

# ÉVOLUTION RÉCENTE DES VARIATIONS PLUVIOMÉTRIQUES ET DE L'ACTIVITÉ VÉGÉTALE DANS LE BASSIN VERSANT EXPÉRIMENTAL DE L'OUÉMÉ SUPÉRIEUR (BÉNIN)

BIGOT S., DO T.

Université Grenoble Alpes (UGA) – Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement (LTHE) - Domaine universitaire, BP 53, 38041 Grenoble cedex 9, France [sylvain.bigot@ujf-grenoble.fr]

**Résumé** – L'analyse porte sur les données pluviométriques *in situ* collectées dans le cadre de l'Observatoire hydroclimatique de l'Ouémé supérieur, au centre du Bénin, site qui participe au réseau AMMA-CATCH en Afrique de l'Ouest. Ces données, confrontées aux estimations satellitaires de type RFE (Rainfall Estimate) et à l'indice de végétation de type NDVI-eMODIS, permettent de déterminer les variations pluviométriques et phénologiques régionales récentes (2001-2013). Malgré des cumuls annuels plus élevés que ceux observés dans les années 70 et 80, il n'y a pas de tendance pluviométrique, alors que le calendrier de l'activité végétale semble bien enregistrer des évolutions significatives, notamment en fin de saison.

**Mots-clés** : précipitations, observations et télédétection, activité végétale, Bénin.

**Abstract** – Recent evolution of precipitation variations and vegetation activity in the experimental site of the Upper Ouémé basin (Benin). The analysis focuses on *in situ* rainfall data from the hydroclimatic Upper Oueme Observatory (central Benin), within the AMMA-CATCH Western Africa network. These data with satellite-based estimates of rainfall (RFE data) and vegetation index (NDVI-eMODIS data) allow us to determine the regional rainfall and phenological variations on the recent period 2001-2013. Despite higher annual rainfall amounts than those observed in the 70's and 80's, there is no significant rainfall trend, while the greenness season seems to record significant changes, especially the end of the annual vegetation activity.

**Keywords**: precipitation, measurements and remote sensing, vegetation activity, Benin.

## Introduction

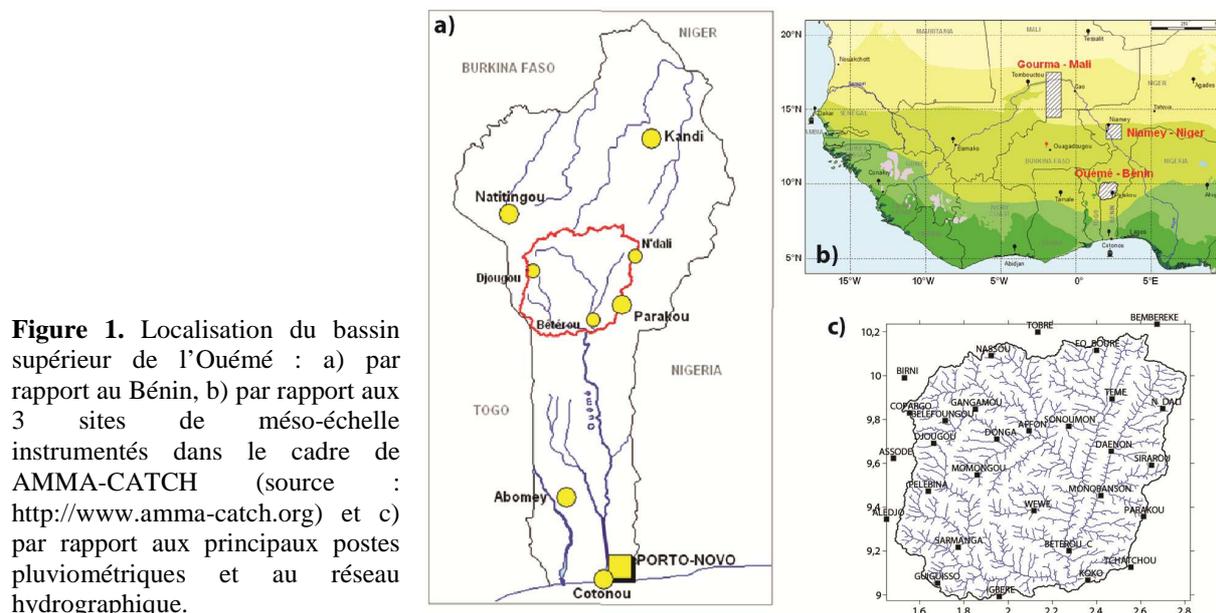
Dans l'espace soudano-sahélien, la période récente (*i.e.* depuis la fin des années 1990) semble a priori plus humide (d'un point de vue pluviométrique) que les décennies précédentes (1970-80) qui avaient enregistré de sévères sécheresses récurrentes, avec une certaine "reprise" des précipitations (Nicholson, 2005 ; Lebel et Ali, 2009). Ces résultats indiquent une évolution plus marquée dans l'ouest du Sahel, mais limitée dans l'est du Sahel/Soudan. Par ailleurs, des conditions anormalement sèches sont à nouveau observées en 2011 (Fontaine *et al.*, 2011). Ces évolutions récentes sont susceptibles de fortement conditionner les climats locaux et régionaux, donc également la qualité de la couverture végétale, la biomasse et la phénologie saisonnière des principales formations forestières et savaniques. Elles nécessitent alors des suivis précis à l'échelle de sites très instrumentés, pour mieux comprendre les contrastes régionaux. Parmi tous les travaux en cours en Afrique de l'Ouest, l'objectif spécifique de cette étude est d'établir, à l'échelle d'un site instrumenté au centre du Bénin, la variabilité pluviométrique annuelle et celle de l'activité végétale (notamment la saison végétative) sur la période 2001-2013. L'analyse s'appuie à la fois sur les mesures *in situ*, sur des estimations pluviométriques provenant de la télédétection satellitaire et sur l'activité photosynthétique de la végétation vue au travers des données de type NDVI.

## 1. L'Observatoire AMMA-CATCH de l'Ouémé supérieur

### 1.1. Contexte scientifique et présentation géographique

Dans le cadre de l'Observatoire de Recherche en Environnement (ORE), labellisé sous le nom AMMA-CATCH (*Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine - Couplage de l'Atmosphère Tropicale et du Cycle Hydrologique*), trois sites de méso-échelle ont été instrumentés depuis les années 1990 : Gourma au Mali, le Degré Carré de Niamey au Niger et la haute vallée de l'Ouémé au Bénin (<http://www.amma-catch.org/> ; figure 1). L'ensemble du dispositif fournit les paramètres et les variables de forçage qui servent à initialiser et tester certains modèles géophysiques de surface (Lebel *et al.*, 2009). Cette phase instrumentale,

lancée en 1997 pour l'Ouémé supérieur, a été nécessaire pour l'analyse des interactions entre les dynamiques végétales et l'évolution du cycle de l'eau, ce bassin versant ayant un environnement hydroclimatique différent de ceux étudiés en domaine sahélien (notamment une baisse plus faible des débits en période de sécheresse, et pas de liaisons évidentes entre la dégradation des sols, la couverture végétale, le climat et l'hydrologie de surface, comme cela est le cas en sites sahéliens ; Descroix *et al.*, 2009).



**Figure 1.** Localisation du bassin supérieur de l'Ouémé : a) par rapport au Bénin, b) par rapport aux 3 sites de méso-échelle instrumentés dans le cadre de AMMA-CATCH (source : <http://www.amma-catch.org>) et c) par rapport aux principaux postes pluviométriques et au réseau hydrographique.

L'Ouémé supérieur est située au centre du Bénin ( $8,5^{\circ}$ - $10,5^{\circ}$ N /  $1,5^{\circ}$ - $3,0^{\circ}$ W) et couvre une superficie de 14 366 km<sup>2</sup> (figure 1). Il possède un climat soudanien, avec une saison des pluies (95 % des cumuls annuels) qui débute en avril (plus ou moins tôt selon les années) et qui se termine en octobre. Lors de la sécheresse récurrente des années 1970-80, les précipitations moyennes (733-780 mm) ont baissé de 18 %. Mais à partir de 1994, elles ont augmenté à nouveau. Le relief est peu contrasté (entre 250 et 500 m environ), avec des inselbergs dispersés. La végétation naturelle se caractérise par une mosaïque de forêts et de savanes associées à des champs et des jachères plus ou moins anciennes. En menant des comparaisons diachroniques avec des images Landsat prises en 1973, 1986, 2000 et 2012, Leroux (2012) montre régionalement une baisse continue de la végétation dense (-47 %) et en revanche, une augmentation des espaces anthropisés de jachères (+24 %) ainsi que des types savaniques (+22 %). La déforestation et le déboisement sont le plus évident entre 1986 et 2000 (-23 %) par rapport à la période 1973-1986 (-12 %) ou 2000-2012 (-11 %).

### 1.2. L'Observatoire Hydrométéorologique de la Haute Vallée de l'Ouémé (OHHVO)

L'OHHVO est actuellement celui qui fournit les séries géophysiques de meilleure qualité pour de nombreux paramètres (sol et atmosphère) pour la partie soudano-guinéenne de l'Afrique de l'Ouest. Le réseau pluviométrique est constitué par un ensemble de stations réparties de façon régulière sur l'ensemble du domaine (figure 1), même si la densité est renforcée sur le sous-bassin de la Donga afin d'effectuer des bilans et modélisations hydroclimatiques plus précis de ce petit domaine (593 km<sup>2</sup>). Sur la période 1997-2010, le réseau pluviométrique augmente, puis se stabilise, les stations fonctionnant au moins de mars à octobre, pour prendre en compte l'intégralité de la saison des pluies, avec des relevés automatiques journaliers et décennaires. Il évolue entre 44 et 56 stations en activité sur la période 2001-2013, avec un taux de fonctionnement des équipements proches de 85 à 90 %, ce qui est exceptionnel pour un réseau géophysique de cette ampleur en Afrique.

## 2. Les données d'origine satellitaire pour l'étude de la végétation et des précipitations

### 2.1. Les indices de végétation à partir des données eMODIS

Le capteur MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), lancé par la NASA en décembre 1999, fournit de nombreuses données pour la surveillance de la végétation. Parmi ces produits satellitaires, c'est l'indice de végétation NDVI qui est analysé ici sur la période récente 2001-2013, avec une résolution pendataire et de 0,5 km, ces données étant mises à disposition par l'USGS *Fews Net Data Portal* et appelées eMODIS (pour EROS-MODIS : *Earth Resources Observation and Science MODIS*). A partir de leurs travaux sur l'intercomparaison des capteurs spécialisés pour le suivi de l'activité végétale (MODIS, SPOT-VGT, AVHRR), Tarnavsky *et al.* (2008) montrent que des composites de NDVI calculées sur plusieurs jours restent très efficaces et pertinentes dans la surveillance biophysique de l'activité végétale et de la variabilité climatique. D'autres résultats indiquent que l'utilisation du NDVI issu des données SPOT-VGT donnent également de bons résultats à l'échelle africaine, mais moins précis que ceux issus de MODIS car souvent établis à une échelle décadaire et avec une résolution spatiale de 1 km (Hoscilo *et al.*, 2014).

### 2.2. Les estimations pluviométriques par satellite

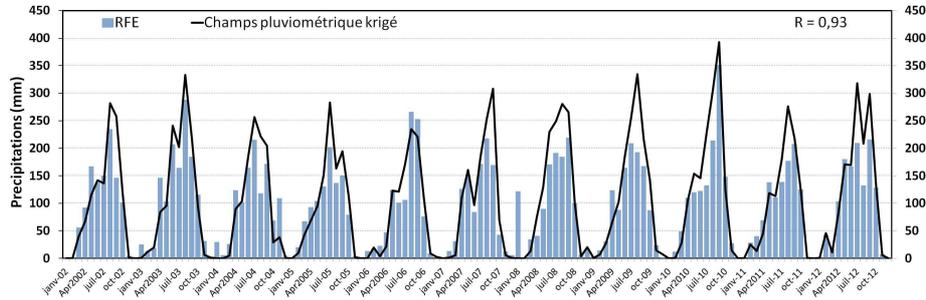
Il existe désormais beaucoup de bases de données fournissant des estimations pluviométriques pour le domaine tropical africain, en s'appuyant sur la télédétection et/ou les observations au sol (GHCN, CPCP, TRMM, CMORPH, PERSIANN, CMAP, TARCAT... ; Gosset *et al.*, 2013 ; Maidment *et al.*, 2014). Les travaux d'intercomparaisons de ces produits révèlent différents avantages ou inconvénients en fonction de leur algorithme de construction, de leur résolution spatio-temporelle, de la profondeur temporelle, des erreurs systématiques ou localisées, etc. Il faut donc sélectionner attentivement ces estimations et surtout, bien en connaître les limites. Nous retenons pour ce travail les données de type *African Rainfall Estimate* (appelées RFE dans la littérature). Disponibles depuis 1995 à partir de l'ADDIS (*Africa Data Dissemination Service* ; <http://earlywarning.usgs.gov/fews/>), la version RFE1 proposait les données de 1995 à 2000 à partir d'une combinaison entre des données infrarouges Météosat 5 et des séries pluviométriques stationnelles journalières (issues du WMO *Global Telecommunication System*). Un nouvel algorithme (RFE2) appliqué à partir de 2001 a permis d'incorporer des données des deux nouveaux capteurs SSM/I (*Special Sensor Microwave/Imager*) et AMSU (*Advanced Microwave Sounding Unit*). Les tests réalisés dans plusieurs régions africaines tropicales indiquent que les données RFE2 sont en accord avec les séries *in situ*, les meilleures relations étant observées en Afrique de l'Ouest et à Madagascar (Symeonakis *et al.*, 2009). L'intérêt des données RFE2 est aussi qu'elle possède une résolution spatiale de 8 km et temporelle de 10 jours, qui devient pertinente pour des études en bioclimatologie végétale, à l'inverse des estimations pluviométriques de type GPCP ou d'autres produits possédant une résolution spatiale comprise entre 1 et 2,5° (Hoscilo *et al.*, 2014). Les intercomparaisons menées spécifiquement à l'échelle du Bénin à partir des données RFE2 journalières montrent cependant qu'elles ont plutôt tendance à sous-estimer les totaux pluviométriques (jusqu'à 10 mm/j) et à surestimer les jours enregistrant les plus faibles précipitations (Gosset *et al.*, 2013).

## 3. Analyses et résultats

### 3.1. La validation des estimations pluviométriques RFE

La comparaison menée entre le champs pluviométrique interpolé à partir du réseau stationnel de l'OHHVO et les estimations RFE indique une très forte corrélation sur la

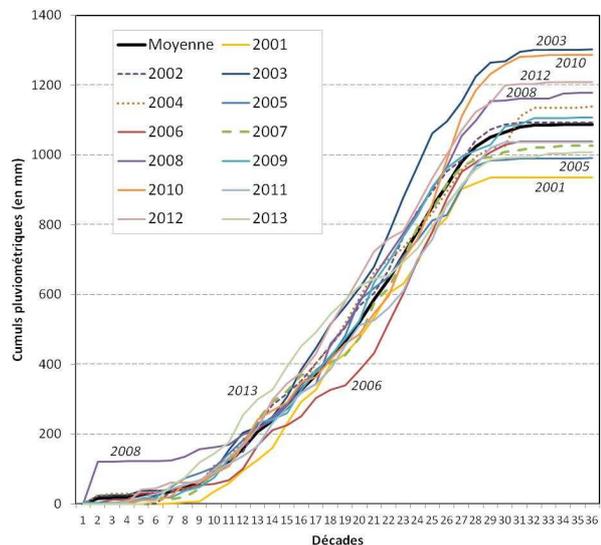
période 2002-2012, avec un coefficient proche de 0,93 lorsqu'on utilise les cumuls mensuels (figure 1). Ces résultats confirment cependant que les données RFE sous-estiment en moyenne les cumuls mesurés au sol, la différence pouvant être élevée certaines années (par exemple 2008 et 2009).



**Figure 2.** Cumuls pluviométriques mensuels sur la période 2002-2012 à l'échelle de l'Ouémé supérieur : comparaison entre d'une part, la moyenne régionale calculée à partir du champ pluviométrique issu du réseau stationnel (interpolé par krigeage) et d'autre part, les estimations satellitaires de type RFE.

Mais elles fournissent cependant une bonne représentation de la variabilité saisonnière et interannuelle régionale, notamment lorsqu'il n'y a pas ou peu d'observations *in situ*, confirmant les travaux d'Hoscilo *et al.* (2014) sur l'Afrique de l'Ouest. Ces données permettent ainsi un suivi de la temporalité des précipitations et la discrimination des caractéristiques saisonnières (figure 3).

Sur la période d'étude et selon les données RFE, quatre années (2008, 2012, 2010 et surtout 2003) se singularisent comme anormalement pluvieuses, alors que 2005 et surtout 2001 enregistrent les cumuls annuels les plus faibles. Avec des valeurs comprises entre 934 (en 2001) et 1302 mm (en 2003), la période récente semble donc bien plus humide que celle des décennies 70 et 80 durant lesquelles la moyenne régionale excédait rarement 900 mm.

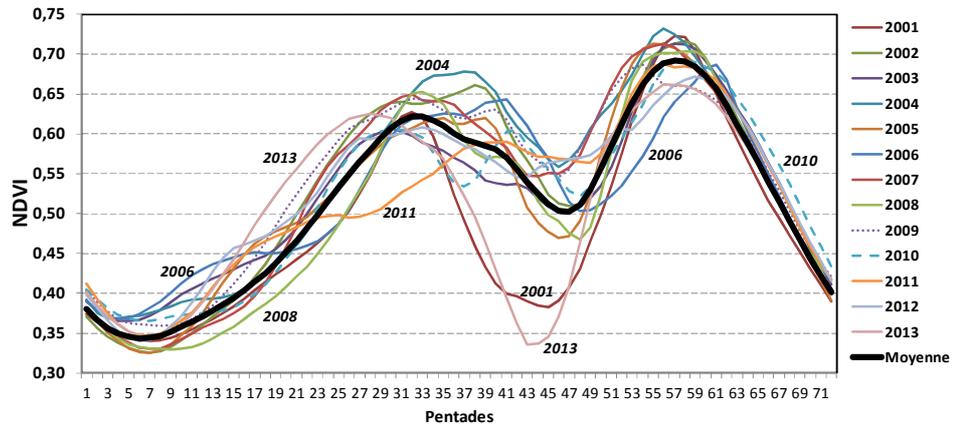


**Figure 3.** Cumuls pluviométriques annuels calculés pour les années 2001 à 2013 à l'échelle de l'Ouémé supérieur grâce aux estimations pluviométriques satellitaires décennales RFE.

### 3.2. La variabilité de l'activité végétale décrite au travers du NDVI-eMODIS

L'analyse des cycles saisonniers bimodaux du NDVI-eMODIS 2001-2013 à résolution pentadaire montre plusieurs singularités pour la région d'étude (figure 3). Les années 2001 et 2013 se distinguent fortement par une diminution anormale du NDVI en juillet-août, révélant a priori des biais inhérents aux données eMODIS qui ne permettent pas d'analyse spécifique de ces périodes. L'année 2008 est atypique car elle enregistre un début d'activité végétale beaucoup plus tardif que la moyenne. La saison végétative du printemps 2011 est aussi beaucoup plus faible que la normale. L'année 2004 enregistre les deux pics maximums (fin juin/début juillet, puis début octobre), révélant une production végétale annuelle plus importante. Plusieurs saisons sèches sont plus apparentes que les autres en début d'année en enregistrant des valeurs de NDVI anormalement basses, comme par exemple 2002, 2005,

2007, 2008 et 2012, alors que plusieurs de ces années (2005, 2007 et 2008) atteignent finalement des valeurs très élevées durant la fin de la saison des pluies (en octobre).

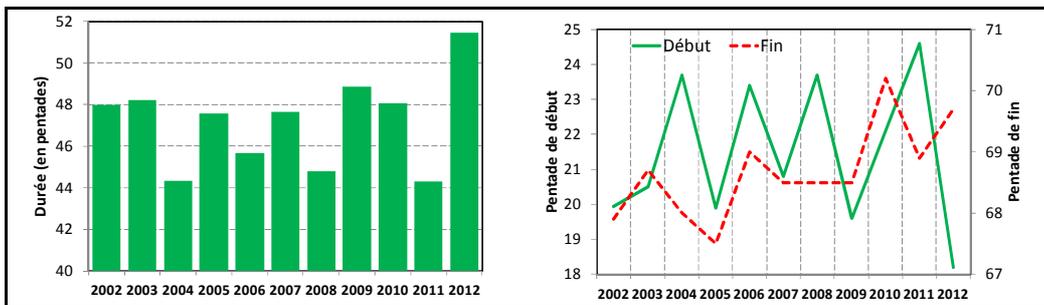


**Figure 4.** Variations du NDVI pour les années 2001 à 2013 à l'échelle de l'Ouémé supérieur, calculées grâce aux données satellitaires pentadaires eMODIS.

Cette observation indique qu'une fin de saison de végétation très active ( $NDVI > 0,68$ ) peut parfaitement être précédée la même année d'une activité végétale anormalement faible en saison sèche.

### 3.3. Les changements interannuels du calendrier phénologique saisonnier

L'évolution interannuelle de ce calendrier est analysée en établissant analytiquement le début ('onset') et la fin de la saison végétative. Parmi les nombreuses méthodes mathématiques possibles, on retient celles proposées par Eklundh et Jönsson (2011), mises en oeuvre grâce à l'outil numérique Timesat (<http://www.nateko.lu.se/timesat/>). Appliqué à un indice pentadaire calculé avec le NDVI-eMODIS sur la période 2002-2012, les saisons végétatives de 2004, 2006, 2008 et 2011 sont relativement courtes, d'une durée proche de 44 à 45 pentades (figure 5). Elles sont en revanche plus longues en 2002, 2003, 2005, 2007, 2009, 2010 et surtout 2012, avec généralement une durée de 48 pentades, et même presque 52 pentades en 2012.



**Figure 5.** Graphique de gauche) la durée (en pentades) de la saison de végétation estimée pour les années 2002 à 2012 à partir des séries pentadaires du NDVI-eMODIS à l'échelle de la région de l'Ouémé supérieur ; graphique de droite) la pentade de début et de fin de saison végétative (établie analytiquement à partir d'une fonction double logistique appliquée grâce à l'outil TIMESAT).

Les débuts de la saison sont relativement stables sur la période d'étude, quoique variables d'une année à l'autre, compris entre la 20<sup>ème</sup> et 25<sup>ème</sup> pentade (courant avril), sauf en 2012 où il intervient vers la 18<sup>ème</sup> pentade (fin mars). A l'inverse, les dates de fin de saison végétative montrent clairement une tendance à la hausse (i.e. un recul), passant de la 68<sup>ème</sup> pentade (début décembre) en 2002 à la 70<sup>ème</sup> en 2010, soit un décalage de 10 jours en une décennie, ce qui est significatif et important sur le plan du fonctionnement végétal. Cet élément spécifique pourrait théoriquement indiquer que les conditions bioclimatiques sont plus favorables et induisent une durée plus longue de l'activité photosynthétique. Les variations de durée de la

saison des pluies peuvent impacter la saison végétative des biomes tropicaux, avec des contrastes selon les espèces : une saison plus courte mais plus intense implique par exemple une baisse du couvert herbacé durant la saison sèche, alors que les espèces avec une capacité racinaire supérieure souffriront moins et résisteront jusqu'au prochain épisode (ou réel démarrage de la saison), car pouvant accéder à des ressources en eau encore disponibles plus profondément. Mais la tendance observée peut aussi traduire (en partie ou totalement) une présence plus longue en fin d'année de superficies recouvertes de végétation encore verte, surfaces qui peuvent être d'origine essentiellement agricole, en lien avec les changements rapides et importants d'utilisation du sol observés régionalement, et donc peu dépendantes directement de la variabilité pluviométrique régionale.

## Conclusion

A l'échelle du site hydroclimatique expérimental de l'Ouémé supérieur, instrumenté dans le cadre du réseau AMMA-CATCH, aucune tendance des précipitations n'est observée sur la période postérieure à 2000, même si les cumuls pluviométriques sont bien supérieurs à ceux des décennies précédentes. En revanche, en déterminant sur une décennie l'évolution du calendrier de l'activité végétale grâce aux données provenant de la télédétection, on observe un allongement de la saison végétative, avec un recul de sa date de fin. Afin de mieux préciser ce diagnostic à l'échelle de tout le domaine guinéen, de nouvelles analyses sont en cours, en intégrant d'autres données satellitaires intégrant des estimations pluviométriques (TRMM par exemple) et d'autres indices d'activité photosynthétique (de type EVI par exemple).

## Références bibliographiques

Descroix L., Mahé G., Lebel T., Favreau G., Galle S., Gautier E., Olivry J.-C., Albergel J., Amogu O., Cappelaere B., Dessouassi R., Diedhiou A., Le Breton E., Mamadou I., Sighomnou D., 2009 : Spatio-temporal variability of hydrological regimes around the boundaries between Sahelian and Sudanian areas of West Africa: a synthesis. *Journal of Hydrology*, **375**, 90-102.

Eklundh L., Jönsson P., 2011 : *Timesat 3.1 Software Manual*. Lund University, Sweden.

Fontaine B., Roucou P., Gaetani M., Marteau R., 2011 : Recent changes in precipitation, ITCZ convection and northern tropical circulation over North Africa (1979–2007). *International Journal of Climatology*, **31** (5), 633-648.

Gosset M., Viarre J., Quantin G., Alcoba M., 2013 : Evaluation of several rainfall products used for hydrological applications over West Africa using two high-resolution gauge networks. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **139**, 923-940.

Hoscilo A., Balzter H., Bartholomé E., Boschetti M., Brivio P. A., Brink A., Clericic M., Pekelc J. F., 2014 : A conceptual model for assessing rainfall and vegetation trends in sub-Saharan Africa from satellite data. *Int. J. Climatol.*, 11 pages, DOI: 10.1002/joc.4231.

Lebel T., Ali A., 2009 : Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990–2007). *Journal of Hydrology*, **375**, 52-64.

Lebel T., Cappelaere B., Galle S., Hanan N., Kergoat L., Levis S., Vieux B., Descroix L., Gosset M., Mougin E., Peugeot C., Seguis L., 2009 : AMMA-CATCH studies in the Sahelian region of West-Africa: An overview. *Journal of Hydrology*, **375**, 3-13.

Leroux L., 2012 : *Analyse diachronique de la dynamique paysagère sur le bassin supérieur de l'Ouémé (Bénin) à partir de l'imagerie Landsat et MODIS – cas d'étude du communal de Djougou*. Rapport de stage d'ingénieur, programme ANR ESCAPE, 62 pages.

Maidment R. I., Grimes D., Allan R. P., Tarnavsky E., Stringer M., Hewison T., Roebeling R., Black E., 2014 : The 30 year TAMSAT African Rainfall Climatology And Time series (TARCAT) data set. *J. of Geophysical Research: Atmospheres*, DOI: 10.1002/2014JD021927.

Nicholson S., 2005 : On the question of the 'recovery' of the rains in the West African Sahel. *Journal of Arid Environments*, **63**, 615-641.