

AMMA-CATCH : UN OBSERVATOIRE HYDROLOGIQUE, MÉTÉOROLOGIQUE ET ÉCOLOGIQUE DE LONG TERME EN AFRIQUE DE L'OUEST. RÉSULTATS IMPORTANTS ET DONNÉES DISPONIBLES

GALLE S⁽¹⁾, C. PEUGEOT⁽²⁾, M. GRIPPA⁽³⁾, V. CHAFFARD⁽¹⁾, S. AFOUDA⁽⁸⁾, E.K. AGBOSSOU⁽⁵⁾, E.E. AGO⁽⁵⁾, M. ARJOUNIN^(1,8), B. AWESSOU⁽⁵⁾, M. BOUCHER^(1,8), M. BOUKARI⁽⁵⁾, J-M. COHARD⁽¹⁾, M. DOSSOU⁽⁷⁾, M. DESCLOITRES⁽¹⁾, M. GOSSET⁽³⁾, B. HECTOR⁽¹⁾, E. LAWIN⁽⁵⁾, O. MAMADOU⁽⁶⁾, E. MASON⁽⁸⁾, T. OUANI⁽⁸⁾, A. RICHARD⁽¹⁾, J. SEGHERI⁽²⁾, L. SÉGUI⁽²⁾, C. VELLUET⁽⁸⁾, J-M. VOUILLAMOZ⁽¹⁾, M. WUBDA⁽⁸⁾, N. YALO⁽⁵⁾, A. ZANNOU⁽⁷⁾ ET LES ÉQUIPES AMMA-CATCH DU NIGER ET DU MALI^(1,2,3,4,9,10,11)

(1) LTHE, Domaine Universitaire, 38000 Grenoble, France ; sylvie.galle@ird.fr

(2) HSM, 34000 Montpellier, France

(3) GET, 31000 Toulouse, France

(4) Université Abdou Moumouni, Faculté des Lettres et Sciences Humaines (FLSH), BP 418 Niamey, Niger

(5) Université d'Abomey Calavi, : Institut National de l'Eau (INE), 01BP526 Cotonou

(6) Université d'Abomey-Calavi, Institut de Mathématiques et en Sciences Physiques (IMSP), , BP:613 Avakpa, Porto-Novo, Bénin

(7) Direction Générale des Ressources en Eau, 01BP385, Bénin

(8) IRD, représentation au Bénin, 08BP841 Cotonou, Bénin

(9) Université des Sciences et Techniques de Bamako, FST, BPE 3206, Bamako, Mali

(10) Université de Zinder, Faculté des Lettres et Sciences Humaines (FLSH), Zinder, Niger

(11) Université de Maradi, Faculté d'Agronomie et des Sciences de l'Environnement, Niger

Résumé – AMMA-CATCH est un système d'observation multi-échelle dédié à la surveillance à long terme du cycle de l'eau, la dynamique de la végétation et de leurs interactions avec les ressources en eau en Afrique de l'Ouest. Dans le contexte des changements globaux, les observations à long terme sont nécessaires pour i) acquérir une compréhension des processus éco-hydrologiques sur cette région très contrastée, ii) aider à leur représentation dans les modèles du système terrestre, et iii) détecter les tendances pour en déduire leurs impacts sur les ressources en eau et les conditions de vie, et pouvoir ainsi anticiper les risques.

L'Observatoire est composé de trois sites à méso-échelle ($\sim 1^\circ \times 1^\circ$) au Mali, au Niger et au Bénin, s'étendant le long du gradient éco-climatique d'Afrique de l'Ouest. Dans cette fenêtre régionale (5° par 9°), chacun des trois sites documente les composantes du bilan hydrologique et les évolutions des conditions de surface: pluie, niveau de la nappe, débit des rivières, humidité et température du sol, flux d'évapotranspiration et de CO₂, LAI, biomasse. Au Bénin depuis 2015 certaines stations de mesures sont équipées en télétransmission.

Ce système d'observation génère en continu un ensemble de données cohérentes depuis une vingtaine d'années. Il est géré conjointement par des institutions de recherche françaises et Africaines (Mali, Niger et Bénin). La base de données est disponible à la communauté à travers le site web (www.amma-catch.org). AMMA-CATCH participe à plusieurs réseaux d'observation mondiaux ou régionaux, tels que FluxNet, CarboAfrica, Réseaux d'humidité des sols internationaux (ISMN) et aux campagnes de calibration-validation (CAL-VAL) pour les missions satellites comme SMOS (Europe / France / Espagne), Megha-Tropiques (France / Inde) ou SWAP (NASA). Les résultats récents de la recherche menée sur notre observatoire sont présentés suivant 3 axes : la dynamique régionale de long terme, les processus éco-hydrologiques et les applications pour la société et le développement.

Au Bénin les résultats principaux de l'observatoire AMMA-CATCH portent sur les bilans de flux et de carbone qui n'avaient encore jamais été mesurés dans cette région, le rôle des réservoirs souterrains et des arbres (ripisylves, forêts) dans le fonctionnement hydrologique et la caractérisation hydrogéophysique des stocks d'eau souterrains en zone de socle. Les données de l'observatoire ont également permis l'évaluation de produits issus de missions satellitaires (SMOS - humidité du sol et Megha Tropiques - pluies), et la modélisation du cycle hydrologique continental pour la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE). Les données télétransmises contribueront aux programmes d'alerte précoce contre les inondations.

Mots-clés : Observation in situ, changement climatique, base de données, long terme

Abstract – AMMA-CATCH a hydrological, meteorological and ecological long term observatory on West Africa : notable results and available data. AMMA-CATCH is a multi-scale observation system dedicated to long-term monitoring of the water cycle, the vegetation dynamics and their interaction with climate and water resources in West Africa. In the context of the global change, long-term observations are required to i) gain understanding in eco-hydrological processes over this highly contrasted region, ii) help their representation in Earth System Models, and iii) detect trends and infer their impacts on water resources and living conditions.

It is made of three meso-scale sites ($\sim 1^\circ \times 1^\circ$) in Mali, Niger and Benin, extending along the West African eco-climatic gradient. Within this regional window (5° by 9°), each of the three sites comprises a multi-scale set-up which helps documenting the

components of the hydrologic budget and the evolutions of the surface conditions : rainfall, water table level, river discharge, soil moisture and soil temperature, evapotranspiration and CO2 fluxes, LAI, biomass. In Benin, since 2015, some measuring stations are equipped with teletransmission.

This observation system has been continuously generating coherent datasets for about 20 years. It is jointly operated by French and African (Mali, Niger and Benin) research institutions. The data-base is available to the community through the website (www.amma-catch.org). AMMA-CATCH is a member of the French critical zone observatory network "Réseau des Bassins Versants", (RBV). AMMA-CATCH participates to several global or regional observation networks, such as FluxNet, CarboAfrica, International Soil Moisture Networks (ISMN) and to calibration/validation campaigns for satellite missions such as SMOS (Europe / France / Spain), MEGHA-TROPIQUES (France/India) or SWAP (NASA). Recent results will be presented in three axes : regional long term evolution, eco-hydrological processes and the applications for the society and development. In Benin the main results of the AMMA-CATCH observatory focus on water and carbone balance that had never been measured in this region, the role of underground tanks and trees (riparian forests, woodlands), the hydrological dynamics and the characterization of hard rock aquifer. The observatory's dataset also allowed the Calibration-Validation (CAL-VAL) of products from satellite (SMOS - Soil Moisture and Megha-Tropiques - rain), and modeling of the continental hydrological cycle for integrated water resources management (IWRM). The teletransmitted data will contribute to the early warning programs against flooding.

Keywords : *In situ observation, climate change, database, long-term*

Introduction

Le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat a confirmé ses précédents rapports. En effet, à travers son cinquième rapport (GIEC, AR5, 2013), il alerte la communauté internationale sur les possibles impacts du réchauffement climatique causés par l'augmentation des gaz à effet de serre. Notamment, il est attendu que de nombreuses composantes du cycle de l'eau (pluviométrie, ressource en eau, débit) soient affectées par le changement climatique, modifiant ainsi la disponibilité spatiale et temporelle de la ressource en eau et les risques hydrologiques (Huntington, 2006).

Néanmoins, il est en 2016 très difficile de proposer des stratégies d'adaptation au changement climatique à cause des fortes incertitudes des simulations futures des modèles de climat notamment concernant le cycle de l'eau et la variable précipitation. Ces incertitudes sont plus importantes dans certaines régions du monde notamment celles de la zone inter-tropicale considérées comme un des 'hot spots' de la recherche sur le climat (GIEC, 2013; Toreti *et al.*, 2013). D'une part, les enjeux pour la société sont importants dans ces régions où les populations sont en général très vulnérables aux aléas du climat. D'autre part, la circulation atmosphérique de la bande inter-tropicale est au cœur de la redistribution de l'énergie et de l'eau atmosphérique à l'échelle globale ; une modification de son fonctionnement aura probablement un impact sur la circulation et le climat des zones extra-tropicales (Hu and Fu, 2007; Seidel *et al.*, 2008). Pourtant, les modèles de climat produisent des projections très discordantes dans les tropiques soulignant des difficultés à représenter les signaux climatiques spécifiques à ces régions. De plus, la réponse des éco-hydrosystèmes tropicaux aux changements climatiques, est non linéaire et encore mal connue. La climatologie des régions inter-tropicales pourrait nous aider à évaluer le réalisme des différentes projections des modèles climatiques, mais elle est de manière générale mal documentée car les études basées sur les observations souffrent d'un manque de données, particulièrement en Afrique subsaharienne.

L'observatoire éco-hydro-climatique AMMA-CATCH a été mis en place avec trois objectifs (i) documenter la variabilité du climat et de l'hydrologie sur la base de séries de référence nécessaires pour l'évaluation des simulations de modèles et de la télédétection, (ii) mieux comprendre les mécanismes atmosphériques et de surface à l'origine de cette variabilité, (iii) étudier les impacts de la variabilité du climat et anthropique sur la réponse des éco-hydrosystèmes et sur la dynamique des écosystèmes. L'observatoire AMMA-CATCH est un « Service National d'Observation » (SNO) de l'INSU¹, il a également reçu le label « Sud » de l'IRD.

¹ INSU : Institut National des Sciences de l'Univers du CNRS

En octobre 2013 lors de son atelier annuel qui regroupe tous les responsables d'instruments (Principal Investigators - PIs) et un représentant des partenaires de chaque pays, le SNO a défini trois axes thématiques sur lesquels ses forces sont engagées et qui pilotent la stratégie d'observation et d'instrumentation, et donc les mesures réalisées: (1) Evolution des systèmes à long terme avec une portée régionale ; (2) Etude des processus ; (3) Réponse aux besoins socio-économiques et de développement.

La première partie de l'article présente la stratégie d'observation et de diffusion des données du SNO à l'échelle de l'Afrique de l'Ouest, ainsi que sa déclinaison au Bénin. La deuxième partie expose les principaux résultats récents. L'évolution de la pluviométrie, du couvert végétal et la réponse des hydrosystèmes à l'échelle de l'Afrique de l'Ouest sont tout d'abord exposés. Les processus hydrologiques dominants mis en évidence en climat Sahélien et en climat soudanien ainsi que leurs différences sont ensuite présentés, avec un zoom sur les résultats récents et importants obtenus sur le site béninois de la haute vallée de l'Ouémé.

1. Stratégie d'Observation du SNO AMMA-CATCH

1.1. Approche multi-échelles

AMMA-CATCH est un SNO qui vise à documenter sur le long terme les évolutions climatiques, hydrologiques et écologiques en Afrique de l'Ouest. Il s'appuie sur trois sites densément instrumentés, étagés en latitude de manière à échantillonner les gradients éco-climatiques caractéristiques de la région. Ils sont situés au Mali, au Niger et au Bénin (Figure 1). Certains fonctionnent depuis le milieu des années 1980 sur la partie sahélienne de l'observatoire. La superficie de chacun de ces trois sites de méso-échelle est comprise entre 10 000 et 35 000 km². A l'intérieur de chaque site, on réalise des observations hydro-éco-météorologiques plus fines sur des super-sites et des sites intensifs locaux. Le protocole de mesure est harmonisé sur les trois sites.

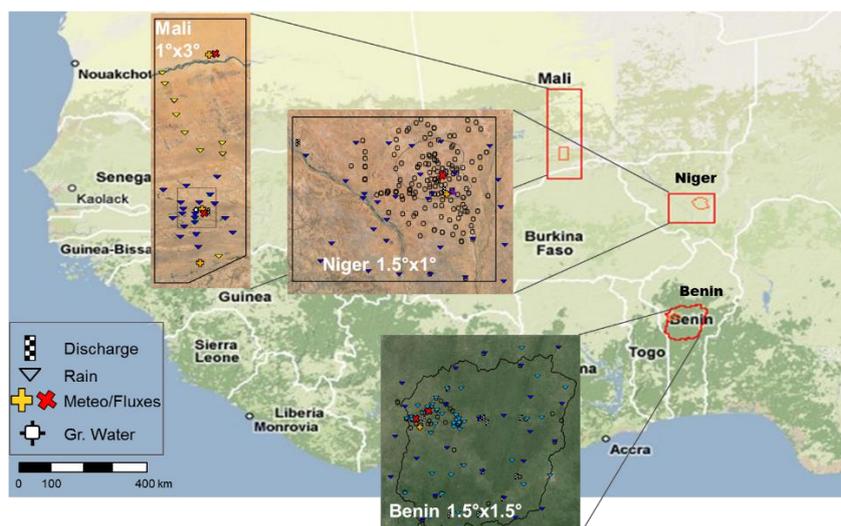


Figure 1 : Dispositif expérimental de l'observatoire AMMA-CATCH : trois expérimentaux densément instrumentés situés au Mali, au Niger et au Bénin.

1.2. AMMA-CATCH au Bénin

Au Bénin, les partenaires de l'observatoire AMMA-CATCH sont le Laboratoire d'Etude des Transferts en Hydrologie et Environnement (LTHE) de Grenoble, le laboratoire Hydrosiences

de Montpellier, l'Université d'Abomey-Calavi (UAC) et la Direction Générale des Ressources en Eau du Bénin (DGRE). Ces deux dernières structures sont fédérées dans l'Institut National de l'Eau (INE).

Le site de méso-échelle du Bénin est la haute vallée de l'Ouémé (14 000 km²) sur lequel sont implantés 125 stations de mesure (850 capteurs) qui documentent l'ensemble des termes des bilans hydrologique et énergétique : la pluie, le ruissellement en rivière, l'humidité des sols, la hauteur de la nappe, l'évapotranspiration, les flux de CO₂, le bilan radiatif et les flux de sève.

Depuis 2006, 14 thèses et HDR² s'appuyant sur les données de l'observatoire du Bénin ont été soutenues. Elles se sont intéressées à l'ensemble du cycle hydrologique et ont étudié la pluie et ses caractéristiques (Lawin, 2007 ; Zahiri, 2007 ; Moumouni, 2009 ; Panthou, 2013), le bilan hydrologique (Le Lay, 2006 ; Kamagaté, 2006 ; Zannou, 2011 ; Robert, 2012 ; Richard, 2014) la caractérisation des sols (Descloîtres, 2010 ; Hector, 2014) et les flux d'eau et d'énergie (Doukouré, 2011 ; Mamadou, 2014 ; Ago, 2016).

1.3. Traitement et diffusion des données

L'ensemble des données acquises par le SNO sont récoltées mensuellement lors de tournées des appareils. Ces données sont régulièrement transmises aux PI scientifiques qui sont chargés de les critiquer et de les étalonner. Les données sont transmises annuellement à la responsable de la base de données. Elles sont disponibles en ligne sur le portail web : <http://bd.amma-catch.org/amma-catch2>. Les données qui ont plus de 3 ans sont publiques et accessibles librement à tous les scientifiques. Les partenaires du projet ont accès à toutes les données.

Actuellement plus de 70% des requêtes concernent les données de pluie et d'humidité des sols.

2. Principaux résultats récents

2.1. Evolution du régime pluviométrique

Après la forte période de sécheresse qui a démarré dans les années 1970 et qui a duré vingt ans, on observe une reprise de la pluviométrie depuis les années 1990. Cette tendance doit toutefois être nuancée au niveau régional car si on observe bien une reprise à l'Est (0°E-10°E), à l'Ouest en revanche, près de la côte atlantique la sécheresse perdure (Lebel et Ali, 2009). Les projections du GIEC (AR5, 2013) indiquent que cette différence pluviométrique Est-Ouest pourrait s'accroître dans le futur.

L'étude des extrêmes pluviométriques menée par Panthou *et al.* (2014) montre que la part des événements pluvieux forts (>30 mm) dans le cumul annuel croit régulièrement depuis 1990 et elle dépasse maintenant les pourcentages observés avant 1970 (Figure 2). Si les cumuls annuels de pluie des années récentes sont équivalents à ceux observés avant les années de sécheresse, cette similitude cache une modification du régime pluviométrique : les événements pluvieux importants occupent une plus grande place. On dit que régime pluviométrique s'est intensifié.

² HDR : diplôme d'Habilitation à Diriger des Recherches

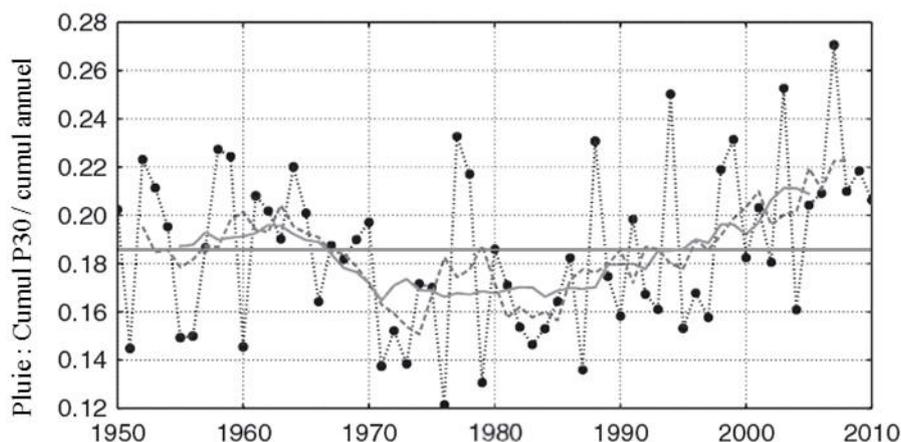


Figure 2 : Evolution des pluies extrêmes depuis 1970 : contribution des pluies supérieures à 30 mm (P30) dans le cumul total annuel. D'après Panthou *et al.* (2014).

2.2. Evolution régionale du couvert végétal

Le suivi régional de la végétation par télédétection montre globalement une reprise des valeurs de NDVI³ sur la zone sahélienne en 30 ans (entre 1980 et 2010), avec toutefois des exceptions locales (Dardel *et al.*, 2014). Ces tendances et cette variabilité sont confirmées par les mesures in situ faites par l'observatoire AMMA-CATCH depuis 1990 (Figure 3).

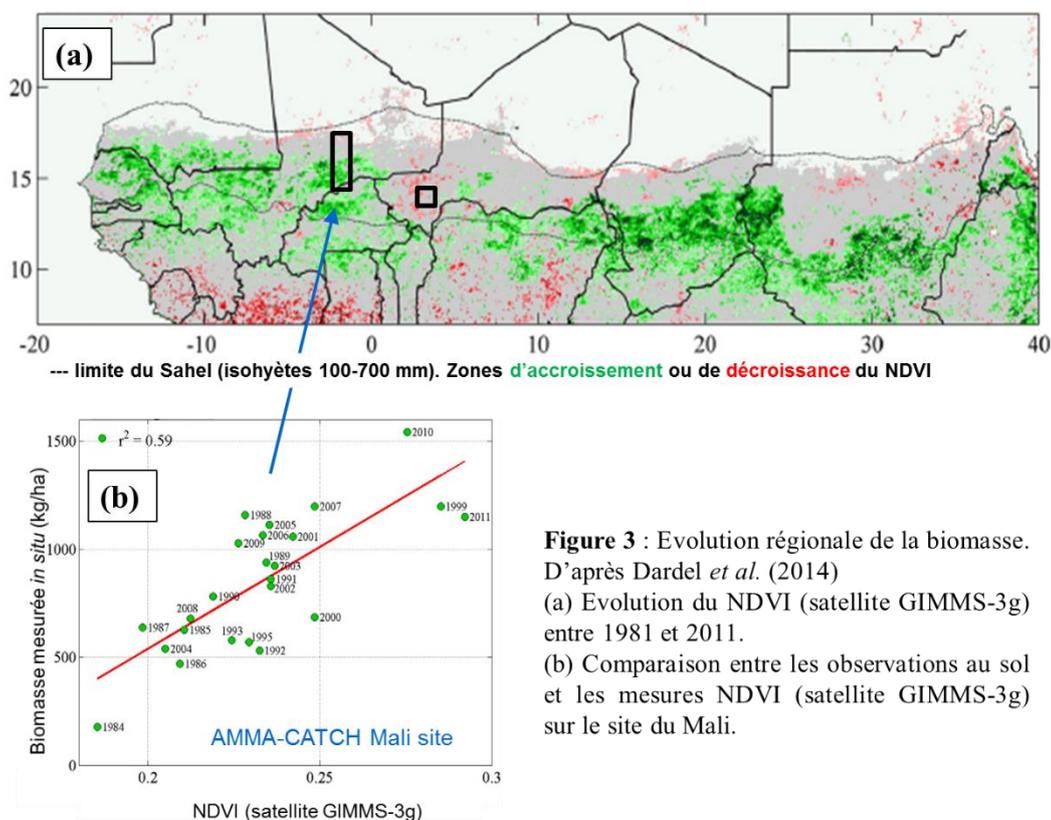


Figure 3 : Evolution régionale de la biomasse. D'après Dardel *et al.* (2014)

(a) Evolution du NDVI (satellite GIMMS-3g) entre 1981 et 2011.

(b) Comparaison entre les observations au sol et les mesures NDVI (satellite GIMMS-3g) sur le site du Mali.

³ NDVI : Normalised Difference Vegetation Index. C'est un indicateur de la biomasse verte de la végétation. Il est calculé à partir des données de télédétection en utilisant les longueurs d'onde Visible (VIS) et Proche Infra-Pouge (PIR) : $NDVI = (NIR - VIS) / (NIR + VIS)$

Le Sahel se reverdit après le grand épisode de sécheresse des années 1970. Toutefois les études locales montrent des réalités sous mailles qui ne sont pas saisies par le satellite (Hein *et al.*, 2011): certaines zones restent nues à côté de zones très vertes, là où l'eau se concentre. Les espèces herbacées et arborées ne sont plus les mêmes, le nombre d'arbres diminue globalement au Sahel comme en région soudanienne, sous la pression climatique mais aussi anthropique (Brandt *et al.*, 2016). D'autres études menées à l'échelle de l'Afrique subsaharienne (Eva *et al.*, 2006) montrent que la déforestation est une tendance majeure en Afrique de l'Ouest : entre 1975 et 2000 les zones cultivées ont augmenté de 57% au dépens des forêts qui couvraient auparavant un tiers de la région d'Afrique de l'Ouest (Eva *et al.* 2006).

2.3. Réponse des hydrosystèmes

Au Sahel, on observe une augmentation de la hauteur de la nappe au Niger (Leblanc *et al.*, 2008) alors que la pluviométrie diminue. Ce phénomène est appelé le paradoxe du Sahel. Il peut être expliqué par la modification de l'occupation des sols et la déforestation qui accélèrent le ruissellement et augmentent ainsi la concentration de l'eau dans les mares. Celles-ci sont les principaux lieux d'alimentation de la nappe phréatique (Boucher *et al.*, 2009). Ce phénomène d'accroissement de la surface des mares est également observé au Mali (Gardelle *et al.*, 2010) dans une zone pastorale où il n'y a pas de cultures. Ici l'augmentation du ruissellement est principalement liée à l'intensification des pluies. L'attribution du ruissellement à la pluie ou à la modification de l'occupation des sols et leur contribution relative est une question ouverte qui reste à étudier.

En zone soudanienne, le ruissellement diminue classiquement avec la pluviométrie. Toutefois une diminution de 20% de la pluviométrie annuelle entraîne une diminution bien plus importante (>60%) des débits (Le Lay *et al.*, 2007) (Figure 4), ce qui peut entraîner des conséquences importantes pour les populations. A l'inverse, une augmentation de la pluviométrie est amplifiée dans les débits (Figure 4). Les années récentes ont vu de nombreuses inondations et leur prévision devient une priorité des gouvernements.

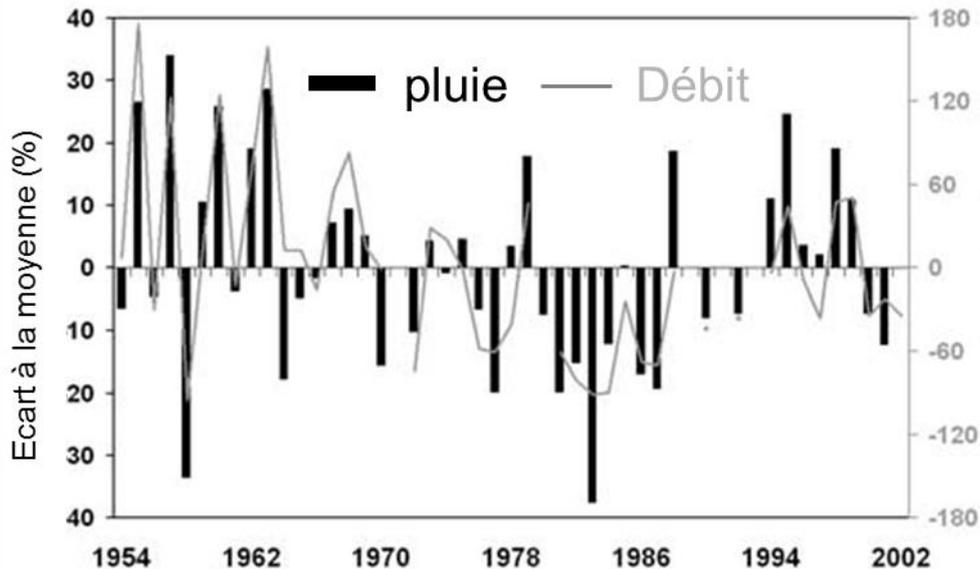


Figure 4 : Anomalies de précipitation (%) et de débit sur le bassin de l'Ouémé supérieur (Bénin) de 1954 à 2002. D'après Le lay *et al.* (2007).

2.4. Etude des processus

Au Sahel le ruissellement hortonien prédomine et le système est très sensible aux états de surface du sol. Des simulations du bilan d'eau et d'énergie montrent que les modèles adaptés simulent bien le bilan sur différents états de surface (Velluet *et al.*, 2014). Ces simulations de référence sont une base précieuse qui permet d'évaluer les schémas de surface des modèles climatiques.

En climat soudanien, la végétation abondante stoppe l'énergie cinétique des gouttes d'eau et l'eau s'infiltré pour ruisseler en subsurface. Sous ce climat il est donc important de caractériser le sous-sol et d'étudier le lien qu'il y a entre les eaux de surface et souterraines. Les caractéristiques des nappes ont été étudiées par géophysique (Descloitres, 2010 ; Descloitres *et al.*, 2011) et leur capacité de stockage caractérisée (Vouillamoz *et al.*, 2015). Des nouvelles techniques comme la gravimétrie ont été testées par rapport aux mesures classiques et ont montré un très bon potentiel pour estimer la quantité d'eau intégrée du sol et son évolution temporelle (Hector *et al.*, 2014 ; 2015). A partir d'un versant instrumenté qu'ils ont modélisé, Richard *et al.*, (2013) ont mis en évidence le rôle des ripisylves dont la transpiration rabat la nappe et l'empêche de contribuer à l'alimentation du cours d'eau. Ces résultats numériques confirment les hypothèses faites par Kamagaté *et al.* (2007) et Séguis *et al.* (2011) qui supposaient la déconnection de la nappe de versant et de la rivière à partir de mesures géochimiques (Figure 5).

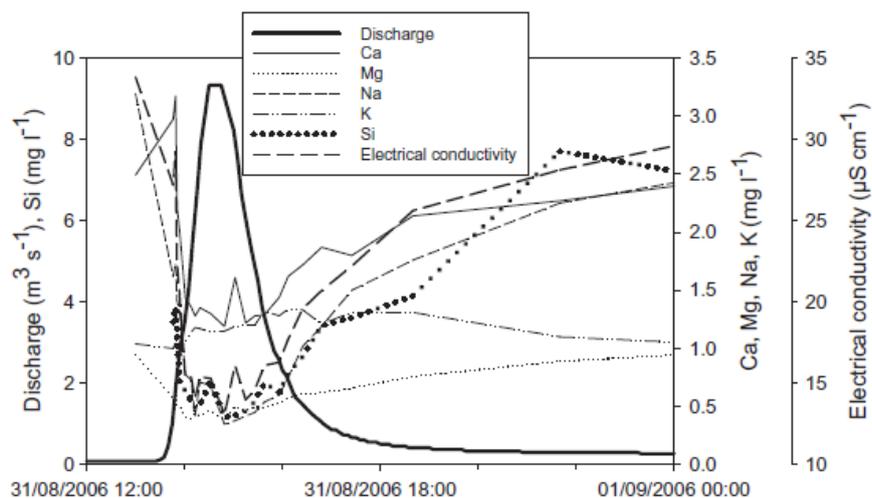


Figure 6 : Evolution typique des cations majeurs (Ca, Mg, Na, K), des concentrations de Si et la conductivité électrique (CE) lors d'une crue en 2006 (Bassin de l'Ara, 13 km², Bénin). Les valeurs de CE observées en crue (15 $\mu\text{S cm}^{-1}$) comme en intercrue (30-35 $\mu\text{S cm}^{-1}$) sont toujours bien inférieures aux valeurs des eaux de la nappe phréatique qui varient entre 140 et 160 $\mu\text{S cm}^{-1}$. Elles sont assez proches de la CE de l'eau de pluie, qui est d'environ 10 $\mu\text{S cm}^{-1}$. D'après Séguis *et al.* (2011).

Seule la transpiration des arbres permet d'expliquer la dynamique annuelle de la nappe observée (Peugeot *et al.*, 2011). Mamadou *et al.* (2016) ont montré que le flux d'évapotranspiration d'une forêt est toujours supérieur à celui d'une culture (Figure 6).

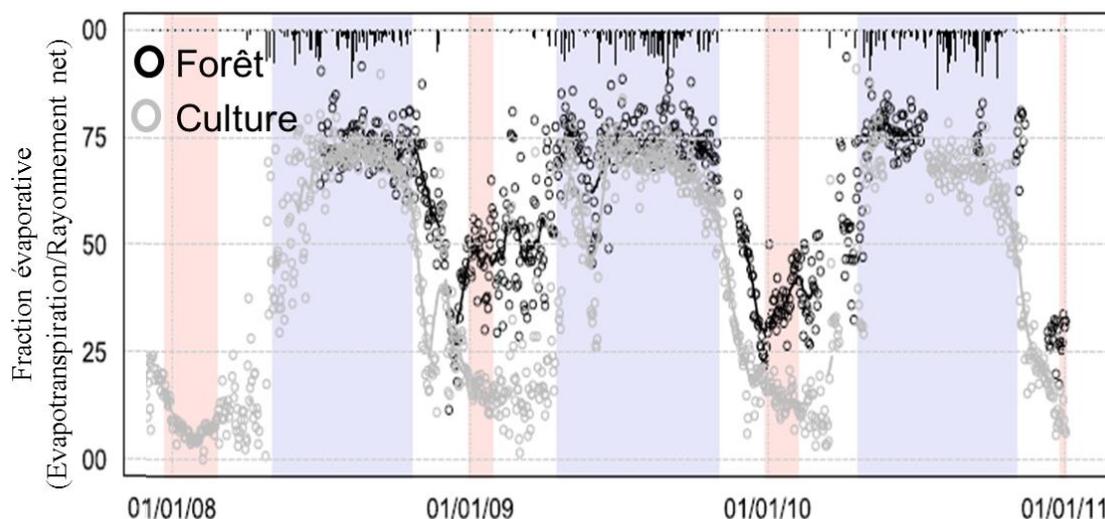


Figure 6 : Evolution de la fraction évaporative d'une forêt (Béléfoungou) et d'une zone cultivée (Nalohou) au Bénin durant trois années. La saison des pluies est sur fond gris-bleuté et la saison sèche sur fond orange. D'après Mamadou *et al.* (2016).

La différence la plus importante est observée à la fin de la saison sèche, lorsque les racines profondes des arbres profitent de l'eau de la nappe et que les cultures ont à peine commencé à pousser. La différence d'évapotranspiration entre une culture et une forêt, observée durant deux années, est de l'ordre de 30%. Dans le même temps, le flux de carbone est deux fois plus important pour la forêt que pour la culture (Ago *et al.*, 2016 ; Ago, 2016). L'impact de la déforestation n'est pas trivial à estimer car la transpiration d'un arbre peut varier, pour une même espèce, suivant son environnement dans une forêt ou une jachère (Awessou *et al.*, 2016).

Conclusion

Les données de long terme de l'observatoire AMMA-CATCH ont permis de mettre en évidence l'intensification de la pluviométrie et du cycle hydrologique. En effet les données à pas de temps fin de l'observatoire ont permis, en complément des données des réseaux nationaux, de vérifier que les cumuls de pluie journaliers les plus importants correspondaient aux intensités de pluie les plus fortes et de les quantifier au Niger (D'Amato, 1998) comme au Bénin (Lawin, 2007). Cependant la déforestation observée dans le même temps induit également un effet important sur le cycle de l'eau. Un des enjeux du futur est d'attribuer et quantifier la part respective de ces deux contributions. Pour répondre à cette question des études de processus doivent se poursuivre. Au Bénin, la relation entre la nappe et l'évapotranspiration est un enjeu d'importance.

Pour extrapoler ensuite les résultats locaux à l'échelle régionale de l'Afrique de l'Ouest, nous avons besoin de données à cette échelle. C'est pourquoi le SNO AMMA-CATCH est engagé dans des campagnes de Calibration-Validation des nouveaux produits satellitaires caractérisant la pluviométrie (Gosset *et al.*, 2013) et l'humidité des sols (Louvet *et al.*, 2015). Ces résultats amènent de nouvelles voies de recherche prometteuses notamment en pluviométrie.

Dans le futur, les activités de l'observatoire au Bénin se feront en poursuivant une collaboration approfondie avec l'INE avec qui nous déclinerons les actions à mettre en place au Bénin et les projets à déposer pour financement. Ces actions devront se traduire si possible en services climatiques mis à la disposition des décideurs.

Références bibliographiques

- Ago E.E., 2016 : *Dynamique des flux de carbone entre l'atmosphère et des écosystèmes Ouest-Africains : cas des forêts et savanes sous climat soudanien au Bénin*. Thèse de l'Université de Liège-Gembloux (Belgique).
- Ago E.E., Agbossou E.K., Cohard J-M., Galle S. and Aubinet M., 2016 : Response of CO₂ fluxes and productivity to water relations in two contrasting ecosystems in northern Benin (West Africa). *Annals of Forest Science*, **73**, no. 1 (2016): 1–18.
- Awessou K.G.B., C. Peugeot, A. Rocheteau, L. Seguis, F. C. Do, S. Galle, M. Bellanger, E. Agbossou, and J. Seghieri, 2016 : Differences in Transpiration between a Forest and an Agroforestry Tree Species in the Sudanian Belt. *Agroforestry Systems*, April 19, 2016, 1–11. doi:10.1007/s10457-016-9937-8.
- Boucher M., G. Favreau, M. Descloitres, J-M. Vouillamoz, S. Massuel, Y. Nazoumou, B. Cappelaere, and A. Legchenko, 2009 : Contribution of Geophysical Surveys to Groundwater Modelling of a Porous Aquifer in Semiarid Niger: An Overview. *Comptes Rendus Geoscience* **341**, no. 10–11, 800–809.
- Brandt M., Hiernaux P., Rasmussen K., Mbow C., Kergoat L., Tagesson T., Ibrahim Y. Z., Wélé A., Tucker, C. J. and Fensholt R., 2016 : Assessing woody vegetation trends in Sahelian drylands using MODIS based seasonal metrics. *Remote Sensing of Environment*, **183**, 215-225.
- d'Amato N., 1998 : *Etude climatologique et statistique des événements pluvieux en zone sahélienne. Analyse à partir des données pluviographiques de L'expérience EPSAT-NIGER*. Thèse de doctorat de l'Université Scientifique et Technique du Languedoc, Montpellier (France).
- Dardel C., Kergoat L., Hiernaux P., Mougin E., Grippa M. and Tucker C.J., 2014 : Re-greening Sahel: 30 years of remote sensing data and field observations (Mali, Niger). *Remote Sensing of Environment*, **140** (0), 350 364.
- Descloitres M., 2010 : *Aquifères, recharges et transferts d'eau en zone non saturée : caractérisation par spatialisation et suivi temporel géophysique*. Thèse d'Habilitation à Diriger des Recherches de l'Université Joseph Fourier – Grenoble (France).
- Descloitres M., L. Séguis, A. Legchenko, M. Wubda, A. Guyot and J.M. Cohard, 2011 : The contribution of MRS and resistivity methods to the interpretation of actual evapo-transpiration measurements: a case study in metamorphic context in north Bénin. *Near Surface Geophysics*, **9**, 187-200.
- Doukouré M., 2011 : *Variabilité des flux turbulents de surface au sein du bassin versant d'ARA au Bénin*. Thèse de doctorat de l'Université de Grenoble (France).
- Eva H.D., Brink A. and Simonetti D., 2006 : *Monitoring land cover dynamics in sub-Saharan Africa. Inst. Environ. Sustain.* Tech Rep EUR 22498.
- Gardelle J., Hiernaux P., Kergoat L. and Grippa M., 2010 : Less rain, more water in ponds: a remote sensing study of the dynamics of surface waters from 1950 to present in pastoral Sahel (Gourma region, Mali). *Hydrology and Earth System Sciences*, **14** (2), 309–324.
- GIEC, AR5, 2013 : "*Climate Change 2013 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*". Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA : Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)
- Gosset M., Viarre, J., Quantin, G. and Alcoba, M. 2013 : Evaluation of several rainfall products used for hydrological applications over West Africa using two high-resolution gauge networks. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **139** (673), 923 940.
- Hector B., 2014 : *Caractérisation hydrogéophysique multi-échelles et dynamique des stocks d'eau souterrains d'un bassin versant en zone soudanienne de socle : apport de la gravimétrie*. Thèse de doctorat de l'Université de Strasbourg (France).
- Hector B., Hinderer J., Séguis L., Boy J-P., Calvo M., Descloitres M., Rosat S., Galle S. and Riccardi U., 2014 : Hydro-gravimetry in West-Africa: First results from the Djougou (Benin) superconducting gravimeter. *Journal of Geodynamics*, **80**, 34-49.
- Hector B., Séguis L., Hinderer J., Cohard J-M., Wubda M., Descloitres M., Benarrosh N. and Boy J-P., 2015 : Water storage changes as a marker for base flow generation processes in a tropical humid basement catchment (Benin): Insights from hybrid gravimetry: Hybrid Gravimetry for Base Flow Processes in West Africa. *Water Resources Research*, **51**, doi:10.1002/2014WR015773.

- Hein L., de Ridder N., Hiernaux P., Leemans R., de Wit A. and Schaepman M., 2011 : Desertification in the Sahel: Towards better accounting for ecosystem dynamics in the interpretation of remote sensing images. *Journal of Arid Environments*, **75**, 1164-1172.
- Hu Y. and Fu Q., (2007) : Observed poleward expansion of the Hadley circulation since 1979. *Atmospheric Chemistry and Physics*. P. 5229–5236.
- Huntington T.G., (2006) : Evidence for intensification of the global water cycle : Review and synthesis. *Journal of Hydrology*. P. 83–95.
- Kamagaté B., L. Séguis, G. Favreau, J.-L. Seidel, M. Descloitres, and P. Affaton, 2007 : Processus et Bilan Des flux Hydriques D'un Bassin Versant de Milieu Tropical de Socle Au Bénin (Donga, Haut Ouémé). *Comptes Rendus Geoscience* **339**, 418–29. doi:10.1016/j.crte.2007.04.003.
- Kamagaté B., 2006 : *Fonctionnement hydrologique et origine des écoulements sur un bassin versant en milieu tropical de socle au Bénin: bassin versant de la Donga (Haute vallée de l'Ouémé)*. Thèse de doctorat de l'Université de Montpellier 2 (France).
- Lawin E., 2007 : *Analyse climatologique et statistique du régime pluviométrique de la haute vallée de l'Ouémé à partir des données pluviographiques AMMA-CATCH Bénin*. Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG) et de l'Université d'Abomey-Calavi (Bénin).
- Le Lay M., 2006 : *Modélisation Hydrologique Dans Un Contexte de Variabilité Hydro-Climatique. Une Approche Comparative Pour L'étude Du Cycle Hydrologique À Méso-Échelle Au Bénin*. Thèse de Doctorat, de l'Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG) (France).
- Le Lay M., Galle S., Saulnier G.-M., Braud I., 2007 : Exploring the relationship between hydroclimatic stationarity and rainfall-runoff model parameter stability: a case study in West Africa. *Water Resources Research*, **43** (7), W07420.
- Lebel T. and Ali A., 2009 : Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990-2007). *Journal of Hydrology*, **375** (1-2), 52 64.
- Leblanc M.J., Favreau G., Massuel G., Tweed S.O., Loireau M., and Cappelaere B., 2008 : Land clearance and hydrological change in the Sahel: SW Niger. *Global and Planetary Change*, **61** (3–4), 135 150.
- Louvet S., Pellarin T., al Bitar A., Cappelaere B., Galle S., Grippa M., Gruhier C., Kerr Y., Lebel T., Mialon A., Mougin E., Quantin G., Richaume P., de Rosnay P., 2015 : SMOS soil moisture product evaluation over West-Africa from local to regional scale. *Remote Sensing of Environment*, **156**, 383-394.
- Mamadou O., 2014 : *Etude des Flux d'Evapotranspiration en Climat Soudanien : comportement comparé de deux couverts végétaux au Bénin.*: Université de Grenoble (France) / Université d'Abomey – Calavi (Bénin). 204p.
- Mamadou O., Galle S., Cohard J.-M., Peugeot C., Kounouhéwa B., Zannou A.B., Biron R., 2016 : Dynamics of water vapor and energy exchanges above two contrasting Sudanian climate ecosystems in Northern Benin (West Africa). *Journal of Geophysical research*. Doi : 10.1002/2016JD024749
- Moumouni S., 2009 : *Analyse des Distributions Granulométriques Des Pluies Au Bénin : caractéristiques globales, variabilité et application à la mesure radar*. Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG) et de l'Université d'Abomey-Calavi (Bénin).
- Panthou G., 2013 : *Analyse des extrêmes pluviométriques en Afrique de l'Ouest et de leur évolution au cours des 60 dernières années*. Thèse de doctorat de l'Université de Grenoble (France).
- Panthou G., Vischel T. and Lebel T., 2014 : Recent trends in the regime of extreme rainfall in the Central Sahel. *International Journal of Climatology*, **34** : 3998-4006.
- Peugeot C., Guichard F., Bock O., Bouniol D., Chong M., Boone A., Cappelaere B., Gosset M., Besson L., Lemaître Y., Séguis L., Zannou A., Galle S. and Redelsperger J.-L., 2011 : Mesoscale water cycle within the West African Monsoon. *Atmospheric Science Letters*, **12**, 45-50.
- Richard A., 2014 : *Analyse du cycle hydrologique en climat soudanien au Bénin. Vers une modélisation couplée des processus latéraux et verticaux*. Thèse de doctorat de l'Université de Grenoble (France).
- Richard A., S. Galle, M. Descloitres, J.-M. Cohard, J.-P. Vandervaere, L. Séguis, and C. Peugeot, 2013 : Interplay of Riparian Forest and Groundwater in the Hillslope Hydrology of Sudanian West Africa (northern Benin). *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **17**, no. 12: 5079–96.

Robert D., 2012 : *Caractérisation et modélisation de la dynamique de l'évapotranspiration en Afrique Soudanienne en zone de socle : interaction entre les aquifères et la végétation*. Thèse de doctorat de l'Université de Grenoble (France).

Seidel D.J., Fu Q., Randel W.J. and Reichler T.J., (2008 :) Widening of the tropical belt in a changing climate. *Nature Geoscience*. P. 21–24.

Toreti A., Naveau P., Zampieri M., Schindler A., Scoccimarro E., Xoplaki E., Dijkstra H.A., Gualdi S. and Luterbacher J., (2013) : Projections of global changes in precipitation extremes from Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 models. *Geophysical Research Letters*. P. 4887–4892.

Velluet C., Demarty J., Cappelaere B., Braud I., Issoufou H.B.A, Boulain N., Ramier D., Mainassara I., Charvet G, Boucher M., 2014 : Building a field- and model-based climatology of local water and energy cycles in the cultivated Sahel – annual budgets and seasonality. *Hydrol. Earth System Sciences* **18** : 5001-5024

Vouillamoz J.M., Lawson F.M.A., Yalo N., Descloitres M., 2015 : Groundwater in hard rocks of Benin: Regional storage and buffer capacity in the face of change. *Journal of Hydrology* **520**, 379–386.

Zahiri E.P., 2007 : *Cycle de l'eau des systèmes convectifs Ouest Africains: préparation à l'exploitation des mesures radar Xport dans AMMA par simulation*. Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatié, Toulouse (France).

Zannou A., 2011 : *Analyse et modélisation du cycle hydrologique continental pour la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) au Bénin : cas du bassin de l'Ouémé à Bétérou*. Thèse de doctorat de l'Université d'Abomey Calavi, (Bénin).