

Le retour d'une période humide au Sahel ?

Observations et perspectives

*Théo VISCHEL, Thierry LEBEL,
Gérémy PANTHOU, Guillaume QUANTIN,
Aurélien ROSSI, Maxime MARTINET*

Introduction

La question de l'évolution des précipitations est de première importance au Sahel, région où les pluies sont au cœur des préoccupations sociétales. En déficit, elles affectent la disponibilité de la ressource en eau et les rendements d'une agriculture encore majoritairement pluviale. En excès, elles peuvent provoquer des événements hydrologiques extrêmes préjudiciables pour les populations de plus en plus exposées au risque inondation. Les précipitations sont par ailleurs la signature des processus atmosphériques et environnementaux qui régulent la mousson d'Afrique de l'Ouest, elle-même composante du système climatique global. L'évolution des précipitations se situe donc à l'articulation entre la variabilité du climat et son impact sur les populations. La caractériser est essentiel pour appréhender les risques liés à l'eau et anticiper leur devenir dans un climat global changeant.

Suite à la forte implication de la communauté scientifique internationale notamment à la fin des années 1970, des avancées majeures ont été réalisées sur la compréhension des mécanismes de la mousson ouest-africaine, notamment grâce à une étude approfondie du régime des pluies au Sahel. À la simple description qui a longtemps prévalu dans les atlas climatologiques de la saison des pluies, échelonnée de juin à septembre, et du cumul annuel réparti selon un gradient latitudinal allant de 200 mm au nord à 700 mm au sud (ces isohyètes étant souvent proposées comme délimitation climatologique du Sahel), s'ajoutent des connaissances approfondies sur l'évolution à long terme du régime des pluies, des échelles interannuelle à intra-saisonnière, montrant notamment des disparités au sein du Sahel.

L'évolution des cumuls annuels de pluie a été étudiée par de nombreux scientifiques alertés par les pics de sécheresse des années 1972-1973 et les famines dramatiques qui les ont accompagnés. Les premiers travaux sur l'évolution des pluies au Sahel ont cherché sans succès les signes d'une cyclicité dans la variabilité interannuelle (BUNTING *et al.*, 1976). Les questions se sont ensuite recentrées sur la mise en place de la sécheresse à la fin des années 1960, puis sur les signes et les causes de sa persistance (LAMB, 1982 ; HULME, 1992 ; FONTAINE et JANICOT, 1996 ; NICHOLSON, 2001 ; GRIST et NICHOLSON, 2001). L'actualisation des données de pluie à la décennie 1990 a confirmé un contraste fort entre une période relativement humide jusqu'à la fin des années 1960, immédiatement suivie d'une baisse abrupte et persistante de la pluviométrie (LE BARBÉ et LEBEL, 1997). Ces études ont mis en évidence le caractère régional de la sécheresse à l'échelle du Sahel illustrée par un glissement vers le sud des isohyètes annuelles (baisse échelonnée de 20 % au sud du Sahel à 50 % au nord) (LEBEL *et al.*, 2003). Beaucoup de travaux ont montré la significativité statistique de cette baisse brutale de la pluviométrie sur différentes régions du Sahel (HUBERT et CARBONNEL, 1987 ; DEMARÉE, 1990 ; TARHULE et WOO, 1998). La mise en perspective de cette évolution dans un contexte global (RASMUSSEN et ARKIN, 1993) permet désormais de considérer la grande sécheresse sahélienne comme le changement climatique le plus étendu et le plus intense jamais mesuré au monde (HULME, 2001).

À la fin des années 1990, la question d'un retour à des conditions plus humides a émergé et suscité la controverse (NICHOLSON, 2013). La mise en évidence d'un reverdissement généralisé de la couverture végétale sur la région sahélienne (cf. chap. 6, ce volume) semble également soutenir l'hypothèse d'un rétablissement des précipitations. Dès lors, un obstacle majeur pour documenter de façon quantitative et fiable l'évolution des pluies sur les deux dernières décennies est la difficulté d'accès aux données après 1990 : d'une part, car les réseaux météorologiques nationaux se sont dégradés (PANTHOU *et al.*, 2012) ; d'autre part, car les pays d'Afrique de l'Ouest montrent une certaine réticence à partager leurs données (TARHULE et WOO, 1998). NICHOLSON (2013) considère que ce problème de données est à l'origine du faible nombre d'études sur l'évolution des pluies sur la période récente et contribue aux zones d'ombre qui pèsent encore sur notre connaissance de la climatologie au Sahel.

Ce chapitre fait une synthèse de résultats récents sur l'évolution des précipitations au Sahel, notamment sur les vingt dernières années. Dans une première partie, on montrera que des signes de reprise des pluies existent, mais qu'ils sont très relatifs et qu'ils présentent des disparités régionales. On verra dans une deuxième partie que la notion de reprise est très dépendante de l'échelle à laquelle on l'étudie, notamment dès lors que l'on considère les systèmes convectifs de méso-échelle, échelle clé du lien climat-impact. Dans la troisième partie, on se focalisera sur l'évolution des pluies à l'échelle des impacts hydrologiques et agronomiques. On fournira des éléments sur l'évolution des caractéristiques des événements pluvieux, en particulier les plus extrêmes longtemps ignorés dans la littérature et qui apportent un regard neuf sur le tournant pris par la climatologie des pluies sur les deux dernières décennies. Un bilan sera dressé dans une dernière partie, permettant de fournir quelques pistes de recherche à renforcer.

La reprise de la pluviométrie au Sahel : disparités régionales à l'échelle annuelle

Revue sur la variabilité décennale récente

Le cumul annuel des précipitations est l'indicateur le plus utilisé pour décrire l'évolution à long terme des pluies. Dans la plupart des études, les anomalies annuelles de pluie sont estimées en calculant un indice de précipitation standardisé (SPI) (ALI et LEBEL, 2009). Le SPI permet de distinguer les années supérieures et inférieures à la moyenne climatologique et de dégager à partir de la variabilité interannuelle et décennale les grands traits de l'évolution des pluies (fig. 1).

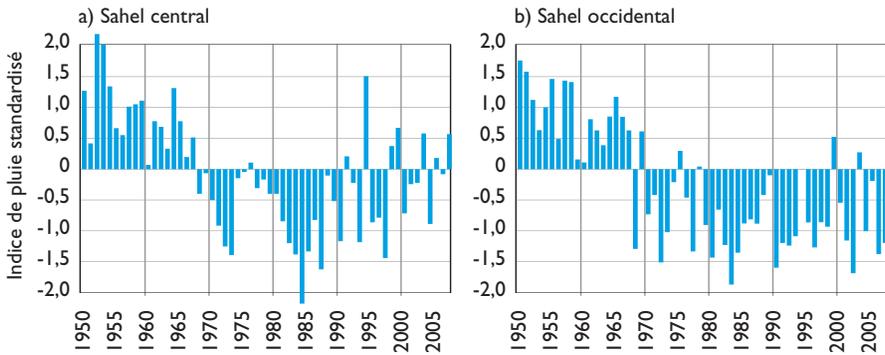


Figure 1.

Anomalies de précipitations (Indice standardisé de précipitations) calculées en référence à la période 1950-1989 sur le Sahel central (a) et sur le Sahel occidental (b). D'après LEBEL et ALI (2009).

Au début des années 2000, la question de la persistance ou de la fin de la sécheresse a fait l'objet d'un débat. En analysant le SPI de la pluie annuelle à l'échelle du Sahel jusqu'en 2000, L'HOTE *et al.* (2002) soutiennent que les conditions sèches sont encore prédominantes à la fin des années 1990. OZER *et al.* (2003) réfutent ces conclusions affirmant au contraire que la sécheresse a pris fin au milieu des années 1990. En étendant la période d'étude jusqu'en 2003, DAI *et al.* (2004) et NICHOLSON (2005) constatent effectivement une tendance à l'augmentation de la pluie sur le Sahel, mais soulignent que la pluie moyenne sur la période récente reste largement inférieure au niveau de la période humide 1950-1970. À partir d'un réseau de pluviomètres regroupant un grand nombre des stations des services météorologiques nationaux des pays du Sahel sur la période 1950-2007, ALI et LEBEL (2009) montrent que la sécheresse persiste après 1994, mais qu'il existe des différences dans l'évolution récente de la pluie au sein du Sahel. Sur la figure 1a extraite de LEBEL et ALI (2009), on remarque ainsi que sur le Sahel central (défini sur la fenêtre 11° N-17° N ; 0° -5° E), s'il existe effectivement une atténuation des déficits de pluie

après 1990, celle-ci est teintée d'une forte variabilité interannuelle et que le niveau moyen des pluies reste bien inférieur à celui de la période humide 1950-1970. En revanche, sur le Sahel occidental (défini sur la fenêtre 11° N-17° N ; 15° W-10° W) (fig. 1b), la majorité des années reste déficitaire à un niveau moyen similaire à celui des deux décennies sèches précédentes.

Depuis, plusieurs études sont venues confirmer l'évolution constatée par LEBEL et ALI (2009). MAHÉ et PATUREL (2009) proposent également de distinguer l'évolution des pluies entre l'est du Sahel en reprise modérée, et l'ouest du Sahel qui reste sec. Au Burkina Faso, IBRAHIM *et al.* (2012) et LODOUN *et al.* (2013) constatent une hausse progressive des pluies annuelles dès la fin des années 1980 sans que les conditions humides des décennies 1950 et 1960 ne soient retrouvées. LODOUN *et al.* (2013) font état d'une très forte variabilité interannuelle, signe d'une alternance rapprochée d'années sèches et humides qui se différencie des périodes précédentes. Ce comportement est également visible dans la région du Gourma malien (FRAPPART *et al.*, 2009), et plus généralement sur la partie sahélienne du bassin du fleuve Niger (TARHULE *et al.*, 2014).

Variabilité des caractéristiques de la saison

L'évolution décennale du cycle saisonnier des précipitations permet de mettre en évidence d'autres différences notables entre le Sahel central et occidental.

Sur le Sahel central, on différencie usuellement cinq phases dans le cycle saisonnier des précipitations (LEBEL *et al.*, 2003 ; SULTAN *et al.*, 2003) qui se dessinent distinctement sur la figure 2a pour la période 1950-1969 : (1) la mise en place de la mousson dans sa phase océanique produit une augmentation progressive de la pluie de début avril à fin mai ; (2) la pluie se stabilise au mois de juin ; (3) il y a une augmentation rapide des cumuls fin juin qui correspond au saut de mousson ; (4) la phase continentale de la mousson s'accompagne d'une augmentation régulière jusqu'à un maximum en août qui se produit après une légère stabilisation en juillet ; (5) la pluie diminue ensuite régulièrement jusqu'à fin octobre avec le retrait de la mousson. Au Sahel occidental (fig. 2b), le signal saisonnier n'est pas marqué par le saut de mousson et présente donc principalement trois phases avec une mise en place de la mousson suivie d'une augmentation régulière jusqu'à début septembre et d'une rapide diminution de la pluie.

L'analyse de l'évolution décennale du signal saisonnier (fig. 2) montre que ces phases restent visibles sur toutes les périodes sauf pour la période sèche (1970-1989) sur le Sahel central caractérisée par : (1) un lissage des pics en juin et juillet masquant ainsi l'influence du saut de mousson ; (2) un maximum des pluies bien inférieur à celui de la période humide (1950-1969) et positionné vingt jours plus tôt. Sur le Sahel occidental, la diminution de la pluie lors de la période sèche est en revanche répartie de façon beaucoup plus homogène tout au long de la saison.

La figure 2 permet de constater que le signal saisonnier sur la période récente (1990-2007) est plus proche de celui de la période sèche (1970-1989) que de celui de la période humide (1950-1969). En particulier sur le Sahel central, la forte baisse

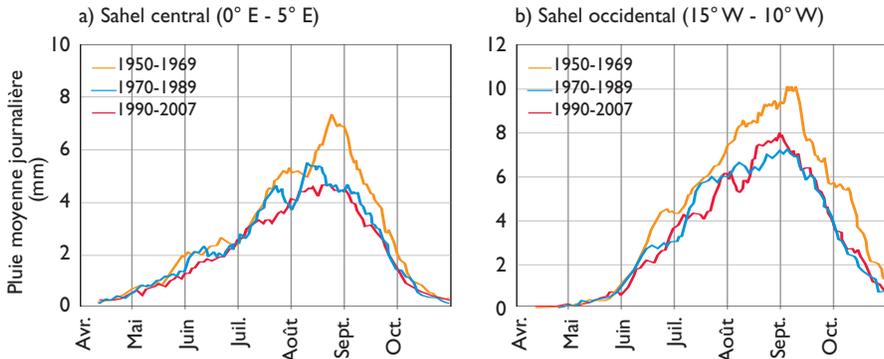


Figure 2.

Évolution décennale du signal saisonnier sur le Sahel central (a) et sur le Sahel occidental (b).
D'après LEBEL et ALI (2009).

de la pluviométrie au mois d'août et le décalage du pic de la saison observé durant la période 1970-1989 perdurent dans les années les plus récentes. Ce comportement confirme les résultats de NICHOLSON (2005) et souligne à nouveau le caractère très relatif de la reprise.

Sur le Sahel central, on distingue trois pics sur la période la plus récente en juin, juillet et août qui atteignent le niveau du signal 1950-1969, sans pour autant se maintenir comme lors de la période humide. Un point intéressant est l'opposition de phase entre ces trois pics et ceux que l'on distingue sur la même période au Sahel occidental qui peut suggérer la mise en place d'un dipôle est-ouest durant la phase continentale de la mousson.

Enfin LEBEL et ALI (2009) notent que la durée de la saison des pluies (définie par les jours de pluies supérieures à 1 mm) est quasiment identique pour toutes les périodes. Ce constat est partagé par IBRAHIM *et al.* (2012) au Burkina Faso et confirme les résultats de BALME *et al.* (2005) au Niger qui montrent qu'il n'y a pas de corrélation significative entre le cumul annuel et la durée de la saison des pluies.

La reprise de la pluviométrie au Sahel : une question d'échelle

Systemes convectifs de méso-échelle : une échelle clé du lien climat-impact

Les pluies au Sahel sont produites par des systèmes orageux de grande extension spatiale se propageant d'est en ouest à quelques dizaines de kilomètres par heure, nommés systèmes convectifs de méso-échelle (SCM). Les SCM expliquent 80 % de

la pluie annuelle, les 20 % restant résultant d'orages plus localisés (MATHON *et al.*, 2002). Une saison des pluies au Sahel correspond au passage d'une quarantaine de ces systèmes, ce qui rend la pluie très intermittente et fortement variable dans le temps et l'espace. BALME *et al.* (2006 b) montrent ainsi que 50 % de la pluie annuelle tombent en moins de 4 heures.

La genèse et le cycle de vie des systèmes précipitants au Sahel résultent de l'interaction de processus atmosphériques dans un continuum d'échelles allant du synoptique à la méso-échelle (REDELSPERGER *et al.*, 2006). Par ailleurs, comme nous le verrons plus loin, l'occurrence, l'intensité et l'extension spatiale des SCM modulent sur le long terme la variabilité interannuelle des précipitations (LE BARBÉ *et al.*, 2002 ; LEBEL *et al.*, 2003 ; BELL et LAMB, 2006) et conditionnent directement la répartition de l'eau en surface, en particulier la partition ruissellement-infiltration qui contrôle le cycle de l'eau et le bilan hydrologique. La méso-échelle associée aux SCM est donc considérée comme une échelle clé pour décrire la variabilité hydro-climatique au Sahel, à l'interface entre l'échelle des structures régionales qui gouvernent la mousson et l'échelle plus locale des impacts hydrologiques ou agronomiques (PEUGEOT *et al.*, 2003 ; VISCHEL et LEBEL, 2007 ; VISCHEL *et al.*, 2009 ; MASSUEL *et al.*, 2011).

Impact de la pluie de méso-échelle sur la notion d'année sèche et humide

Un effort particulier a été mené au cours des quinze dernières années pour caractériser la variabilité de la pluie à méso-échelle. La plupart des études sur le sujet reposent sur les données de l'observatoire Amma-Catch (Analyse multidisciplinaire de la mousson africaine-Couplage de l'atmosphère tropicale et du cycle hydrologique ; LEBEL *et al.*, 2009), seul observatoire en Afrique de l'Ouest fournissant des données pluviométrique à des pas de temps infra-journaliers densément réparties sur trois sites de méso-échelle (~ 10 000 km²) au Mali, au Niger et au Bénin. Les réseaux de pluie Amma-Catch ont d'ores et déjà permis de documenter la variabilité de la distribution en occurrence et en intensité (BALME *et al.*, 2006 b), la structure spatiale (GUILLOT et LEBEL, 1999 ; ALI *et al.*, 2003) et la propagation (DEPRAETERE *et al.*, 2009 ; VISCHEL *et al.*, 2011) des événements pluvieux associés aux SCM.

On retiendra dans ce chapitre un résultat notoire concernant la contribution des SCM à la variabilité pluviométrique régionale, qui alimente assez directement la question de la reprise et des hétérogénéités spatiales associées. Dans une étude récente, BALME *et al.* (2006 a) remettent en cause la notion d'années sèches et humides en comparant des cartes d'isohyètes annuelles tracées : (1) à l'échelle régionale à partir des données des réseaux pluviométriques nationaux peu denses (1 à 2 pluviomètres pour 10 000 km²) et (2) sur le réseau renforcé de l'observatoire Amma-Catch Niger (1 à 2 pluviomètres pour 500 km²). La figure 3a montre pour l'année 1992 qu'à l'échelle du Sahel la structure spatiale du champ de pluie est dominée par le gradient latitudinal régional (~ 1 mm par km). En revanche à l'échelle de l'observatoire, les hétérogénéités locales dominent par rapport au

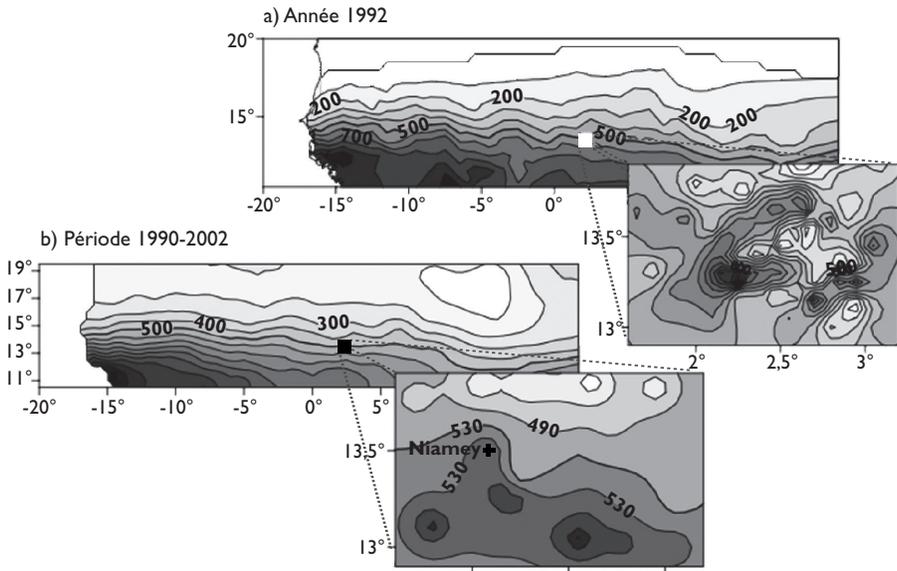


Figure 3.

*Isohyètes sur le Sahel (isohyètes espacées de 100 mm)
(données du réseau du CILSS de l'Agrhymet)*

et zoom à partir du réseau dense de l'observatoire Amma-Catch Niger.

(a) Cumul annuel pour l'année 1992 (extrait de BALME et al., 2006 a);

(b) cumul annuel moyen sur la période 1990-2002 (extrait de BALME et al., 2006 b).

gradient nord-sud, causées par le passage de quelques événements pluvieux dont la trace au sol détermine la répartition spatiale de la pluie, même à l'échelle annuelle. BALME *et al.* (2006 b) montrent que ce type d'organisation très contrastée se retrouve sur l'observatoire, quelle que soit l'année étudiée. Les forts gradients pluviométriques peuvent ainsi atteindre jusqu'à 275 mm pour des stations éloignées de 9 km (année 1998), ils se positionnent de façon aléatoire indépendamment de la configuration du réseau et sont présents aussi bien durant les années sèches que les années humides. Ces gradients sont tels qu'ils peuvent marquer l'organisation spatiale des champs de pluie à des échelles d'agrégation supérieures à 10 ans, comme le montre la figure 3b où l'on notera, par exemple, la présence d'une anomalie pluviométrique centrée sur le point de coordonnées (2,2° E, 13,25° N) résultant du fort cumul identifié au même point en 1992.

Par conséquent, la catégorisation en « année sèche » ou « année humide » et même « période sèche » ou « période humide », souvent proposée à l'échelle du Sahel pour caractériser l'évolution des pluies, s'avère peu pertinente à l'échelle locale de la station ou du village. Cela justifie d'aborder de façon spécifique l'évolution du régime des pluies aux échelles convectives au sein desquelles se déclinent les problématiques d'impact de la variabilité de la pluie.

Évolution de la pluie aux échelles des impacts hydrologiques et agronomiques

Évolution des caractéristiques des systèmes convectifs de méso-échelle depuis 1950

Le manque de données sur le long terme à des résolutions spatiales et temporelles appropriées rend difficile l'évaluation des changements de régime de précipitations à méso-échelle au cours des soixante dernières années.

Sur la base de données journalières disponibles au Niger, LE BARBÉ et LEBEL (1997) ont proposé une décomposition statistique des cumuls journaliers mesurés aux stations comme le produit de l'occurrence et de l'intensité des événements pluvieux. Ils ont ainsi montré que le déficit de la période 1970-1990 était plus lié à une baisse de l'occurrence des pluies, notamment au cœur de la saison, qu'à un changement de l'intensité moyenne des événements restée relativement stable au cours de la sécheresse. Ces résultats ont été généralisés à l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest (LE BARBÉ *et al.*, 2002) et confirmés depuis sur le Sénégal (MORON *et al.*, 2006), le Mali (FRAPPART *et al.*, 2009) et le Burkina Faso (IBRAHIM *et al.*, 2012 ; LODOUN *et al.*, 2013). Si ces études documentent utilement les événements pluvieux définis ponctuellement à l'échelle de la station pluviométrique, elles ne donnent en revanche pas d'indication sur de possibles modifications de la morphologie spatiale (taille ou organisation interne des intensités) des SCM. En définissant des critères spatiaux calibrés sur les réseaux de pluie journaliers à partir de données satellites infrarouges, BELL et LAMB (2006) essaient de détecter la trace au sol du passage des SCM non plus ponctuellement, mais de façon intégrée au sein des fenêtres de 5°x 5° réparties sur le Sahel. BELL et LAMB (2006) trouvent ainsi que sur la période de sécheresse les SCM sont caractérisés par une extension spatiale et une intensité bien inférieures à celles de la période humide. Si la diminution de l'extension spatiale des SCM est compatible avec la diminution locale (à l'échelle de la station) de l'occurrence des événements mise en évidence par LE BARBÉ *et al.* (2002), la baisse de leur intensité semble plutôt en contradiction avec les autres études menées sur la région.

Ce désaccord a conduit ROSSI *et al.* (2012) à reprendre une méthodologie similaire à celle de BELL et LAMB (2006), en actualisant l'analyse des caractéristiques des SCM aux années les plus récentes. ROSSI *et al.* (2012) détectent les « jours pluvieux de méso-échelle » (JPM) qui, comme dans BELL et LAMB (2006), correspondent à la trace des SCM mesurée au sol *via* les pluviomètres journaliers. En revanche contrairement à BELL et LAMB (2006), les critères de détection de ROSSI *et al.* (2012) sont directement calibrés sur les données pluviométriques à haute résolution du réseau Amma-Catch Niger qui fournissent une référence fiable de détection de la trace au sol des SCM. ROSSI *et al.* (2012) montrent notamment que l'évolution relative des caractéristiques des JPM sur la période 1990-2010 est similaire à celle des SCM, et donc que l'utilisation des JPM pour caractériser l'évolution à long terme de la pluie à méso-échelle est tout à fait pertinente.

On analyse ici à partir des critères de ROSSI *et al.* (2012) l'évolution des JPM sur la période 1950-2010 sur une fenêtre du Sahel central, telle que définie par LEBEL et ALI (2009). La figure 4 montre l'évolution des anomalies (variables standardisées) de quatre caractéristiques des JPM : l'occurrence moyenne, l'extension spatiale moyenne, l'intensité moyenne des valeurs de pluies positives au sein des JPM et l'intensité moyenne des JPM (intégrant valeurs de pluies positives et nulles). Il est à noter que les valeurs de pluie nulles correspondent à l'intermittence interne des SCM (ALI *et al.*, 2003), leur fréquence au sein des systèmes pluvieux est utilisée pour décrire l'extension spatiale de JPM. Le tableau 1 fournit une synthèse des valeurs des caractéristiques des JPM moyennées par sous-périodes de 20 ans. On retrouve dans le tableau 1 le déficit bien connu des pluies totales annuelles lors de la période sèche 1970-1989 (P2), également visible sur le cumul annuel des JPM (représentant un peu plus de 80 % de la pluie totale). Ce déficit résulte au premier ordre d'une diminution forte de l'occurrence (- 19 %) qui s'installe dès les années 1970 et s'accroît de façon marquée au début des années 1980. L'intensité moyenne des pluies non nulles au sein des JPM semble avoir également contribué à la sécheresse, mais de façon moindre puisqu'elle ne baisse que de 8 %, notamment à cause de trois années (1968, 1973 et 1984) particulièrement déficitaires. Enfin, comme BELL et LAMB (2006), une diminution de l'extension spatiale moyenne des JPM est constatée (- 5 %), notamment sur la décennie 1980-1990. La contribution majoritaire de la baisse de l'occurrence des SCM au cours de la sécheresse est en accord avec les travaux de LE BARBÉ *et al.* (2002), d'autant plus que la diminution de l'occurrence combinée avec celle de l'extension spatiale des SCM implique *de facto* une baisse du nombre d'événements pluvieux mesurés à la station pluviométrique. Par ailleurs, la diminution de l'extension des SCM associée à la baisse relative des intensités de pluie positives, produit une diminution de la pluie moyenne globale des

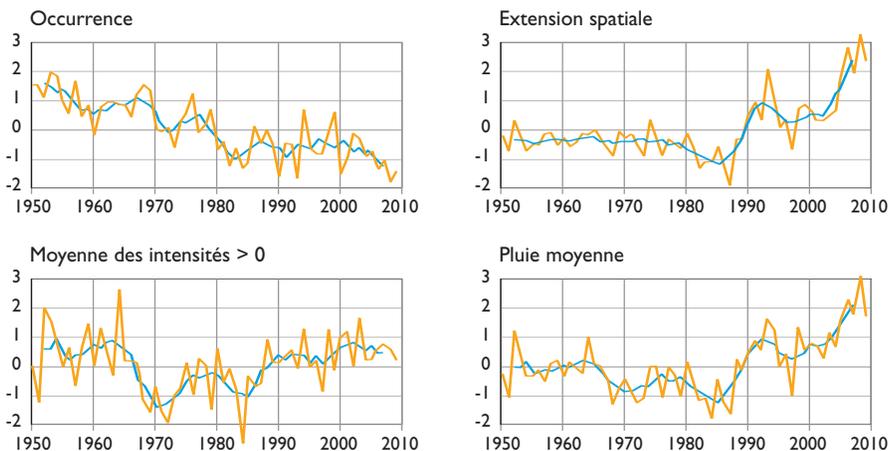


Figure 4.

Évolution des caractéristiques des systèmes convectifs de méso-échelle estimés à partir des jours pluvieux de méso-échelle (JPM) définis par Rossi *et al.* (2012). Les lignes en bleu représentent une moyenne glissante sur 5 ans.

SCM (- 12 %), mais celle-ci est secondaire par rapport aux effets d'occurrence, contrairement à ce que suggèrent BELL et LAMB (2006).

Sur les deux dernières décennies (période P3), la hausse relative des cumuls annuels (+ 13 % par rapport à P2) est confirmée mais, comme désormais bien documenté dans la littérature, le niveau atteint reste bien inférieur à celui de la période humide P1 (- 16 %). La nouveauté réside ici dans l'évolution des caractéristiques de systèmes pluvieux à méso-échelle. L'occurrence des JPM continue à décroître après la période sèche, en restant à un niveau faible équivalent à celui de la période sèche jusqu'en 2000, puis en déclinant à nouveau sur la dernière décennie. L'intensité des pluies non nulles reprend un niveau moyen stable proche de la période humide P1. Enfin, une hausse singulière de l'extension spatiale moyenne des JPM est constatée jusqu'à des valeurs jamais atteintes depuis 1950. L'augmentation de l'intensité et de la taille des systèmes se combine pour donner une valeur de pluie moyenne des JPM près de 14 % supérieure à ce qu'elle était en période humide. Par conséquent, alors que la variabilité décennale de la pluie sur la période 1950-1990 était principalement modulée par l'occurrence des systèmes pluvieux (la diminution du nombre d'événements expliquant plus de 70 % du déficit pluviométrique), les changements d'intensité et d'extension spatiale des systèmes sur les deux dernières décennies dominent sur la diminution de l'occurrence et expliquent l'augmentation des cumuls annuels de précipitation. Ce comportement marque de toute évidence un tournant dans la climatologie des précipitations au Sahel et pose la question d'une possible intensification des pluies à laquelle on ne peut répondre sans une analyse approfondie des événements extrêmes.

Tableau 1.
Caractéristiques moyennes des jours pluvieux de méso-échelle (JPM).

		P1 1950-1696	P2 1970-1989	P3 1990-2009
Pluie tot. annuelle	(mm)	664,2	490,0 (- 21,6 %)	553,7 (- 16,6 %, 13 %)
JPM Cumul annuel	(mm)	537,8	404,2 (- 24,8 %)	451,2 (- 16,1 %, 11,6 %)
Occurrence	(nombre/an)	88,7	71,95 (- 18,9 %)	60,4 (- 31,9 %, - 16,0 %)
Intensités > 0	(mm)	14,8	13,6 (- 8,1 %)	15,2 (2,7 %, 11,7 %)
Intensités ≥ 0	(mm)	6,5	5,7 (- 12,3 %)	7,4 (13,85 %, 29,8 %)
Extension spatiale	(% intensités > 0)	43,2	41,2 (- 4,6 %)	48,9 (13,2%, 18,7%)

Les pourcentages entre parenthèses sur les colonnes P2 et P3 représentent les changements relatifs en référence à la période P1 (italique) et P2 (italique souligné).

Évolution du régime des précipitations extrêmes

Quelques études récentes menées principalement à l'échelle des pays du Sahel central viennent appuyer les résultats présentés précédemment et suggèrent une augmentation des pluies les plus fortes à partir de l'évolution de la moyenne des intensités pluvieuses qui augmente parfois de façon singulière (LEBEL et ALI, 2009 ;

FRAPPART *et al.*, 2009 ; LODOUN *et al.*, 2013) ou de l'évolution des valeurs de pluies maximales journalières annuelles (IBRAHIM *et al.*, 2012). Pour autant, il n'existe que très peu d'analyses spécifiques sur les pluies les plus intenses dans la région. La faible documentation disponible sur les extrêmes pluviométriques au Sahel contraste fortement avec le nombre d'études sur la variabilité pluviométrique en lien avec les épisodes secs qui touchent la région (TSCHAKERT *et al.*, 2010). Jusqu'à très récemment, on ne recensait que deux études sur l'analyse climatologique des précipitations extrêmes en Afrique de l'Ouest. Sur la période 1950-2006, NEW *et al.* (2006) ont analysé six stations journalières sur l'Afrique de l'Ouest (2 en Gambie et 4 au Nigeria) ne montrant de tendances significatives (à la hausse) des pluies maximales journalières annuelles que sur une station. PAETH *et al.* (2010) ont décrit en détail les précipitations de l'année 2007 qui ont causé des inondations généralisées sur l'Afrique de l'Ouest. À partir des estimations de précipitation du satellite TRMM, ils ont estimé que les événements de 2007 ont été exceptionnels (temps de retour de quelques dizaines d'années) sur des cumuls de 5 à 15 jours. La raison principale du faible nombre d'études sur le sujet est encore une fois liée au manque de données, mais aussi aux difficultés méthodologiques propres à l'étude des événements extrêmes. En effet, rares par définition, les pluies extrêmes sont particulièrement sujettes aux effets d'échantillonnage qui, ajoutés à la forte variabilité interannuelle et décennale de la pluie au Sahel, rendent difficile la détection robuste de tendances.

Compte tenu de ces contraintes, PANTHOU (2013) a pu réunir sur une fenêtre du Sahel central (10° N-15° N, 5° W-7° E) un ensemble de 43 séries pluviométriques journalières disponibles en continu sur la période 1950-2010. Une analyse statistique basée sur la théorie des valeurs extrêmes a permis de fournir une vision régionale intégrée de l'organisation spatiale des extrêmes (PANTHOU *et al.*, 2012) et de développer des méthodes novatrices pour détecter de façon robuste les tendances dans les séries d'extrêmes (PANTHOU *et al.*, 2013). Ces développements ont permis à PANTHOU *et al.* (2014) d'étudier l'évolution du régime des précipitations extrêmes en lien avec la variabilité décennale des cumuls pluviométriques annuels. La figure 5 met en évidence une différence nette dans l'évolution multi-décennale des totaux annuels et des maxima journaliers annuels sur le Sahel central depuis 1950. Alors que les totaux annuels restent largement déficitaires par rapport à la moyenne de la période humide 1950-1970, la moyenne glissante des maxima annuels affiche des valeurs supérieures à ce qu'elles étaient sur 1950-1970. Les deux courbes se différencient nettement à partir de la fin des années 1990. Ceci confirme qu'un changement important du régime pluviométrique s'est produit au tournant du siècle, les extrêmes pluviométriques devenant plus marqués.

Les courbes de la figure 5 sont obtenues à partir des données de 43 stations, soit pour chaque année un échantillon de 43 totaux annuels et de 43 maxima annuels. Pour étoffer l'échantillon des pluies fortes, PANTHOU *et al.* (2014) ont sélectionné sur la base d'un modèle statistique d'extrême régional, le seuil de pluie qui est dépassé en moyenne n fois chaque année sur la période 1950-2010 pour chacune des 43 stations (n variant de 2 à 15 correspondant à des valeurs de seuil de pluie variant avec le gradient nord-sud). Des distributions (loi de Pareto généralisée-GPD) sont ensuite ajustées chaque année à cet échantillon plus fourni (pour $n = 10$, l'échantillon

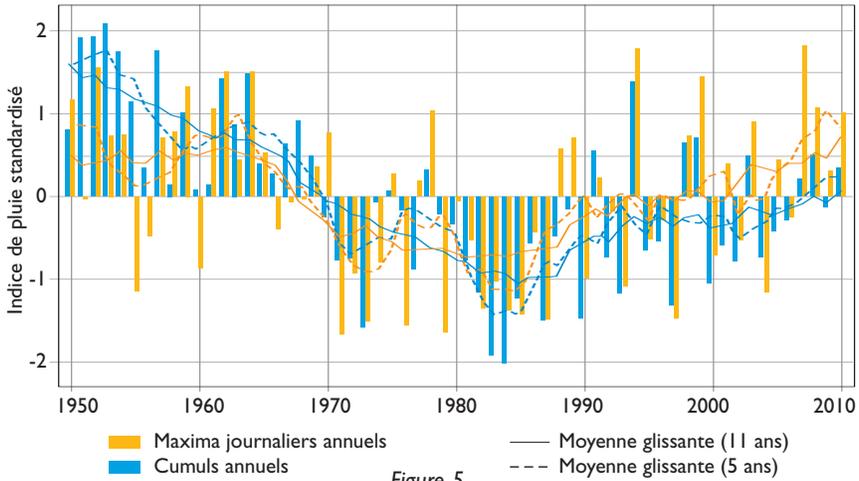


Figure 5.

Évolution comparée des totaux et des maxima annuels de pluie sur le Sahel central (fenêtre 9,5° N-15,5° N 5° W-7° E) entre 1950 et 2010. D'après PANTHOU et al. (2014).

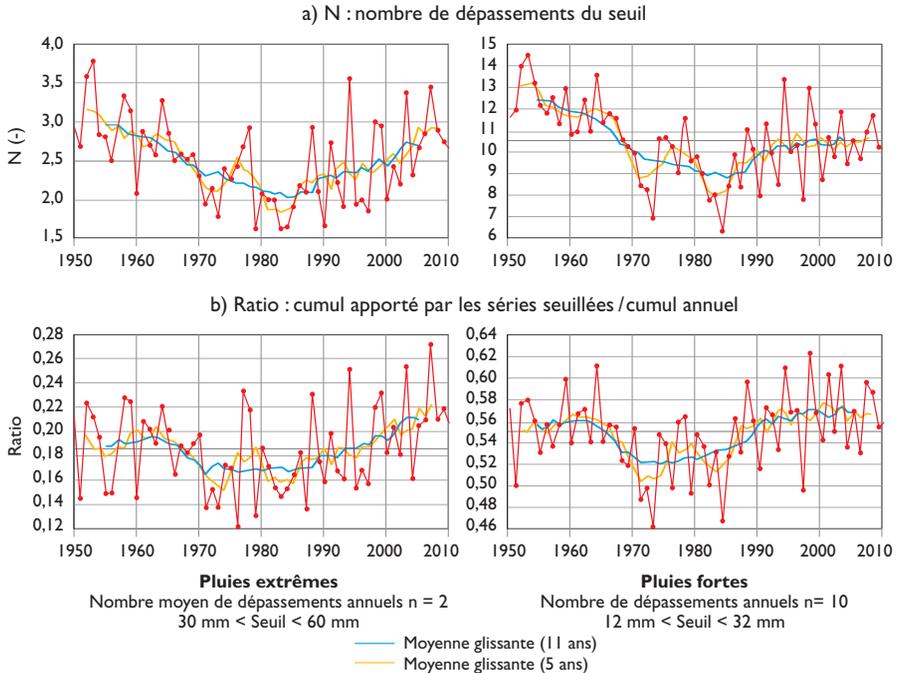


Figure 6.

(a) Évolution du nombre de pluies journalières dépassées en moyenne n fois par an, (b) Évolution du cumul pluies journalières dépassées en moyenne n fois par an en pourcentage de la pluie totale.

Avec n = 2 à gauche définissant les pluies extrêmes et n = 10 à droite définissant les pluies fortes. D'après PANTHOU et al. (2014).

annuel est de 430 valeurs et correspond à des pluies comprise entre 12 mm au nord et 32 mm au sud de la zone d'étude). On peut alors étudier l'évolution des quantiles des distributions obtenues pour différentes valeurs de n . Deux résultats majeurs se dégagent, illustrés par la figure 6. Tout d'abord le nombre annuel d'événements dépassant le seuil de pluie reste inférieur à ce qu'il a été lors des années 1950 et 1960 sauf pour $n = 2$ (fig. 6a), où l'on atteint ces dernières années le même niveau que durant les années 1950. Par contre, la contribution de ces pluies en pourcentage du total annuel a augmenté significativement, d'autant plus que l'on considère des seuils élevés (fig. 6b). Alors que le nombre d'événements pluvieux reste déficitaire, ce qui caractérise la dernière décennie c'est donc l'occurrence de quelques pluies extrêmes plus intenses que par le passé.

On notera que sur le Sahel occidental une étude récente (SARR *et al.*, 2013) semble également montrer une augmentation des pluies les plus intenses depuis les années 1990. Ces résultats doivent toutefois être confirmés par une approche régionale appropriée pour l'étude spécifique des pluies extrêmes.

Bilan, discussion et questions en suspens

Après la grande sécheresse qui a touché le Sahel à la fin des années 1960, la dernière décennie du xx^e siècle a vu une reprise de la pluviométrie notamment sur sa partie centrale – sans pour autant revenir aux conditions des années 1950-1969 – alors que la sécheresse a continué à sévir sur le Sahel ouest. Au-delà des disparités régionales, l'analyse de l'évolution de la pluie au Sahel est également une question d'échelle. Dès lors que l'on considère le régime des pluies à méso-échelle, échelle clé de la compréhension de l'impact de la variabilité pluviométrique sur les systèmes hydrologiques et agronomiques au Sahel, on constate que l'évolution des cumuls annuels résulte de modifications des caractéristiques de systèmes pluvieux qui diffèrent fortement d'une décennie à l'autre.

Ce chapitre a permis d'actualiser sur les vingt dernières années l'évolution du régime pluviométrique relativement bien documenté jusque dans les années 1990, en se concentrant sur l'évolution des caractéristiques de méso-échelle et sur les pluies les plus extrêmes très peu documentées dans la région. On retiendra surtout que le déficit du nombre de jours pluvieux a persisté lors de la dernière décennie, mais qu'il est compensé par une plus grande occurrence de pluies fortes associées aux systèmes pluvieux les plus étendus. Ce changement de régime des pluies a eu une double conséquence : 1) un retour vers une meilleure pluviométrie annuelle, la plus grande occurrence de pluies fortes faisant mieux que compenser le déficit persistant du nombre de jours pluvieux ; 2) une modulation inédite du signal pluviométrique décennal par l'intensité des pluies les plus fortes.

L'évolution du régime, telle que mise en évidence ici, invite à considérer avec précaution les termes de « reprise » (« recovery » en anglais) ou « retour à des

conditions humides » souvent employés pour caractériser la pluie sur les deux dernières décennies. Si la pluie moyenne annuelle est effectivement plus forte depuis les années 1990, son niveau reste inférieur à celui de la période humide de 1950-1969. En outre, le nombre d'événements pluvieux reste déficitaire sur les années récentes impliquant la persistance d'un risque élevé de séquences sèches, potentiellement préjudiciable pour les rendements agricoles et les ressources en eau. L'augmentation des pluies les plus fortes peut par ailleurs directement endommager certaines cultures et infrastructures, et accentuer le risque inondation. En combinant augmentation des extrêmes et des séquences sèches, le Sahel présente tous les signes de ce que GIORGI *et al.* (2011) définissent comme une « augmentation de l'intensité hydro-climatique ». On préférera donc ce terme ou celui d'« intensification du régime des pluies journalières » pour décrire le tournant pris par la pluviométrie au Sahel ces vingt dernières années.

Les résultats présentés dans ce chapitre suggèrent de renforcer certains axes de recherche parmi lesquels :

– l'analyse de l'évolution récente des pluies aux échelles intra-saisonnières et à la méso-échelle : l'évolution du régime des pluies reste au cœur de la compréhension des modifications de l'environnement climatique de la région. Les démarches décrites au cours de ce chapitre pour caractériser l'évolution du cycle saisonnier et des caractéristiques des événements pluvieux doivent être consolidés, d'une part en actualisant les jeux de données aux années les plus récentes et sur l'ensemble de la région (avec une priorité forte sur le Sahel occidental largement sous-documenté), et d'autre part en développant des méthodologies adaptées pour détecter les non-stationnarités dans les séries pluies et leurs contrastes régionaux ;

– l'étude du lien entre l'évolution des pluies et le fonctionnement de la mousson : les signes de l'intensification du régime des pluies sont en tout point ceux attendus dans le contexte du changement climatique qui doit s'accompagner d'une intensification du cycle hydrologique à l'échelle globale. Assiste-t-on alors sur les deux dernières décennies aux signes précurseurs d'un changement plus durable provoqué par le réchauffement climatique ou reste-t-on dans des conditions de variabilité naturelle du climat régional ? Les projections futures issues des modèles de climat sont encore trop incertaines pour pouvoir trancher (cf. chap. 3, ce volume). La réponse à cette question se trouve plus certainement dans la compréhension des mécanismes (atmosphériques, de surfaces et océaniques) qui ont modulé le fonctionnement de la mousson ouest-africaine et qui ont généré une intensité hydro-climatique plus forte. De nombreux travaux discutent d'ores et déjà cette question (MONERIE *et al.*, 2012 ; GIANNINI *et al.*, 2013 ; BIASUTTI, 2013), mais ils souffrent souvent d'un manque de lien avec les observations au sol, seules références objectives permettant de documenter les évolutions de la pluie au Sahel ;

– l'attribution de l'augmentation du risque inondation au Sahel : le risque inondation combine des facteurs d'aléa et de vulnérabilité. Jusqu'à présent, son augmentation au Sahel était principalement attribuée à (1) l'augmentation de la vulnérabilité des populations de plus en plus exposées aux risque inondation (DI BALDASSARRE *et al.*, 2010) et à (2) l'accentuation récente de l'aléa hydrologique observée dans la région

sahélienne provenant directement de la hausse des coefficients de ruissellement provoquée par la modification des états de surfaces (DESCROIX *et al.*, 2009). Ces deux points ne sont pas contestables, et ils ont évidemment participé à l'augmentation du risque inondation dans la région. Mais l'intensification du régime des pluies peut également avoir joué un rôle (cf. chap. 7, ce volume). Il serait donc important de pouvoir quantifier la part de chacun des trois facteurs dans l'augmentation du risque inondation.

En tout état de cause, la possibilité de répondre aux grandes questions scientifiques et sociétales qui se posent aujourd'hui au Sahel est conditionnée par l'accès aux données météorologiques de long terme déployées sur la région. Le concours des services météorologiques nationaux doit être pour cela renforcé par une politique de collaboration claire et constructive, positionnée dans la démarche internationale en cours de partage de données pour une meilleure surveillance du changement climatique global qui menace notre planète. En complément aux données des réseaux nationaux, les initiatives d'observations densifiées dans la région doivent également être soutenues sur le long terme. Le service d'observation Amma-Catch s'inscrit dans une telle démarche : en fournissant à la communauté scientifique des jeux de données documentant à haute résolution le cycle hydrologique, il offre un support d'analyse privilégié de la variabilité hydro-climatique et se présente comme un laboratoire de développements de méthodologies essentielles pour mieux comprendre les grands changements environnementaux qui touchent la région ouest-africaine.

Références

ALI A., LEBEL T., 2009

The Sahelian standardized rainfall index revisited. *Int. J. Climatol.*, 29 : 1705-1714, doi:10.1002/joc.1832.

ALI A., LEBEL T., AMANI A., 2003

Invariance in the Spatial Structure of Sahelian Rain Fields at Climatological Scales. *J. Hydrometeorol.*, 4 : 996-1011.

BALME M., GALLE S., LEBEL T., 2005

Analysis of the variability of the onset of the rainy season in the Sahel at hydrological and agronomical scales, based on EPSAT-Niger data. *Sécheresse*, 16 : 15-22.

BALME M., LEBEL T., AMANI A., 2006a

Années sèches et années humides au Sahel : quo vadimus ? *J. Sci. Hydrol.*, 51 (2) : 254-271.

BALME M., VISCHEL T., LEBEL T., PEUGEOT C., GALLE S., 2006b

Assessing the water balance in the Sahel: Impact of small-scale rainfall variability on runoff: Part 1: Rainfall variability analysis. *J. Hydrol.*, 331 : 336-348.

BELL M. A., LAMB P. J., 2006

Integration of weather system variability to multidecadal regional climate change: The West African Sudan-Sahel zone, 1951-1998. *J. Clim.*, 19 : 5343-5365.

BIASUTTI M., 2013

Forced Sahel rainfall trends in the CMIP5 archive. *J. Geophys. Res. Atmospheres*, 118 : 1613-1623, doi:10.1002/jgrd.50206.

- BUNTING A. H., DENNETT M. D., ELSTON J., MILFORD J. R., 1976**
Rainfall trends in the West African Sahel.
Q. J. R. Meteorol. Soc., 102 : 59-64,
doi:10.1002/qj.49710243105.
- DAI A., LAMB P. J., TRENBERTH K. E., HULME M., JONES P. D., XIE P., 2004**
The recent Sahel drought is real.
Int. J. Climatol., 24, 1323-1331,
doi:10.1002/joc.1083.
- DARDEL C., KERGOAT L., HIERNAUX P., GRIPPA M., MOUGIN E., 2015**
« Entre désertification et reverdissement du Sahel : que se passe-t-il vraiment ? »
In : Agricultures familiales et changements climatiques en Afrique de l'Ouest : entre opportunités, vulnérabilités et adaptations, IRD.
- DEMARÉE G. R., 1990**
An indication of climatic change as seen from the rainfall data of a Mauritanian station.
Theor. Appl. Climatol., 42 : 139-147,
doi:10.1007/BF00866869.
- DEME A., GAYE A., HOURDIN F., 2015**
« Les projections du climat en Afrique de l'Ouest : évidences et incertitudes ».
In : Agricultures familiales et changements climatiques en Afrique de l'Ouest : entre opportunités, vulnérabilités et adaptations, IRD.
- DEPRAETERE C., GOSSET M., PLOIX S., LAURENT H., 2009**
The organization and kinematics of tropical rainfall systems ground-tracked at mesoscale with gages: First results from the campaigns 1999-2006 on the Upper Ouémé Valley (Benin).
J. Hydrol., 375 : 143-160,
doi:10.1016/j.jhydrol.2009.01.011.
- DESCROIX L. et al., 2009**
Spatio-temporal variability of hydrological regimes around the boundaries between Sahelian and Sudanian areas of West Africa: A synthesis. *J. Hydrol.*, 375 : 90-102.
- DESCROIX L. et al., 2015**
« Facteurs anthropiques et environnementaux de la recrudescence des inondations au Sahel ».
In : Agricultures familiales et changements climatiques en Afrique de l'Ouest : entre opportunités, vulnérabilités et adaptations, IRD.
- DI BALDASSARRE G., MONTANARI A., LINS H., KOUTSOYIANNIS D., BRANDIMARTE L., BLÖSCHL G., 2010**
Flood fatalities in Africa: From diagnosis to mitigation.
Geophys. Res. Lett., 37,
doi:10.1029/2010GL045467.
- FONTAINE B., JANICOT S., 1996**
Sea Surface Temperature Fields Associated with West African Rainfall Anomaly Types.
J. Clim., 9 : 2935-2940,
doi:10.1175/1520-0442(1996)009.
- FRAPPART F. et al., 2009**
Rainfall regime across the Sahel band in the Gourma region, Mali.
J. Hydrol., 375 : 128-142.
- GIANNINI A., SALACK S., LODOUN T., ALI A., GAYE A. T., NDIAYE O., 2013**
A unifying view of climate change in the Sahel linking intra-seasonal, interannual and longer time scales.
Environ. Res. Lett., 8 : 024010,
doi:10.1088/1748-9326/8/2/024010.
- GIORGI F., IM E.-S., COPPOLA E., DIFFENBAUGH N. S., GAO X. J., MARIOTTI L., SHI Y., 2011**
Higher Hydroclimatic Intensity with Global Warming.
J. Clim., 24 : 5309-5324,
doi:10.1175/2011JCLI3979.1.
- GRIST J. P., NICHOLSON S. E., 2001**
A Study of the Dynamic Factors Influencing the Rainfall Variability in the West African Sahel.
J. Clim., 14 : 1337-1359.
- GUILLOT G., LEBEL T., 1999**
Disaggregation of Sahelian mesoscale convective system rain fields further developments and validation.
J. Geophys. Res., 104 : 31533-31551.
- HUBERT P., CARBONNEL J. P., 1987**
Approche statistique de l'aridification de l'Afrique de l'Ouest.
J. Hydrol., 95 : 165-183.
- HULME M., 1992 –**
Rainfall changes in Africa: 1931-1960 to 1961-1990.
Int. J. Climatol., 12 : 685-699,
doi:10.1002/joc.3370120703.

- HULME M., 2001**
Climatic perspectives on Sahelian desiccation: 1973-1998.
Glob. Environ. Change, 11 : 19-29,
doi:10.1016/S0959-3780(00)00042-X.
- IBRAHIM B., POLCHER J., KARAMBIRI H., ROCKEL B., 2012**
Characterization of the rainy season in Burkina Faso and its representation by regional climate models.
Clim. Dyn., 39 : 1287-1302,
doi:10.1007/s00382-011-1276-x.
- LAMB P. J., 1982**
Persistence of Saharan drought.
Nature, 299 : 46-48,
doi:10.1038/299046a0.
- LE BARBÉ L., LABEL T., 1997**
Rainfall climatology of the HAPEX-Sahel region during the years 1950-1990.
J. Hydrol., 188-189 : 43-73.
- LE BARBÉ L., LABEL T., TAPSOBA D., 2002**
Rainfall Variability in West Africa during the years 1950-1990.
J. Clim., 15 : 187-202.
- LABEL T., DIEDHIOU A., LAURENT H., 2003**
Seasonal cycle and interannual variability of the Sahelian rainfall at hydrological scales.
J. Geophys. Res., 108.
- LABEL T., ALI A., 2009**
Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990-2007).
J. Hydrol., 375 : 52-64.
- LABEL T. et al., 2009**
Ammu-Catch studies in the Sahelian region of West-Africa: An overview.
J. Hydrol., 375 : 3-13.
- L'HOTE Y., MAHÉ G., SOME B., TRIBOULET J. P., 2002**
Analysis of a Sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000; the drought continues.
Hydrol. Sci., 47 (4) : 563-572.
- LODOUN T., GIANNINI A., TRAORÉ P. S., SOMÉ L., SANON M., VAKSMANN M., RASOLODIMBY J. M., 2013**
Changes in seasonal descriptors of precipitation in Burkina Faso associated with late 20th century drought and recovery in West Africa.
Environ. Dev., 5 : 96-108,
doi:10.1016/j.envdev.2012.11.010.
- MAHÉ G., PATUREL J.-E., 2009**
1896-2006 Sahelian annual rainfall variability and runoff increase of Sahelian Rivers.
Surf. Geosci. Hydrol.-Hydrogeol., 341 : 538-546.
- MASSUEL S., CAPPELAERE B., FAVREAU G., LEDUC C., LABEL T., VISCHEL T., 2011**
Integrated surface water-groundwater modelling in the context of increasing water reserves of a regional Sahelian aquifer.
Hydrol. Sci. J., 56 : 1242-1264,
doi:10.1080/02626667.2011.609171.
- MATHO V., LAURENT H., LABEL T., 2002**
Mesoscale Convective System Rainfall in the Sahel.
J. Appl. Meteorol., 41 : 1081-1092.
- MONERIE P.-A., FONTAINE B., ROUCOU P., 2012**
Expected future changes in the African monsoon between 2030 and 2070 using some CMIP3 and CMIP5 models under a medium-low RCP scenario.
J. Geophys. Res. Atmospheres, 117, n/a – n/a,
doi:10.1029/2012JD017510.
- MORO V., ROBERTSON A. W., WARD M. N., 2006**
Seasonal Predictability and Spatial Coherence of Rainfall Characteristics in the Tropical Setting of Senegal.
Mon. Weather Rev., 134 : 3248-3262,
doi:10.1175/MWR3252.1.
- NEW M. et al., 2006**
Evidence of trends in daily climate extremes over southern and west Africa.
J. Geophys. Res., 111, D14102,
doi:10.1029/2005JD006289
- NICHOLSON S., 2005**
On the question of the “recovery” of the rains in the West African Sahel.
J. Arid Environ., 63 : 615-641.
- NICHOLSON S. E., 2001**
Climatic and environmental change in Africa during the last two centuries.
Clim. Res., 17 : 123-144.
- NICHOLSON S. E., 2013**
The West African Sahel – A Review of Recent Studies on the Rainfall Regime and Its Interannual Variability.
ISRN Meteorol., 2013 : 1-32,
doi:10.1155/2013/453521.

- OZER P., ERPICUM M., DEMARÉE G., VANDIEPENBEECK M., 2003**
The Sahelian drought may have ended during the 1990s. *Hydrol. Sci. J.*, 48 : 489-492, doi:10.1623/hysj.48.3.489.45285.
- PAETH H., FINK A. H., POHLE S., KEIS F., MÄCHEL H., SAMIMI C., 2010**
Meteorological characteristics and potential causes of the 2007 flood in sub-Saharan Africa. *Int. J. Climatol.*, 31 : 1908-1926, doi:10.1002/joc.2199
- PANTHOU G., 2013**
Analyse des extrêmes pluviométriques en Afrique de l'Ouest et de leur évolution au cours des 60 dernières années. Université de Grenoble, 270 p.
- PANTHOU G., VISCHEL T., LEBEL T., BLANCHET J., QUANTIN G., ALI A., 2012**
Extreme rainfall in West Africa: A regional modeling. *Water Resour. Res.*, 48, W08501, doi:10.1029/2012WR012052.
- PANTHOU G., VISCHEL T., LEBEL T., QUANTIN G., PUGIN A.-C. F., BLANCHET J., ALI A., 2013**
From pointwise testing to a regional vision: An integrated statistical approach to detect nonstationarity in extreme daily rainfall. Application to the Sahelian region. *J. Geophys. Res. Atmospheres*, 118 : 8222-8237, doi:10.1002/jgrd.50340.
- PANTHOU G., VISCHEL T., LEBEL T., 2014**
Recent trends in the regime of extreme rainfall in the Central Sahel. *Int. J. Climatol.*, n/a – n/a, doi:10.1002/joc.3984.
- PEUGEOT C., CAPPELAERE B., VIEUX B. E., SÉGUI S., MAIA A., 2003**
Hydrologic process simulation of a semiarid, endoreic catchment in Sahelian West Niger. 1. Model-aided data analysis and screening. *J. Hydrol.*, 279 : 224-243.
- RASMUSSEN E. M., ARKIN P. A., 1993**
A Global View of Large-Scale Precipitation Variability. *J. Clim.*, 6 : 1495-1522, doi:10.1175/1520-0442(1993)006<1495:AGVOLS>2.0.CO;2.
- REDELSPERGER J. L. et al., 2006**
Amm, une étude multidisciplinaire de la mousson ouest-africaine. *Météorologie Trop.*, 54 : 22-32.
- ROSSI A., VISCHEL T., LEBEL T., 2012**
Analyse spatiale et temporelle de la variabilité à méso-échelle du régime pluviométrique sahélien depuis les années 1950. 25^e colloque de l'Association internationale de climatologie, Grenoble (France).
- SARR M. A., ZOROMÉ M., SEIDOU O., BRYANT C. R., GACHON P., 2013**
Recent trends in selected extreme precipitation indices in Senegal – A changepoint approach. *J. Hydrol.*, 505 : 326-334, doi:10.1016/j.jhydrol.2013.09.032.
- SULTAN B., JANICOT S., DIEDHIOU A., 2003**
The West African Monsoon Dynamics. Part I: Documentation of Intraseasonal Variability. *J. Clim.*, 16 : 3389-3406.
- TARHULE A., WOO M.-K., 1998**
Changes in rainfall characteristics in northern Nigeria. *Int. J. Climatol.*, 18 : 1261-1271, doi:10.1002/(SICI)1097-0088(199809)18:11.
- TARHULE A. et al., 2014**
Exploring temporal hydroclimatic variability in the Niger Basin (1901-2006) using observed and gridded data. *Int. J. Climatol.*, n/a – n/a, doi:10.1002/joc.3999.
- TSCHAKERT P., SAGOE R., OFORI-DARKO G., CODJOE S. N., 2010**
Floods in the Sahel: an analysis of anomalies, memory, and anticipatory learning. *Clim. Change*, 103 : 471-502, doi:10.1007/s10584-009-9776-y.
- VISCHEL T., LEBEL T., 2007**
Assessing the water balance in the Sahel: Impact of small-scale rainfall variability on runoff. Part 2: Idealized modeling of runoff sensitivity. *J. Hydrol.*, 333 : 340-355.
- VISCHEL T., LEBEL T., MASSUEL S., CAPPELAERE B., 2009**
Conditional simulation schemes of rain fields and their application to rainfall-runoff modeling studies in the Sahel. *J. Hydrol.*, 375 : 273-286, doi:10.1016/j.jhydrol.2009.02.028.
- VISCHEL T., QUANTIN G., LEBEL T., VIARRE J., GOSSET M., CAZENAVE F., PANTHOU G., 2011**
Generation of high resolution rainfields in West Africa: evaluation of dynamical interpolation methods. *J. Hydrometeorol.*, 110426113802000, doi:10.1175/JHM-D-10-05015.1.

Vischel T., Lebel Thierry, Panthou G., Quantin G., Rossi A., Martinet M.

Le retour d'une période humide au Sahel ? : observations et perspectives.

In : Sultan Benjamin (ed.), Lalou Richard (ed.), Amadou Sanni M. (ed.), Oumarou A. (ed.), Soumaré M.A. (ed.). Les sociétés rurales face aux changements climatiques et environnementaux en Afrique de l'Ouest.

Marseille : IRD, 2015, p. 43-60. (Synthèses). ISBN 978-2-7099-2146-6