l'OHHVO (localisation des exutoires en Fig. 1), de tailles comprises entre 586 km² et 14 400 km², et étudiés dans le cadre du programme CATCH. Dans cette gamme d'échelles, le réseau pluviométrique utilisé permet une estimation correcte, par krigeage, de la lame d'eau moyenne journalière. Le temps de réponse hydrologique de ces bassins (entre 2 et 5 jours) justifie par ailleurs l'utilisation de données journalières. Nous regarderons donc ici la pertinence de l'information disponible à méso-échelle, dans la perspective d'études de sensibilité des systèmes hydrologiques aux modifications de régimes pluviométriques (Le Lay & Galle, 2005).

Echelles spatiales et temporelles d'observation du cycle saisonnier

L'impact hydrologique d'un changement climatique est fortement dépendant de la façon dont il se manifeste au cours de la saison. Une caractérisation fine du signal saisonnier est donc un préalable indispensable à la quantification réaliste de la vulnérabilité des ressources en eau.

Partant du principe qu'un cumul pluviométrique sur une période donnée est égal à la somme des cumuls événementiels s'y produisant, il est possible de décomposer le signal saisonnier en deux composantes distinctes: le nombre d'événements pluvieux et le cumul événementiel moyen. La principale difficulté réside dans la notion d'événement pluvieux, dont la définition à partir de systèmes de mesures à pas de temps fixes (le plus souvent journaliers ou décadaires) est complexe. Le Barbé & Lebel (1997) ont développé un modèle statistique basé sur la loi des fuites, permettant de caractériser le cycle saisonnier par deux paramètres: le nombre moyen d'événements pluvieux sur une période donnée et le cumul événementiel moyen sur cette même période. Les résultats (Le Barbé & Lebel, 1997; Le Barbé *et al.*, 2002) montrent que les périodes 1950–1969 et 1970–1989 diffèrent essentiellement par le nombre moyen d'événements pluvieux au cours de la saison, la diminution du cumul moyen événementiel étant faible. Cette réduction du nombre d'événements n'est pas homogène sur la saison, et varie suivant la latitude. Ainsi, au delà de 10°N, le coeur et la fin de la saison sont particulièrement touchés, alors que plus au sud, l'intégralité de la saison est concernée. Lubès-Niel *et al.* (2001) ont par ailleurs mis en évidence des modifications des caractéristiques (de forme et d'intensité) des événements pluvieux supérieurs à 20 mm à la station de Niamey avant et après 1969. Des résultats similaires ont également été observés à partir de l'étude du cycle diurne des précipitations pour plusieurs stations sahéliennes par Shinoda *et al.* (1999).

Les caractéristiques pluviométriques aux échelles événementielle et ponctuelle sont néanmoins rarement directement assimilables dans les modèles hydrologiques, dont les échelles de travail sont le plus souvent différentes. Les échelles temporelles utilisées par ces modèles (exception faite des applications à la prévision de crues) sont le plus fréquemment journalières, décadaires ou mensuelles. On notera quelques exceptions notables en zone sahélienne, s'appuyant sur un modèle physique événementiel (Vieux *et al.*, 1998; Cappelaere *et al.*, 2003; Peugeot *et al.*, 2003). D'autre part, les modèles hydrologiques, qu'ils soient globaux ou distribués, ne sont jamais forcés par des données ponctuelles, mais plutôt par des valeurs spatialisées. Leur résolution dictera le niveau d'intégration spatiale, de quelques km² pour un modèle distribué, à la taille du bassin versant étudié dans le cas de modèles globaux. Il est donc nécessaire de caractériser le cycle saisonnier aux échelles utilisées pour le forçage de tels modèles. Nous parlerons ici d'échelles hydrologiques par abus de langage, dans la mesure où il ne s'agit pas des échelles caractéristiques des processus hydrologiques (et de leur mesure) mais plutôt de leur représentation dans les modèles.

Toute analyse de la pluviométrie à l'échelle d'un bassin versant comporte un biais, lié à la variabilité spatiale des précipitations. L'indice pluviométrique présenté sur la Fig. 6(a) montre par exemple que la sécheresse des décennies 1970 et 1980 a relativement peu touché la station de Parakou, située sur l'OHHVO, et que la pluviométrie annuelle à cette station n'explique que 66% de la variance des pluies sur l'observatoire (Fig. 6(b)). De telles hétérogénéités spatiales ont des conséquences considérables sur la ressource en eau, car elles gouvernent les processus intervenant dans la réponse des systèmes hydrologiques. De façon plus générale, toute démarche d'intégration spatiale des précipitations pose le problème du rapport entre la taille des systèmes pluvieux, leur vitesse de déplacement, la surface d'intégration et le pas de temps considérés. Sur le plan conceptuel, il n'est en effet pas simple de caractériser un événement pluvieux à partir d'une valeur moyennée sur plusieurs centaines de km²:

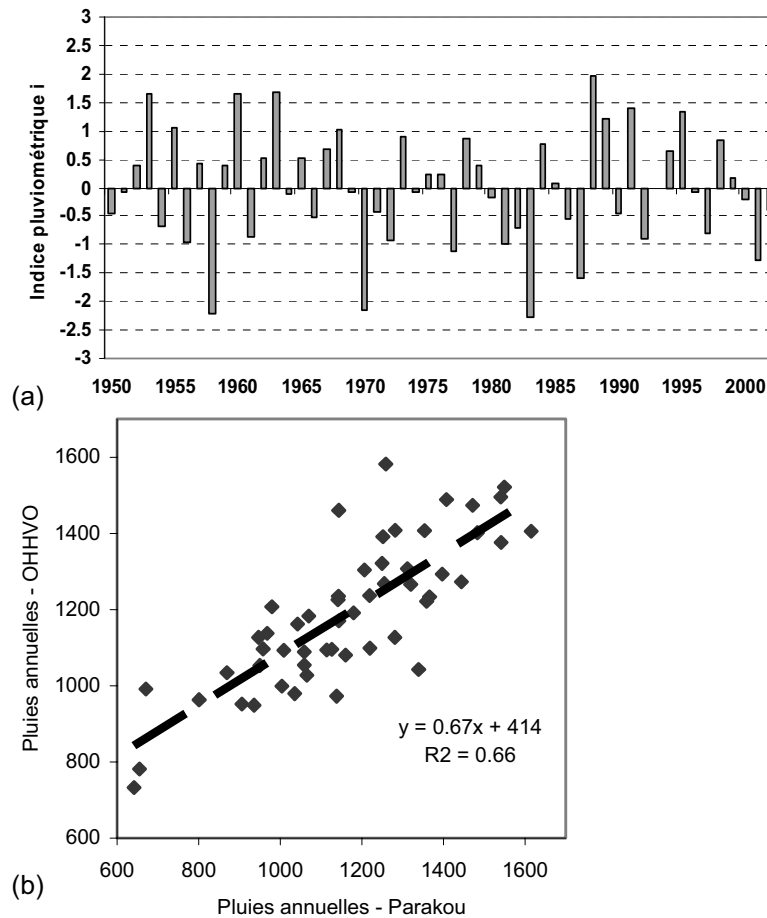


Fig. 6 (a) Indices pluviométriques réduits ($I_i = (P_i - P_{\text{moy}})/\sigma$) de 1950 à 2002, à la station de Parakou; (b) Corrélation entre les cumuls annuels de précipitations à la station de Parakou et sur l'OHHVO.

pour un même cumul moyen sur le bassin versant, il est évident qu'un système convectif organisé de grande échelle faiblement actif et un événement localisé intense sont très différents, à la fois sur les plans climatologique et hydrologique.

D'autre part, l'utilisation de cumuls journaliers induit un biais, lié à la dynamique propre des événements, qui, si elle suit grossièrement un rythme diurne, n'est pas centrée sur le découpage des données journalières. Autant de problèmes liés à l'inadéquation entre les échelles caractéristiques des processus mesurés et celles de leur représentation dans les modèles.

Seuillage des pluies journalières et superficie de bassin

L'observation du cycle saisonnier à l'échelle du bassin versant et au pas de temps journalier nécessite de définir un seuil sur les cumuls journaliers, au dessus duquel les précipitations seront prises en compte. Ce seuil, destiné à ne considérer que les événements pluvieux significatifs dans le cumul annuel, doit évidemment tenir compte de la surface d'intégration des pluies. L'effet du seuillage des précipitations sur l'information disponible à différentes échelles spatiales est présenté sur la Fig. 7, par le

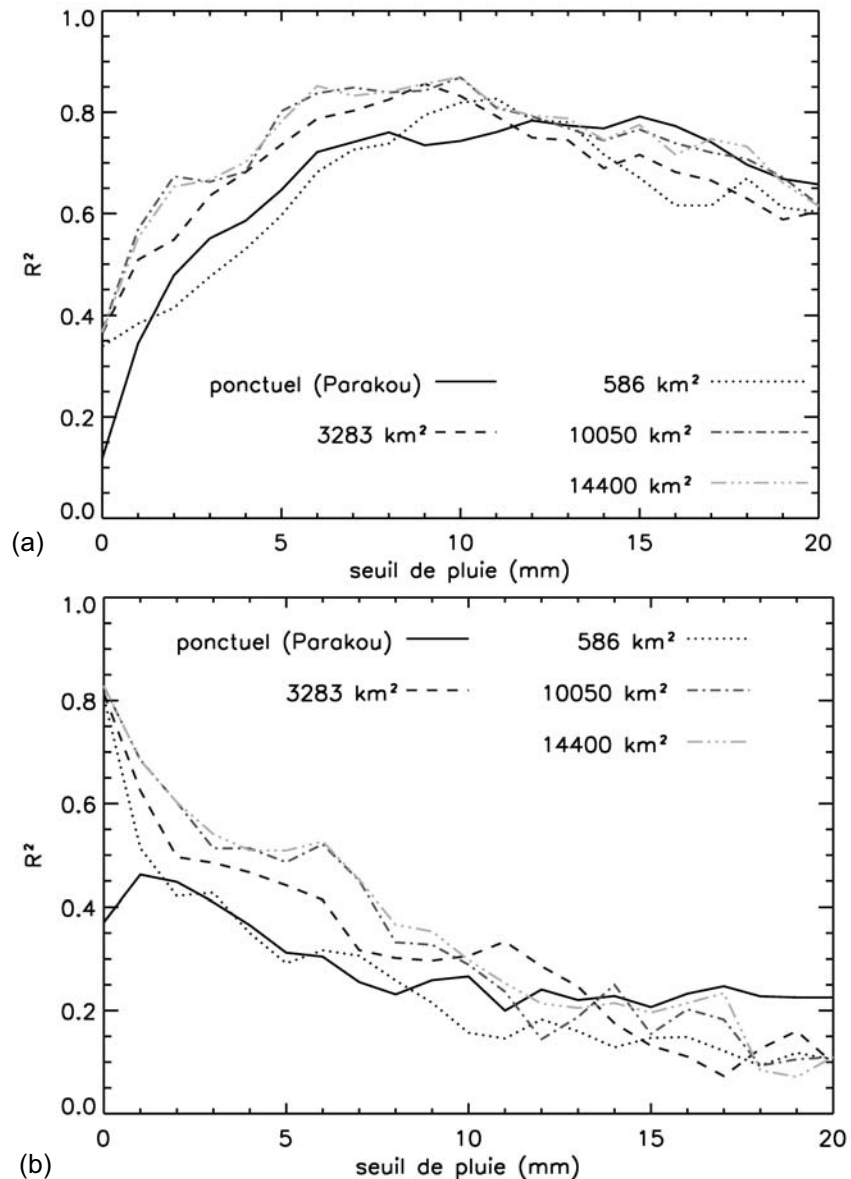


Fig. 7 Part de la variance du cumul annuel des précipitations expliquée, en fonction du seuil de pluie retenu: (a) par le nombre de jours pluvieux; (b) par la hauteur moyenne des jours pluvieux.

biais d'une analyse en corrélation multiple. On peut en effet écrire le cumul annuel P sous la forme du produit de la hauteur de pluie journalière moyenne (H) et du nombre de jours pluvieux (N) au cours de l'année: $P = H \times N + \varepsilon$, où ε croît avec le seuil considéré, et où H et N sont des variables quasi-indépendantes ($R < 0.15$). Sur la Fig. 7(a) a été portée la part de variance du cumul annuel expliquée par le nombre de jours pluvieux (N) en fonction du seuil choisi, dont l'optimum ($R^2 = 0.8$) se situe entre 5 et 10 mm suivant la surface considérée (excepté en ponctuel, dont le cas est traité plus loin). Plus cette surface est grande, plus le seuil optimal est faible (un cumul de 5 mm correspond à un événement plus important s'il s'agit d'une moyenne sur quelques milliers de km² que sur quelques centaines). Les pluies inférieures à 5 mm

polluant donc le pouvoir explicatif de la variable N , et un seuillage supérieur à 10 mm induit un rejet d'un nombre trop important d'événements pluvieux significatifs. L'analyse du coefficient de détermination de la relation entre le cumul annuel et la hauteur moyenne des jours pluvieux (H) met en évidence des valeurs élevées pour un seuil nul, diminuant très rapidement lorsque le seuil augmente (Fig. 7(b)). Le cumul moyen sur une surface est en effet très rarement nul pendant la saison des pluies, et ce d'autant plus que l'estimation de la valeur moyenne implique de nombreuses stations (et donc que cette surface est importante). Ainsi, en l'absence de seuil, le cumul moyen des jours pluvieux correspond pratiquement au cumul journalier moyen de la saison, expliquant l'artefact observé sur la Fig. 7(b). A l'échelle ponctuelle (sur la Fig. 7, station de Parakou), les résultats confirment le rôle prédominant du nombre d'événements dans le cumul annuel, puisque moyennant un très léger seuillage (pluies supérieures à 3 mm), la variance du cumul annuel est principalement expliquée par la variable N . Par la suite, on retiendra pour le seuil de pluies une valeur unique de 6 mm (prise en compte de 88–92% du cumul annuel suivant le bassin considéré), étant donnée la relativement faible sensibilité des résultats précédents à la surface observée.

Caractérisation temporelle et fréquentielle des déficits pluviométriques

Dans ce qui suit, le signal saisonnier est décomposé en deux variables: le nombre moyen de jours pluvieux sur une période donnée (N) et la hauteur moyenne des jours pluvieux (H) sur cette même période, pour des pluies seuillées à 6 mm. Deux périodes composites d'égale longueur (26 ans) sont définies, l'une composée des années les plus humides (P'_H) et l'autre des années les plus sèches (P'_S). Comme précédemment, les résultats sont présentés à partir d'une fenêtre glissante de 11 jours. La Fig. 8 résume les résultats obtenus sur le plus petit des bassins (BV1—586 km², Fig. 8(a)) et le plus grand (BV2—14 400 km², Fig. 8(b)), pour les périodes P'_H et P'_S . Quelle que soit la superficie, les années sèches se caractérisent par un déficit du nombre de jours pluvieux (N) durant toute la saison, plus particulièrement marqué après le saut de mousson (fin juin), c'est-à-dire au cours du régime continental. Les pluies sont les plus fréquentes début septembre quelle que soit la période considérée, et leur occurrence chute en moyenne plus tôt les années sèches. La hauteur moyenne des jours pluvieux (H) est moins touchée, mais un certain déficit est observable, en particulier en début (juin–juillet) et fin de saison (septembre–octobre). Le Tableau 2 résume ces résultats pour les quatre sous-bassins, en distinguant les précipitations de part et d'autre du saut de mousson. On peut en particulier noter la plus forte diminution des hauteurs de

Tableau 2 Evolution du nombre moyen de jours pluvieux (N) et du cumul journalier moyen (H) entre les composites d'années humides et d'années sèches, pour quatre superficies différentes. Découpage de la saison autour de la date moyenne du saut de mousson. Pluies seuillées à 6 mm.

Superficie (km ²)	N		H	
	Océanique	Continental	Océanique	Continental
586	-12%	-21%	-16%	-10%
2 383	-10%	-24%	-17%	-12%
10 050	-10%	-25%	-16%	-13%
14 400	-14%	-24%	-14%	-14%

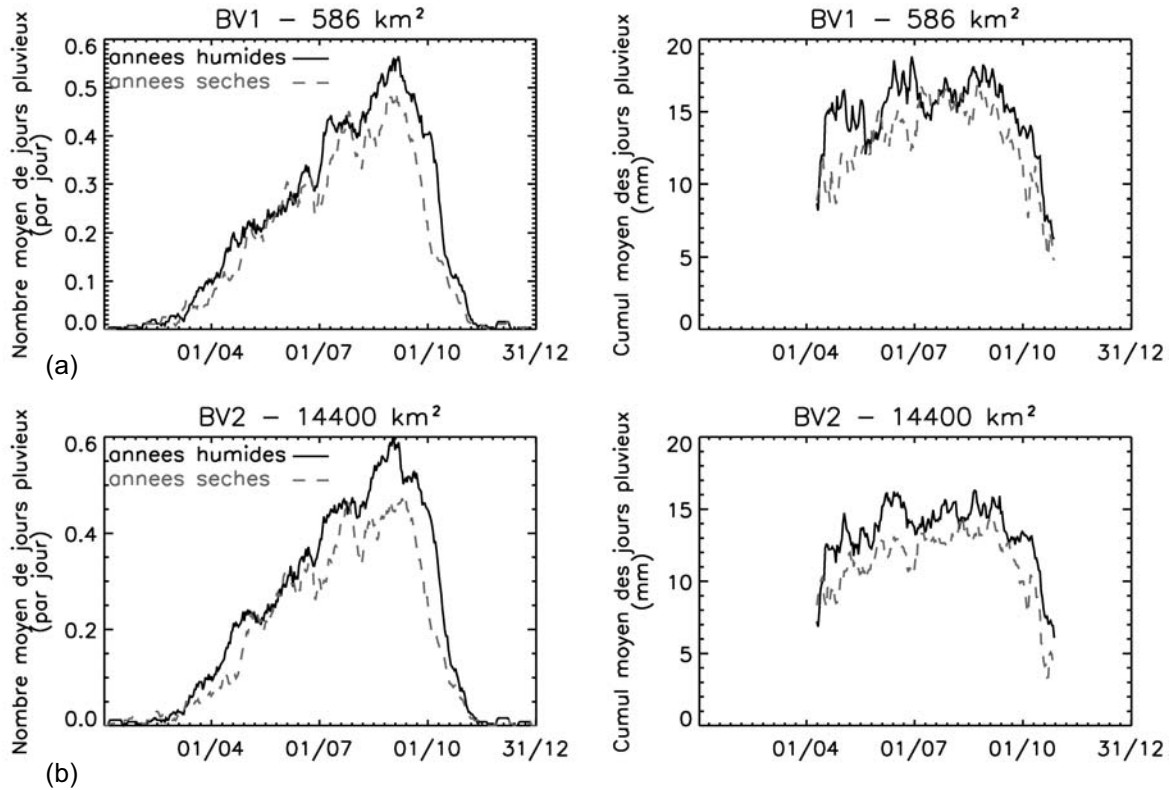


Fig. 8 Fréquence (à gauche) et cumul moyen (à droite) des jours pluvieux au cours de la saison, pour les composites des 26 années les plus humides (P'_H) et les plus sèches (P'_S) de la période 1950–2002. Résultats en moyenne glissante sur 11 jours, pour: (a) le bassin BV1 (586 km²); (b) le bassin BV2 (10 050 km²).

pluies moyennes (H) avant le saut de mousson qu'après ce saut. La faible sensibilité des résultats à la surface d'intégration peut être interprétée comme une conséquence de la plage de superficie des bassins étudiés (de 586 à 14 400 km²), qui, au regard de la taille des systèmes convectifs sur la région (organisés en lignes de grain, ils peuvent atteindre une étendue de 50 par 300 km) et de leur vitesse de déplacement (environ 60 km h⁻¹), est relativement limitée. Dans ce qui suit, seuls les résultats obtenus sur le bassin de 14 400 km² sont donc présentés.

L'importance relative de la diminution du nombre de jours pluvieux et de la baisse de leur cumul moyen sur le déficit pluviométrique des années sèches peut être quantifiée en posant:

$$\Delta P = P_S - P_H = H_S N_S - H_H N_H$$

où P_H et P_S sont les cumuls annuels moyens des pluies seuillées sur les périodes P'_H et P'_S (valeurs intégrées spatialement); H_H et H_S sont les hauteurs journalières moyennes des pluies seuillées sur les périodes P'_H et P'_S (valeurs intégrées spatialement); et N_H et N_S sont les nombres moyens de jours pluvieux (pluies seuillées) sur les périodes P'_H et P'_S . Cette relation peut être réécrite sous la forme:

$$\Delta P = H_{\text{moy}} \Delta N + N_{\text{moy}} \Delta H$$

Chaque terme de la relation correspond alors à la contribution des deux variables ΔN et

Tableau 3 Poids relatifs moyens de N et H dans le déficit pluviométrique entre composites d'années humides et sèches, sur l'ensemble de l'OHHVO (14 400 km²). Pluies seuillées à 6 mm.

	$H_{\text{moy}}\Delta N/\Delta P$	$N_{\text{moy}}\Delta H/\Delta P$
Océanique	57%	43%
Continental	74%	26%
Totalité saison	69%	31%

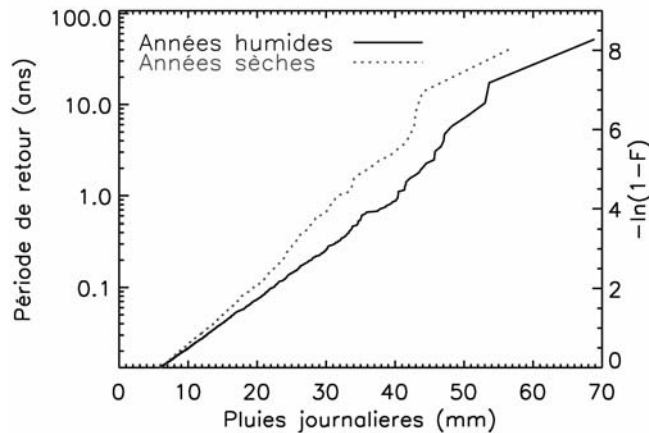


Fig. 9 Distributions conditionnelles des cumuls pluviométriques journaliers supérieurs à 6 mm sur l'OHHVO, pour les composites d'années humides (P'_H) et sèches (P'_S). F est la fréquence empirique au non dépassement.

ΔH au déficit pluviométrique. Le Tableau 3 compare ces contributions, en distinguant les deux régimes de mousson. La diminution du nombre de jours de pluie contribue à plus des deux tiers du déficit pluviométrique annuel, contre une contribution deux fois plus faible de la diminution des hauteurs journalières. D'autre part, ce poids prépondérant de ΔN est encore renforcé pendant la seconde partie de la saison (ΔN explique alors environ 75% du déficit pluviométrique).

La caractérisation des déficits pluviométriques suppose enfin de connaître les cumuls événementiels concernés. Les distributions empiriques conditionnelles des cumuls journaliers supérieurs à 6 mm, observées pour les deux périodes P'_H et P'_S à partir des moyennes spatiales sur l'OHHVO, sont représentées sur la Fig. 9. Ces distributions, dont l'ajustement graphique avec une loi exponentielle est évident, sont nettement distinctes, en particulier pour les cumuls importants. Les années sèches se traduisent donc par un déficit de gros événements pluvieux, généralement associés aux systèmes convectifs de méso-échelle (SCM). Trois classes de cumuls journaliers sont discriminées: $H < 6$ mm (pluies non observées précédemment), $6 < H < 30$ mm (événements de grande et moyenne taille), et $H > 30$ mm (très gros événements, générateurs importants de ruissellement). La contribution de chacune de ces classes au cumul annuel moyen des périodes P'_H et P'_S (Tableau 4) est observée, en distinguant les deux régimes de mousson. La contribution relative des cumuls supérieurs à 30 mm au cumul annuel passe ainsi de 11% pour la période P'_H à 4% pour P'_S , essentiellement au profit des cumuls inférieurs à 6 mm, non touchés par le déficit pluviométrique. La classe de cumuls intermédiaire conserve par contre la même importance relative dans le cumul annuel pour ces deux périodes. Les cumuls importants sont en recul avant

Tableau 4 Contributions moyennes (pourcentage du cumul annuel) de différentes classes de cumuls journaliers, pour les composites d'années humides (P'_H) et d'années sèches (P'_S), sur l'ensemble de l'OHHVO (14 400 km²).

	$P < 6$ mm		$6 \text{ mm} < P < 30$ mm		$P > 30$ mm	
	Océanique	Continental	Océanique	Continental	Océanique	Continental
P'_H	7%	11%	20%	51%	3%	8%
P'_S	9%	14%	22%	50%	1%	3%

comme après le saut de mousson, et ce dans une même proportion. L'analyse conjointe de ces différents résultats confirme donc le rôle prépondérant de la diminution de l'occurrence des SCM sur la région, tout comme on l'observe au Sahel (Laurent & Lebel, 1998).

CONCLUSIONS

En Afrique de l'Ouest, les précipitations sont caractérisées par différents modes de variabilité spatiales et temporelles, qui imposent une grande rigueur dans leur caractérisation. Le site de la Haute Vallée de l'Ouémé est un observatoire privilégié du cycle hydrologique, sur lequel une étude fine du régime pluviométrique est possible pour comprendre les interactions entre la mousson et les surfaces continentales en climat soudanien. En ce sens, la mise en évidence de l'évolution du cycle saisonnier des précipitations depuis 1950 est un résultat important. L'apparition de plus en plus précoce du régime de mousson continental et du pic de pluies associé, déjà mise en évidence dans les régions sub-sahéliennes par Le Barbé *et al.* (2002) entre les périodes 1950–1970 et 1971–1990, est ici étudiée jusqu'en 2002. Le glissement progressif observé depuis cinquante ans se poursuit encore aujourd'hui. Dans ces conditions, la dernière décennie, plus humide que les années 1970 et 1980, ne peut être considérée comme la fin de l'épisode sec, dans la mesure où le forçage atmosphérique semble avoir été plus durablement modifié. Ce travail a aussi permis de caractériser les années sèches et humides aux échelles pertinentes pour l'observation et la modélisation du cycle hydrologique. La diminution du nombre d'événements pluvieux au coeur de la saison, pointée par Le Barbé *et al.* (2002) comme principale cause du déficit pluviométrique des années sèches en Afrique de l'Ouest, est une information robuste à l'intégration à l'échelle du bassin versant et au pas de temps journalier. Notre approche nous a en outre permis de quantifier l'importance relative de l'occurrence des jours pluvieux et des cumuls associés à ces jours pluvieux dans la variabilité des cumuls annuels. Les deux régimes de pluies montrent des résultats différents: alors que la variabilité de la saison continentale est très largement expliquée par l'occurrence des pluies (à près de 75%), celle de la saison océanique correspond à une diminution comparable de l'occurrence des pluies et de leurs cumuls. Enfin, l'importance de l'effet de seuil, lié aux interactions d'échelles entre le phénomène observé, sa mesure et sa caractérisation, a été dégagée. Ainsi caractérisée, l'évolution du régime pluviométrique fournit des informations de première importance pour construire des scénarios climatiques pertinents, réaliser des simulations d'impacts hydrologiques réalistes, et mieux comprendre le rôle de la distribution intra-saisonnière des précipitations sur la réponse des bassins versants (Le Lay & Galle, 2005).

Remerciements Ces recherches ont été financées dans le cadre du programme international AMMA. Les auteurs remercient Thierry Lebel pour sa relecture avisée, ainsi que Hélène Niel dont les remarques pertinentes ont contribué à l'amélioration de la qualité de cet article.

REFERENCES

- Balme, M., Lebel, T. & Amani, A. (2005) Années sèches et années humides au Sahel: Quo vadis? *Hydrol. Sci. J. (soumis pour publication)*.
- Cappelaere, B., Vieux, B. E., Peugeot, C., Maia, A. & Séguis, L. (2003) Hydrologic process simulation of a semi-arid, endoreic catchment in Sahelian West Niger. 2. Model calibration and uncertainty characterization. *J. Hydrol.* **279**, 244–261.
- Eltahir, E. & Gong, C. (1996) Dynamics of wet and dry years in West Africa. *J. Climate* **9**, 1030–1042.
- Fontaine, B. & Janicot, S. (1996) Sea surface temperature fields associated with west African rainfall anomaly types. *J. Climate* **9**, 2935–2940.
- Hubert, P., Carbonnel, J. & Chaouche, A. (1989) Segmentation des séries hydrométéorologiques—application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *J. Hydrol.* **110**, 349–367.
- Laurent, H. & Lebel, T. (1998) How important is the contribution of the mesoscale convective complexes to the Sahelian rainfall? *Phys. Chem. Earth* **23**, 629–633.
- Le Barbé, L. & Lebel, T. (1997) Rainfall climatology of the Hapex-Sahel region during the years 1950–1990. *J. Hydrol.* **188/189**, 43–73.
- Le Barbé, L., Lebel, T. & Tapsoba, D. (2002) Rainfall variability in West Africa during the years 1950–90. *J. Climate* **15**(2), 187–202.
- Lebel, T., Diedhiou, A. & Laurent, H. (2003) Seasonal cycle and interannual variability of the sahelian rainfall at hydrological scales. *J. Geophys. Res.* **108**(D8), 8389 doi:10.1029.
- Le Lay, M. & Galle, S. (2005) How changing rainfall regimes may affect the water balance: a modelling approach in West Africa. In: *Regional Hydrological Impacts of Climate Change—Hydroclimatic Variability* (ed. by S. Franks, T. Wagener, E. Bøgh, H. V. Gupta, L. Bastidas, C. Nobre & C. de Oliveira Galvão) (Proc. Foz do Iguaçu Symp., April 2005), 203–210. IAHS Publ. 296, IAHS Press, Wallingford, UK.
- L'Hôte, Y., Mahé, G., Somé, B. & Triboulet, J. P. (2002) Analysis of a Sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000; the drought continues. *Hydrol. Sci. J.* **47**(4), 563–572.
- Lubès-Niel, H., Séguis, L. & Sabatier, R. (2001) Etude de la stationnarité des caractéristiques des événements pluvieux de la station de Niamey sur la période 1956–1998. *C. R. Acad. Sci. Paris* **333**, 645–650.
- Mahé, G., L'Hôte, Y., Olivry, J. & Wotling, G. (2001) Trends and discontinuities in regional rainfall of west and central Africa. *Hydrol. Sci. J.* **46**(2), 211–226.
- Nicholson, S. & Palao, I. (1993) A re-evaluation of rainfall variability in the Sahel. Part 1. Characteristics of rainfall fluctuations. *Int. J. Climatol.* **13**, 371–389.
- Ozer, P., Erpicum, M., Demarée, G. & Vandiepenbeeck, M. (2003) The Sahelian drought may have ended during the 1990s. *Hydrol. Sci. J.* **48**(3), 489–492.
- Paturel, J. E., Servat, E., Kouamé, B., Lubès, H., Ouedraogo, M. & Masson, J. (1997) Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea. Part 2: An integrated regional approach. *J. Hydrol.* **191**, 1–15.
- Peugeot, C., Cappelaere, B., Vieux, B. E., Séguis, L. & Maia, A. (2003) Hydrologic process simulation of a semi-arid, endoreic catchment in Sahelian West Niger. 1. Model-aided data analysis and screening. *J. Hydrol.* **279**, 224–243.
- Servat, E., Paturel, J.E., Lubès-Niel, H., Kouamé, B., Masson, J., Travaglio, M. & Marieu, B. (1999) De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'ouest et centrale non sahélienne. *Rev. Sci. Eau* **12**(2), 363–387.
- Shinoda, M., Okatani, T. & Saloum, M. (1999) Diurnal variations of rainfall over Niger in the West African Sahel: a comparison between wet and drought years. *Int. J. Climatol.* **19**, 81–94.
- Sultan, B., & Janicot, S. (2003). The West African monsoon dynamics. Part 2: The 'preonset' and 'onset' of the summer monsoon. *J. Climate* **16**, 3407–3427.
- Vieux, B., Looper, J., Cappelaere, B., Peugeot, C. & Maia, A. (1998) Exploring climatic impacts on water resources in West Niger, Africa. In: *Water Resources Variability in Africa during the XXth Century* (ed. by E. Servat, D. Hughes, J.-M. Fritsch & M. Hulme) (Proc. Abidjan Conf., November 1998), 347–354. IAHS Publ. 252, IAHS Press, Wallingford, UK.
- Varado, N. (2004) Contribution au développement d'une modélisation hydrologique distribuée. Application au bassin versant de la Donga, au Bénin. Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, France.

Reçu le 10 décembre 2004; accepté le 11 mars 2005