

Un protocole expérimental pour l'étude du couplage entre hydrologie et végétation en région centrale-sahélienne

Cappelaere B. ^{(1)(*)}, Boulain N. ⁽¹⁾, Ramier D. ⁽¹⁾, Timouk F. ⁽²⁾,
Boubkraoui S. ⁽³⁾, Lloyd C. ⁽⁴⁾, Descroix L. ⁽³⁾

(1) IRD – UMR HydroSciences Montpellier, France

(2) IRD – UMR Cesbio, Toulouse, France

(3) IRD – UMR LTHE, Grenoble, France

(4) CEH, Wallingford, U.K.

(*) correspondance : bernard.cappelaere@univ-montp2.fr

Résumé

Ce document présente le protocole expérimental mis en place depuis 2005 dans la région de Niamey au Niger, dans le cadre du programme AMMA d'étude de la mousson africaine, afin d'analyser les processus physiques et biologiques de la surface continentale sahélienne, intervenant dans le couplage entre la végétation et le cycle hydrologique dans ce milieu semi-aride.

Introduction

La surface continentale joue un rôle très important mais jusqu'ici mal connu dans le fonctionnement de la mousson ouest-africaine, objet du projet international de recherche AMMA (Analyses multidisciplinaires de la Mousson Africaine ; Redelsperger et al., 2006). Dans ce cadre, un important programme expérimental est mis en oeuvre depuis 2005 sur trois sites de méso-échelle répartis le long du gradient éco-climatique latitudinal de l'Afrique de l'Ouest, localisés respectivement, du Nord au Sud, au Mali, au Niger et au Bénin (Figure 1). Ce document présente une partie du dispositif mis en place sur le site du Niger, tournée vers la compréhension du couplage entre les processus hydrologiques et biologiques dans cette région centrale-sahélienne. Les analyses des données produites par le dispositif pour les saisons 2005 et 2006 sont présentées par Ramier et al. (2007) et Boulain et al. (2007).

Problématique

Dans les environnements tropicaux secs, les mécanismes d'interdépendance des cycles de l'eau, de l'énergie et de la végétation sont particulièrement intenses. Le cycle de l'eau joue un rôle fondamental dans le fonctionnement des écosystèmes, notamment dans la bande sahélienne, en influençant de manière profonde le couvert végétal par le type de végétation présente et son développement. Les précipitations au Sahel sont concentrées sur quelques mois et la quantité d'énergie solaire reçue est importante. En d'autres termes, dans cette région, seulement quelques mois par an les pluies sont supérieures à l'évapotranspiration potentielle et c'est durant cette courte période (saison humide) que la végétation peut dérouler son cycle.

Réciproquement, la végétation sahélienne joue un rôle essentiel de contrôle des flux hydriques constitutifs du cycle hydrologique. Relativement peu interceptive, elle intervient de manière très importante sur la partition de la pluie en flux d'infiltration dans le sol et de ruissellement superficiel, à travers son impact majeur sur les états de surface. Un mécanisme essentiel de couplage des cycles de l'eau et de la végétation est celui de l'évapotranspiration, qui permet à la fois le développement végétatif et la restitution de l'eau du sol à l'atmosphère. Par cette modification des stocks hydriques atmosphérique et édaphique, l'impact de la transpiration végétale se propage dans le cycle hydrologique, notamment sur les mécanismes de pluviogénèse convective et de répartition de la pluie en infiltration et ruissellement. Le développement des réseaux racinaires intervient vraisemblablement de manière significative dans le processus de percolation profonde vers la nappe et dans le bilan de celle-ci.

L'un des objectifs du programme AMMA est d'améliorer la compréhension de ces couplages entre processus physiques et biologiques sur les différents sites du système d'observation S.O. AMMA. Dans cet ensemble, le site de la région de Niamey au Niger est représentatif de l'environnement semi-aride du Sahel central. A l'échelle d'un petit bassin-endoréique, qui constitue l'unité principale de ce paysage, un dispositif instrumental a été mis en place pour échantillonner de manière aussi complète que possible les cycles de l'eau, de l'énergie, et de la végétation, et capturer leurs interactions.

Zone d'étude

L'étude a pour cadre le bassin-versant de Wankama; situé à 60 km à l'est de Niamey, capitale de la République du Niger, au cœur du méso-site Amma-Niger (Figure 2).

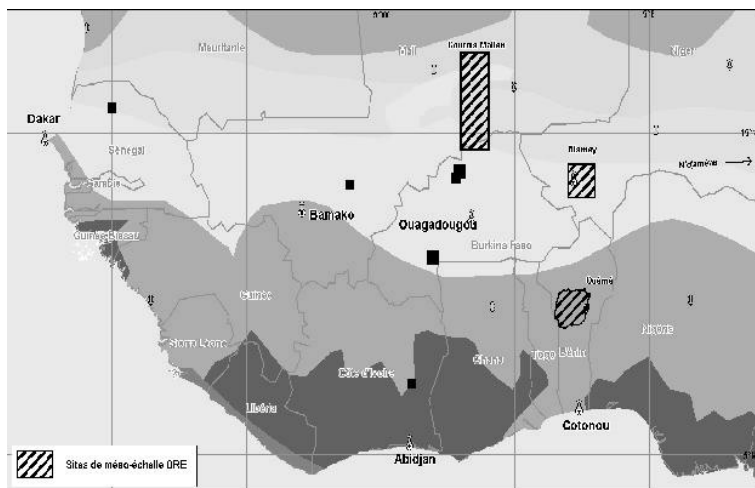


Figure 1 : Situation des trois sites de méso-échelle du programme AMMA

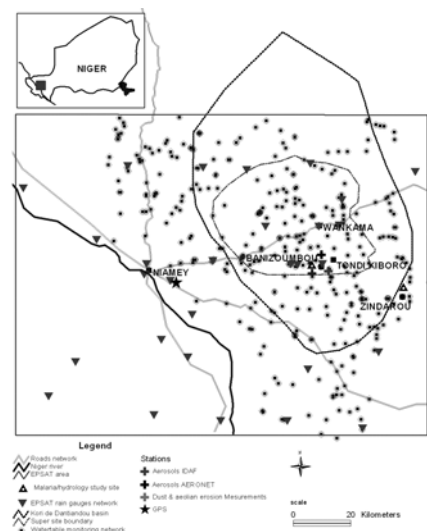
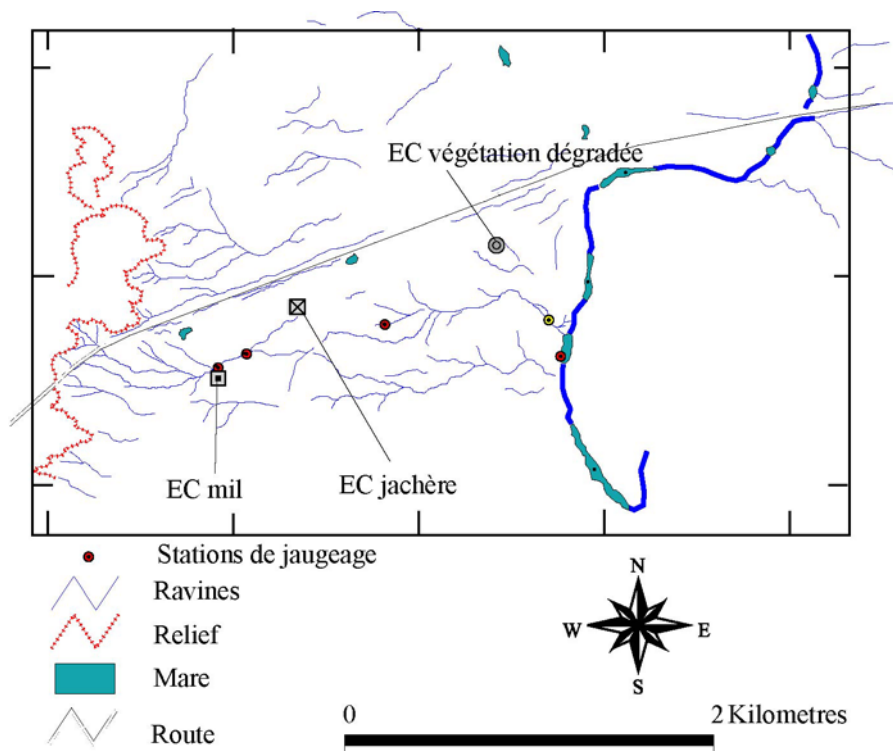


Figure 2 : Site instrumental de méso-échelle AMMA-Niger

Petit bassin-versant endoréique de 1,9 km², il est typique de cette région semi-aride du Sahel central, et est décrit en détail par Peugeot et al. (2003). Il consiste essentiellement en un versant sableux dont la pente moyenne est d'environ 2%, pour une dénivellée de 60 m entre un plateau latéritique et une ancienne vallée fossile. Les précipitations se limitent à une courte saison des pluies, de juin à septembre, pour une moyenne annuelle à Niamey de 560 mm

depuis 1905. La variabilité interannuelle est forte (coefficient de variation de 24%), comme l'est la variabilité spatiale sur les 15000 km² du méso-site Amma-Niger (Vischel, 2006). Comme l'ensemble du Sahel, la région a connu une très grave sécheresse dans les décennies 1970 et 1980, avec un déficit pluvieux de près de 30%. La période récente montre des signes d'un retour à une pluviométrie plus conforme aux normales de long terme, sans toutefois revenir aux décennies favorables 1950-1960. Les pluies se produisent sous forme d'orages convectifs brefs et intenses, pouvant produire de forts ruissellements, qui alimentent une mare endoréique temporaire à l'exutoire du bassin. Le réseau hydrographique consiste essentiellement en une ravine principale comprenant un bief amont et un bief aval séparés à mi-versant par un cône d'épandage alluvial (Peugeot et al., 2003). La mare contribue à la recharge de la nappe phréatique, dont la profondeur varie de 15 m sous la mare à plus de 60 m sous le plateau.

Figure 3: Bassin-versant expérimental de Wankama



Types de couverts

L'agriculture est caractérisée par la culture pluviale extensive du mil, qui couvre 55% de la surface du bassin-versant. Les semis débutent avec les premières pluies. Ils peuvent être répétés plusieurs fois tant que les pluies ne sont pas régulières. La hauteur moyenne du mil à maturité sur le site est d'environ 2 m. Sur l'ensemble du champ, la couverture arbustive est éliminée avant la saison de pluies. Il y a deux à trois sarclages durant la saison pour éliminer la couverture herbacée. La récolte a lieu peu de temps après la fin de la saison des pluies, en septembre ou octobre. L'ensemble épis et tige est retiré du champ lors de la récolte. Le champ est donc nu le reste de l'année.

Des périodes de jachère régulières sont nécessaires dans ce système de production traditionnel. La surface du bassin-versant en jachère représente actuellement 25% de la surface totale. L'ensemble des jachères a moins de 5 ans, qui est l'âge moyen des jachères sur cette région de Niamey (Loireau, 1998). Les jachères se composent d'une strate arbustive dominée par *Guiera senegalensis* (Bégué et al., 1996; Hanan, 2001; Verhoef et al., 1996), et d'une strate herbacée d'annuelles dont la composition dépend de la répartition des pluies en début de saison. La hauteur moyenne de la strate arbustive est de 2 m, et de 0.6 m pour la strate herbacée. La densité du couvert arbustif varie entre 750 arbustes par hectare pour des jeunes jachères ou des jachères dégradées, et 1350 pour des jachères plus âgées (Boulain et al, 2006). La jachère représente la principale source de bois pour la population locale.

Le reste du bassin versant (20%) est caractérisé par une végétation dégradée ou du sol nu (Boulain et al, 2007).

Dispositif expérimental

Dans le cadre du programme AMMA, le bassin-versant de Wankama a été instrumenté pour mesurer les différentes composantes des cycles de l'eau et de la végétation et du bilan d'énergie, sur une période de plusieurs années. Le dispositif inclut notamment :

- un réseau de trois pluviographes enregistreurs et de vingt pluviomètres à lecture journalière ;
- quatre stations de jaugeage à limnigraphe en ravine, à raison de deux par biefs, à l'amont et à l'aval de chacun d'entre eux, auxquelles s'ajoute un limnigraphe dans la mare à l'exutoire du bassin ;
- l'enregistrement continu de six profils d'humidité et de température du sol, jusqu'à une profondeur de 2.5 m, et le suivi périodique par sonde à neutrons de 18 profils jusqu'à une profondeur de 10 à 12 m ;
- trois stations de mesure de flux de surface par la méthode des covariances turbulentes (systèmes dits « EC », pour « eddy covariance »), enregistrant les flux de chaleurs sensible et latente et de CO₂ sur les trois principaux couverts de la région, à savoir un champ de mil, une parcelle en jachère et une zone de couvert dégradé (celle-ci étant instrumentée pour la chaleur sensible uniquement)
- trois stations météorologiques associées aux systèmes EC, permettant le suivi du bilan d'énergie complet et de l'eau du sol;
- onze parcelles de suivi de la végétation, disséminées sur le bassin-versant pour représenter les principaux types de couverts
- un réseau de cinq piézomètres permettant le suivi du niveau phréatique sous le bassin.

Progressivement mis en place à partir de 2004, le dispositif a fonctionné dans sa configuration quasi-nominale en juin 2005. Seule la troisième station de flux, sur végétation dégradée, a démarré un peu plus tard, en janvier 2006.

Le Tableau 1 résume les principales caractéristiques des stations de flux. Ces caractéristiques sont détaillées ci-après.

Un dispositif de mesure spatialement intégrée du flux de chaleur sensible par scintillométrie (technologie de type LAS) a également fonctionné sur le bassin de juillet à octobre 2006. (Ezzahar et al., 2007).

Les stations de flux (EC) complètes

Sur les deux types dominants de couverts (mil et jachère), deux systèmes EC identiques, complets (Figure 4), ont été installés en juin 2005 pour suivre en continu les flux de chaleur sensible, de chaleur latente (évapotranspiration) et de dioxyde de carbone (assimilation et respiration). Ils consistent en l'association d'un anémomètre sonique Campbell CSAT-3 et d'un analyseur de gaz infrarouge (IRGA) Licor 7500 de type « open-path ». Les trois composantes du vecteur vitesse, la température et pression de l'air, et les concentrations en vapeur d'eau et en CO₂ sont mesurées à la fréquence de 20 Hz. Les données sont enregistrées dans une mémoire flash de 1 GO par une station Campbell CR5000.

A chaque site, le bilan radiatif est suivi par un radiomètre différentiel CNR1 de Kipp & Zonen, mesurant séparément les rayonnements descendants et ascendants en courtes et grandes longueurs d'onde. Les échanges de chaleur avec le sol sont mesurés par trois capteurs Hukseflux HFP01SC sur chaque site, placés à 5 cm de profondeur. Le pas d'échantillonnage est de 1 min pour les flux radiatifs et de chaleur dans le sol.

Toutes les composantes du bilan énergétique de la surface sont ainsi échantillonnées à chacun de ces deux sites principaux. Sur le troisième site de mesures de flux, correspondant au terrain dégradé, le système EC associe un anémomètre sonique Solent R3-50, également à 20 Hz, à un radiomètre CNR1, produisant ainsi un bilan d'énergie partiel (pas de chaleur latente, ni de CO₂). Le flux de chaleur dans le sol est déduit des profils de température enregistrés dans celui-ci.

Site	Instrument	Measurements	Height or depth
Millet crop and fallow savana	FLUXES MAST		
	Campbell CSAT3 sonic anemometer	Wind direction and speed	5.1m (millet) and 4.95 m (fallow)
	Li-cor 7500 IRGA	CO ₂ and H ₂ O concentration	4.8m (millet) and 4.65 m (fallow)
	Kipp & Zonen CNR1 radiometer	Shortwave and longwave incoming and outgoing radiation	2.5 m (millet) and 3.4 m (fallow)
	Vaisala HMP45	Air temperature and relative humidity	2 m
	SOIL MEASUREMENTS		
	Campbell CS616 water content reflectometer (x6)	Soil volumetric water content	-1, -.5, -1, -1.5, -2 and -2.5 m
	Campbell T108 temperature probe (x6)	Soil temperature	-1, -.5, -1, -1.5, -2 and -2.5 m
	Hukseflux HFP01SC heat flux plates (x3)	Surface soil heat flux	-.05 m
Degraded land	FLUXES MAST		
	Solent R3-50 sonic anemometer	Wind direction and speed	5 m
	Kipp & Zonen CNR1 radiometer	Shortwave and longwave incoming and outgoing radiation	2 m
	Vaisala WXT510 weather transmitter	Air temperature, relative humidity, atmospheric pressure, wind speed, wind direction	2 m
	RIMCO tipping bucket raingauge	Rainfall amount, duration and intensity	0 m
	SOIL MEASUREMENTS		
	Campbell CS616 water content reflectometer (x2)	Soil volumetric water content	-1, -.5 m
Campbell T107 temperature probe (x2)	Soil temperature	-1, -.5 m	

Tableau 1 : Caractéristiques des instruments équipant les stations de flux (systèmes EC).



Figure 4: Vue du système EC complet équipant les sites de mil et de jachère

Instruments associés

Les autres instruments en service sur chacun des deux sites principaux de mesure de flux (EC) sont les suivants :

- un appareil Vaisala HMP45C mesurant la température de l'air et son humidité relative à 2 m du sol ;
- des capteurs d'humidité et température dans le sol (modèles CS616 TDR et PT-108 de Campbell, respectivement) placés à six profondeurs jusqu'à 2.5 m.

Ces données sont acquises toutes les minutes par les centrales CR5000.

Sur la troisième station de flux (EC), en zone dégradée, les appareils incluent une station météo Vaisala WXT510 (vent, pression, température et humidité de l'air), un pluviomètre RIMCO, ainsi que des capteurs d'humidité et température du sol (CS616 and PT-107) à deux profondeurs (0.1 et 0.5 m).

Traitement des données produites par les systèmes EC

Le traitement de ces données est réalisé en utilisant le logiciel EdiRe (Version 1.4.3.1167, R. Clement, University of Edinburgh). Une conversion des fichiers binaires est réalisée au préalable pour produire des fichiers journaliers au format du logiciel EdiRe. Ce pré-traitement élimine les plages semi-horaires incomplètes. Le traitement par EdiRe inclut les opérations suivantes : despiking, double rotation, corrélation croisée pour obtention du décalage temporel entre l'anémomètre sonique et l'IRGA, corrections spectrales, corrections de Webb, et test de stabilité atmosphérique. Les flux turbulents (chaleurs sensible et latente, CO₂) sont produits au pas de 30 min.

Toutes les autres variables du bilan d'énergie et des données associées sont également moyennées au même pas de 30 min.

Suivi de la végétation

(a) Biomasse

Jachère

Pour les relevés de biomasse et les mesures de LAI, on a suivi plusieurs parcelles de 50m*50m (3 en 2005 et 4 en 2006), représentatives de la jachère suivie par la station de flux. La strate arbustive, quasi mono-spécifique, est composée de *Guiera senegalensis* et de quelques *Combretum micrantum*. La position, la hauteur, le nombre de tiges et les diamètres des arbustes ont été relevés sur chaque parcelle en 2006. La strate herbacée est composée majoritairement de C3 en début de saison et d'un mélange de C3 et de C4 en fin de saison. La strate herbacée ne recouvre pas le sol à 100%, et des zones de sol nu sont présentes, Il s'agit soit de zones où les écoulements sont importants durant les pluies (les annuelles n'ont pas pu s'y établir), ou de restes de termitières abandonnées dont la forte teneur en argile a créé une couche de surface extrêmement compacte et propice au ruissellement. Dans la jachère étudiée, l'espèce dominante de la strate herbacée a été *Zornia glochidiata* (C3), accompagnée majoritairement de *Mitracarpus scaber* (C3) et *Cenchrus biflorus* (C4). D'autres espèces étaient présentes de manière plus marginale comme par exemple: *Andropogon gayanus* (en fin de saison), *Aristida mutabilis*, *Triumphetta pentandra*. On note la présence, dans ou en bordure de la jachère, de rares arbres, le plus souvent *Combretum glutinosum*, *Piliostigma reticulatum* et *Faidherbia albida*. Il y a occasionnellement du pâturage par des troupeaux de zébus et de moutons qui traversent la jachère pour rejoindre la mare en bas de la toposéquence.

Les relevés de biomasse se font à l'aide d'un quadra métallique de 1 m², une fois tous les 15 jours. Le quadra est lancé de manière aléatoire dans les parcelles de suivi. Si le quadra tombe dans une zone déjà récoltée auparavant, il est relancé. Il y a trois lancers par parcelle. Toute la biomasse présente est prélevée. Avant le prélèvement, on relève la hauteur maximum, l'espèce dominante et on estime le taux de recouvrement de la végétation dans le quadra. Les racines ne sont pas prélevées. Au laboratoire, on place les prélèvements à l'étuve (70°C pendant au moins 3 jours). Après l'étuve, les échantillons sont pesés sur une balance "Scout Pro" de chez Ohaus (précision 1 mg) pour les échantillons de moins de 100 g et une balance Talent de chez Stratorius (précision 0.1 g) pour les échantillons de plus de 100 g.

Mil

Le champ de mil suivi par la station de flux se situe dans la partie haute de la toposéquence. Le semis commence à la première pluie capable d'humecter les cinq premiers centimètres de sol. Il peut y avoir plusieurs semis jusqu'à mi-juillet en fonction de la distribution des pluies. Les graines de mil sont semées par poquets, avec une densité allant de 5000 à 10000 poquets/ha suivant l'agriculteur et le nombre de semis effectués. Le champ de mil est travaillé de façon traditionnelle avec un apport d'engrais très réduit (apport possible de grain d'urée avec le semis) et sans irrigation. Pour les relevés de biomasse et les mesures de LAI, plusieurs parcelles ont été suivies (3 en 2005 et 4 en 2006), qui font chacune 50m*50m de côté et sont représentatives du champ suivi par la station de flux, avec des zones de sol nu encroûté, des souches de *Guiera sénégalensis* et des zones sableuses où est semé le mil.

Au vu de la taille des pieds de mil à leur maturité (~3 mètres de hauteur maximum), l'échantillonnage de la biomasse a été réalisé par prélèvement aléatoire de 5 poquets par

parcelle suivie, une fois tous les 15 jours. Lors du semis, l'agriculteur fait un petit trou dans le sol et met une poignée de graines. Cette poignée de graines correspond à un poquet. Au niveau des champs étudiés, le seul apport d'engrais a été un apport d'urée au moment du semis.

Avant le prélèvement des poquets, on mesure la hauteur, le nombre de tiges, le nombre de feuilles, la taille des feuilles et leur largeur, et la taille des épis. Au laboratoire, on sépare la biomasse vivante de la nécromasse. Les échantillons sont placés à l'étuve à 70°C pendant au moins trois jours. Puis les échantillons sont pesés sur une balance "Scout Pro" de chez Ohaus (précision 1mg) pour les échantillons de moins de 100g et une balance Talent de chez Stratorius (précision 0.1 g) pour les échantillons de plus de 100g.

(b) indice foliaire (LAI)

Le protocole de suivi du LAI est celui du projet VALERI (Validation of Land European Remote sensing Instruments, <http://www.avignon.inra.fr/valeri/>) pour échantillonner des parcelles de taille identique aux pixels d'image SPOT (20m*20m). Ce protocole a été réalisé pour la saison 2005 et 2006 sur les parcelles de suivi pour la jachère et le mil, à raison d'un relevé tous les quinze jours. Le protocole consiste pour chaque parcelle de végétation, à faire une série de photographies hémisphériques de 13 points dans un carré de 20 m de côté. Les photographies hémisphériques sont prises vers le sol pour le couvert herbacé et vers le ciel pour la strate arbustive. Les photographies hémisphériques ont été prises avec un appareil photo argentique (Canon EOS 300, pellicules diapositives Canon Elitechrome 400) équipé d'un objectif fish-eye (fisheye sigma 8mm F4). Les photos de 2005 ont ensuite été numérisées au laboratoire. En 2006, les photographies ont été numérisées par le laboratoire de développement. Les images numérisées ont été analysées grâce au logiciel Can-eye (Version 5, F. Baret, INRA d'Avignon). Le logiciel calcule à partir de la classification des pixels selon leur couleur, une valeur de LAI effectif en discrétisant la photographie en secteurs angulaires puis en moyennant les valeurs obtenues.

Conclusion

Le dispositif mis en place sur le bassin-versant pilote de Wankama dans le site de méso-échelle AMMA-Niger, représente une opportunité unique pour l'étude du couplage entre les processus physiques et biologiques contrôlant les cycles de l'eau, du carbone, le fonctionnement de la végétation et du système hydrologique de cette région semi-aride, ainsi que les incidences sur les processus atmosphériques régissant les systèmes convectifs et la mousson ouest-africaine.

Remerciements

Ces travaux sont soutenus financièrement par le programme AMMA, par le programme français ECCO-PNRH (projet « Eau et végétation au Niger »), et par l'IRD.

Basé sur une initiative française, AMMA a été construit par un groupe scientifique international et est actuellement financé par un grand nombre d'agences, en particulier de France, du Royaume-Uni, des Etats-Unis d'Amérique et d'Afrique. Il a été le bénéficiaire d'une contribution majeure du sixième Programme-Cadre de Recherche et Développement de la Communauté Européenne. Des informations détaillées sur la coordination scientifique et le

financement sont disponibles sur le site d'AMMA International <http://www.amma-international.org>.

Références

Boulain N, Cappelaere B, Séguis L, Gignoux J, Peugeot C. (2006). Hydrologic and land use impacts on vegetation growth and NPP at the watershed scale in a semi-arid environment. *Regional Environmental Change*, 6(3), 147-156.

Boulain N., B.Cappelaere, Ramier D., F.Timouk, H. Oumarou, S.Boubkraoui, (2007). Towards an understanding of coupled physical and biological processes in Central Sahel- 2. CO2 and vegetation dynamics. (à soumettre).

Bégué A, Roujean J, Hanan N, Prince S, Thawley M et al. (1996) Shortwave radiation budget of sahelian vegetation .1. Techniques of measurement and results during Hapex-Sahel. *Agricultural and Forest Meteorology* 79: 96.

Ezzahar J., Chehbouni A., Hoedjes J.C., Descroix L., Ramier D. Boubkraoui S., Mougenot B., Cappelaere B. Boulain N., Timouk F. (2007). Combining scintillometer and aggregation schemes to estimate area-averaged latent heat flux during AMMA experiment. (à soumettre).

Hanan NP. (2001). Enhanced two-layer radiative transfer scheme for a land surface model with a discontinuous upper canopy. *Agricultural and Forest Meteorology* 109: pp. 265-281.

Loireau M. (1998). Espace-Ressources-Usages : spatialisation des interactions dynamiques entre les systèmes sociaux et les systèmes écologiques au Sahel nigérien. Th. Géographie, Univ. P. Valéry, Montpellier III, 411 p.

Peugeot C., Cappelaere B., Vieux B., Séguis L., Maia A. (2003). Hydrologic process simulation of a semiarid, endoreic catchment in Sahelian West Niger. 1. Model-aided data analysis and screening. *J. of Hydrol.* 279, 224–243

Ramier D., N.Boulain, B.Cappelaere, F.Timouk, S.Boubkraoui, F. Metayer, C. Lloyd, L. Descroix (2007). Towards an understanding of coupled physical and biological processes in Central Sahel- 1. energy and water. (à soumettre).

Redelsperger, J.L. et al. (2006). African Monsoon Multidisciplinary Analysis (AMMA) : An International Research Project and Field Campaign. . *Bull. Amer. Meteor. Soc.*(December): 1739-1746.

Verhoef A, Allen S, DeBruin H, Jacobs C & Heusinkveld B. (1996). Fluxes of carbon dioxide and water vapour from a sahelian savanna. *Agricultural and Forest Meteorology* 80: p. 248.

Vischel T. (2006). Impact de la variabilité pluviométrique de méso-échelle sur la réponse des systèmes hydrologiques sahéliens : modélisation, simulation et désagrégation. Mémoire de thèse de l'Université Joseph Fourier / Institut National Polytechnique de Grenoble.