

Caractérisation des processus hydrologiques sur le super-site de la Donga. Haut bassin de l'Ouémé (Bénin), ORE AMMA-CATCH

Luc Séguis(1), Sylvie Galle(2), Marc Arjounin(2), Stéphane Boubkraoui(2), Jean-Michel Bouchez(2), Isabelle Braud(3), Frédéric Cazenave(2), Christian Depraetere(2), Marielle Gosset(2), Jean-Paul Laurent(2), Luc Le Barbé(2), Fred Malinur(2), Bernard Cappelaere(1), Guillaume Favreau(1), Christophe Peugeot(1), Jean-Luc Seidel(1), Valérie Demarez(4), Valérie Le Dantec(4), Josiane Seghieri(4), Thierry Bariac(5), Philippe Biron(5), Patricia Richard(5), Abel Afouda(6), Marc Descloîtres(7), Anatoly Legchenko(7), Henri Robain(7), Christian Camerlynck(8), Catherine Oettle(9), Isabella Zin(9), Mehrez Zribi(9), Florent Jacquin(2), Bamory Kamagate(1), Emmanuel Lawin(2), Matthieu Le Lay(2), Noémie Varado(2), Eric Pascal Zahiri(2)

Introduction

L'Observatoire de la Haute Vallée de l'Ouémé (OHVO, Bénin) d'une superficie de 14 600 km² est le plus méridional (1200 mm/an) des 3 sites d'observation de l'O.R.E. AMMA CATCH, répartis selon un gradient pluviométrique décroissant du Golfe de Guinée au Sahara. La longue période de sécheresse qui a frappé l'Afrique de l'Ouest (1970-1990) a diminué significativement la pluviométrie en climat soudanien (-11%) principalement en réduisant le nombre d'événements pluvieux [1]. Ceci se traduit par une diminution des débits bien plus importante (environ 35%) sur l'Ouémé supérieur [2]. L'état actuel des connaissances ne permet pas de transposer ce résultat à d'autres bassins de taille ou de couverture végétale différente. Et pourtant, au Bénin, de vastes zones de forêt sont en cours de défrichement rapide par brûlis pour y installer des cultures de rente (coton) ou vivrières (igname, maïs, sorgho, riz). Depuis 1998, l'OHVO a été progressivement équipé en pluviographes et limnigraphes pour suivre les fluctuations hydro-météorologiques annuelles et pluri-annuelles. Cependant, pour identifier, quantifier les processus entrant en jeu dans les différents termes du bilan hydrologiques, il a été nécessaire d'instrumenter une unité hydrologique de taille inférieure, le bassin de la Donga. Ce bassin d'une taille de 586 km² est situé dans le cours supérieur du Haut Ouémé (cf. figure 1). Les objectifs fixés lors de l'instrumentation de bassin sont de:

- quantifier les différents processus (pluie, ruissellement, infiltration écoulements souterrains, évapotranspiration),
- identifier leurs temps caractéristiques,
- préciser leur rôle dans la variabilité intra et inter-annuelle en prenant en compte la dynamique de la végétation.

Sous un climat soudanien, l'écoulement de la Donga est saisonnier et soutenu par le drainage des nappes. Chaque année, on observe un démarrage retardé des écoulements par rapport au début de la saison des pluies. Les questions sous-jacentes à l'origine non exclusivement superficielle des écoulements portent notamment sur :

- les parts du ruissellement direct et des nappes dans les écoulements en rivières, leurs évolutions intra-saisonnières,
- l'existence d'écoulement souterrain et rapide de sub-surface dans les tous premiers mètres du sol,
- l'existence d'une mémoire inter-annuelle liée au stock souterrain modulant le démarrage retardé des écoulements.

Hormis l'origine des écoulement, l'autre inconnue majeure est le rôle de la végétation dans le cycle hydrologique à travers la transpiration. Les questions liées à la végétation sont notamment:

- Quels sont les principaux groupes physiologiques fonctionnels ?
- La végétation en début de cycle par ses prélèvements contribue-t-elle à retarder les écoulements ?
- Le passage d'une forêt à une mosaïque culture-jachère plus ou moins ancienne a-t-il un impact sur les écoulements ?

En phase de montée en charge de l'instrumentation sur le bassin de la Donga, nous n'apporterons pas encore dans ce papier de véritables réponses à ces questions. Nous décrivons d'abord l'équipement actuel du bassin, puis nous présentons des résultats préliminaires déduits des premières données collectées.

Equipements et mesures réalisées sur le bassin de la Donga

La rivière Donga prend sa source sur les contreforts de la chaîne de l'Atakora à une altitude de 490 m. Elle coule sur des altérites de terrains métamorphiques (schistes, gneiss, migmatites du

(1) Hydrosociences Montpellier (umr 5569), (2) LTHE (umr 5564), (3) CEMAGREF Lyon (umr 5569), (4) CESBIO (umr 5126), (5) Biomco (umr 7618), (6) Université d'Abomey Calavi (Bénin), (7) IRD Geovast (R027), (8) Sisyphe (umr 7619), (9) CETP/IPSL (umr 8639)

dahoméen). Pour analyser les écoulements, 5 stations de jaugeage sont implantées le long du cours de la Donga. La station de Ara à l'amont du bassin limite un bassin de 12.8 km². La station de jaugeage la plus en aval (Donga Pont) est à 325 m d'altitude pour une superficie de 586 km² (cf. figure 1). Deux campagnes de jaugeages (2002 et 2003) à l'adcp (*Acoustic Doppler Current Profilometer*, WorkHorse RioGrande, RD Instrument) ont permis d'établir les courbes de tarage de ces stations. 19 pluviographes sont répartis sur le bassin ou à proximité. La densité de ces appareils est plus importante à l'extrémité orientale du bassin car cette zone servira de cible au radar bande X polarimétrique qui sera installé à Djougou durant l'été 2004 [3]. Ce réseau de pluviographes associé aux autres appareils répartis sur l'OHVO permettra de définir les caractéristiques spatio-temporelles des événements pluvieux sous climat soudanien. Depuis 2002, la surface piézométrique est suivie à travers 22 puits villageois dont 12 équipés d'enregistreurs. L'ensemble des puits et des stations de jaugeage a été nivelé au GPS différentiel en février 2003 [4]. Ceci permettra d'explorer les relations nappes-rivière à l'échelle du bassin. Pour rechercher l'origine des écoulements, deux conductimètres automatiques ont été installés aux stations de jaugeage « Donga route de Kolokonde et Donga pont (Kolo et Don respectivement sur la figure 1). Avec le même objectif, deux sondes radon [5] ont été placées aux stations d'Ara et de Donga Pont.

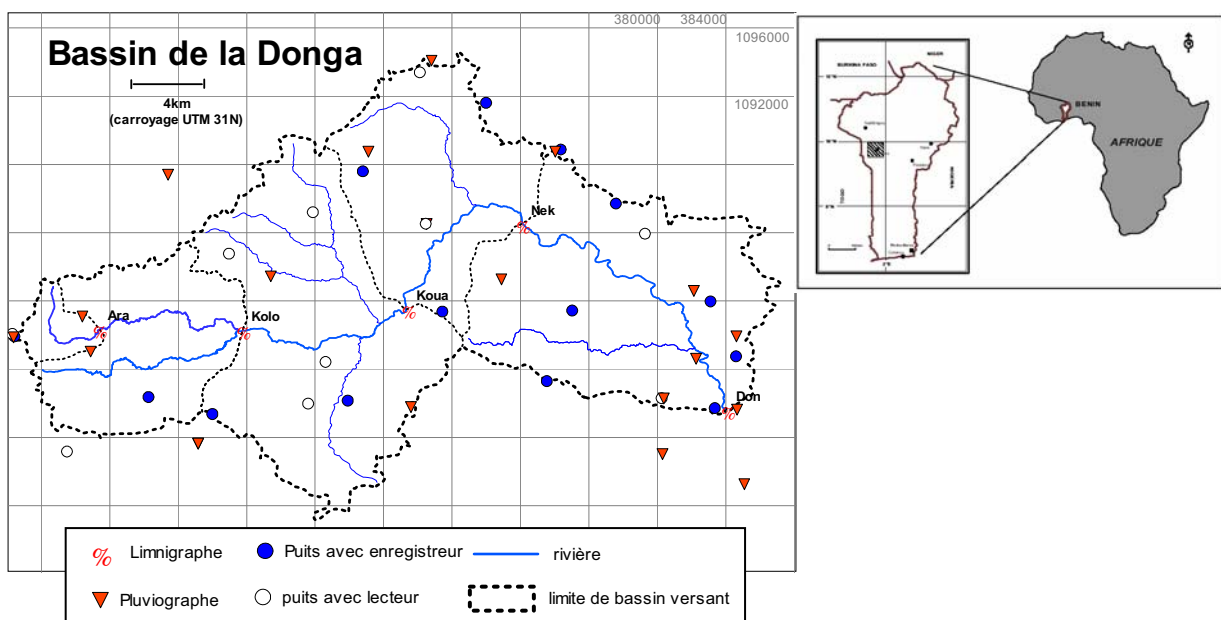


Figure 1 Équipement du bassin de la Donga avec délimitation des sous-bassins

Parallèlement, depuis la saison des pluies 2003, les observateurs des puits associent la conductivité aux trois relevés quotidiens du niveau d'eau. Des campagnes géochimiques (analyse des majeurs et des éléments trace) ont été menées sur les puits et les forages villageois depuis l'été 2002. L'objectif est de caractériser la nappe, de suivre des modifications géochimiques intra-annuelles (opposition saison sèche - saison des pluies ?) et de déceler des éléments susceptibles de signer l'eau des puits et (ou) des forages. Durant l'hivernage 2003, des crues ont également été échantillonnées aux stations d'Ara, Kolokonde et Donga Pont.

La zone d'étude a connu une tectonique intense. La géophysique peut contribuer à une caractérisation détaillée de la géométrie, à priori complexe, des différents compartiments de la couverture de sol et d'altération et en particulier de la nappe phréatique. Une mission de reconnaissance géophysique a été effectuée en 2003 sur le bassin d'Ara [6]. Deux méthodes ont été utilisées (1) **des coupes de résistivité électrique** mesurées avec un dispositif multiélectrodes (SYSCAL R2) permettant d'apprécier de façon détaillée la résistivité des différents matériaux du sous-sol sur environ 50m de profondeur. (2) **une cartographie de la conductivité électrique** de l'ensemble du bassin versant mesurée (EM 34) permettant d'extrapoler ensuite les résultats des coupes.

Dans le but de quantifier l'influence de la végétation sur le bilan hydrologique, des stations de référence sont en cours d'implantation sur les principaux groupes fonctionnels de végétation sur le bassin. Le suivi de chaque station comprendra un suivi de la dynamique de la végétation et des

termes du bilan hydrologique (pluie, ruissellement, infiltration, évapotranspiration). Ces stations couvriront typiquement un hectare. En novembre 2003, la première station a été localisée sur un couvert de type jachère jeune (champs de coton semé mais abandonné durant la saison des pluies 2003). Un profil de sol (3 m) a été équipé pour un suivi automatique de l'humidité (TDR) et de la succion. Une station de mesure météorologique automatique sera installée à proximité. Si possible, les stations de référence seront implantées sur des toposéquences afin de suivre à l'échelle locale tous les termes du bilan hydrologique (pluie, infiltration, drainage vers la nappe mais aussi ruissellement et exhaure vers les drains). Des forages seront effectués sur les toposéquences retenues afin d'étudier l'hydrodynamique sur les versants. A cette échelle locale, le suivi des réservoirs souterrains (nappe perchée de sub-surface, nappe dans les altérites, nappes dans le socle) permettra d'évaluer la possibilité d'une mémoire inter-annuelle modulant le retard observé des écoulements par rapport aux pluies.

Les premiers résultats

Sensibilité des écoulements annuels à la superficie du bassin et à l'importance des précipitations

Nous présentons dans le tableau 1 les lames précipitées et écoulées en 2002 et 2003 sur 3 des 5 sous-bassins du dispositif (12.8, 105 et 586 km²). Deux remarques peuvent être tirées de ce tableau .

Bassin	2002			2003		
	Pluviométrie (mm)	Lame écoulee (mm)	Coefficient d'écoulement (%)	Pluviométrie (mm)	Lame écoulee (mm)	Coefficient d'écoulement (%)
Ara	1009	187	19	1648	419	25
Kolo	1086	170	16	1565	442	28
Donga pont	1120	150	13	1564	422	27

Tableau 1 Précipitation et écoulement sur 3 sous-bassins de la Donga pour deux années à précipitation contrastée

Le première porte sur le comportement des bassins avec le changement de taille. Replacée dans la statistique des lames précipitées entre 1950 et 2002 sur le bassin de la Donga, les pluviométries 2002 et 2003 ont respectivement des fréquences au non-dépassement de 0.3 et 0.95. En année déficitaire (2002), on semble observer une diminution des écoulements avec l'augmentation de superficie des bassins. Néanmoins, en multipliant la taille du bassin par 45 entre Ara et Donga Pont, on ne diminue le coefficient d'écoulement que du tiers. La diminution reste très inférieure à ce qui s'observe sur les cours d'eau sahéliens. En année largement excédentaire (2003), l'importance des précipitations lisse totalement le facteur d'échelle. Les coefficients d'écoulements sont équivalents sur les 3 bassins.

Le seconde remarque se déduit d'une lecture horizontale du tableau. Entre 2002 et 2003 avec une augmentation de l'ordre de 50% des pluies, le coefficient d'écoulement augmente de 31% à Ara et de 108 % à Donga pont. La moins grande augmentation du coefficient d'écoulement à Ara que sur l'ensemble du bassin pourrait être due à des phénomènes de perte ou de stockage dans le réseau à l'échelle du bassin de la Donga qui pourraient être minorer en année excédentaire.

Au stade actuel, ces résultats sont encore sujets à modification car les courbes d'étalonnage des stations hydrométriques contrôlant les bassins ne sont pas totalement établies.

Analyse de l'origine des écoulements

Suite à la campagne de prélèvements durant la saison des pluies 2003, Ba et Sr sont les principaux éléments traces discriminants entre les nappes et les eaux de surface. L'échantillonnage réalisé durant les crues montrent des variations concomitantes entre Ba, Sr, conductivité, et alcalinité, l'oxygène dissout est en opposition. Une fluctuation type se dégage des prélèvements ou des conductimètres installés aux stations de jaugeage: à une brusque chute des teneurs culminant avec le pic de crue, succède un recouvrement progressif de la valeur initiale d'étiage ; ce schéma se complexifie lors de crues multiples. Les premières interprétations des crues échantillonnées (figure 2) montrent un comportement différent de la tête du bassin (Ara) vis-à-vis de l'ensemble du bassin

(Donga pont). L'écoulement lors des crues proviendrait essentiellement du ruissellement de surface sur le bassin d'Ara tandis qu'à l'échelle globale du bassin, l'écoulement serait d'avantage partagé entre ruissellement et souterrain. Les rapports ioniques constants existant entre les différents traceurs de l'altération (Ca et Si) témoignent soit de la contribution en proportions stables de différents réservoirs souterrains, soit de la contribution variable d'un unique réservoir de sub-surface. Parce que la nappe libre présente des teneurs en éléments dissous de 3 à 5 fois supérieures aux teneurs d'étiage (150 à 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ contre 60 $\mu\text{S}/\text{cm}$), nos résultats suggèrent une contribution prépondérante à l'écoulement de surface de flux hypodermiques à faible temps de résidence [7]

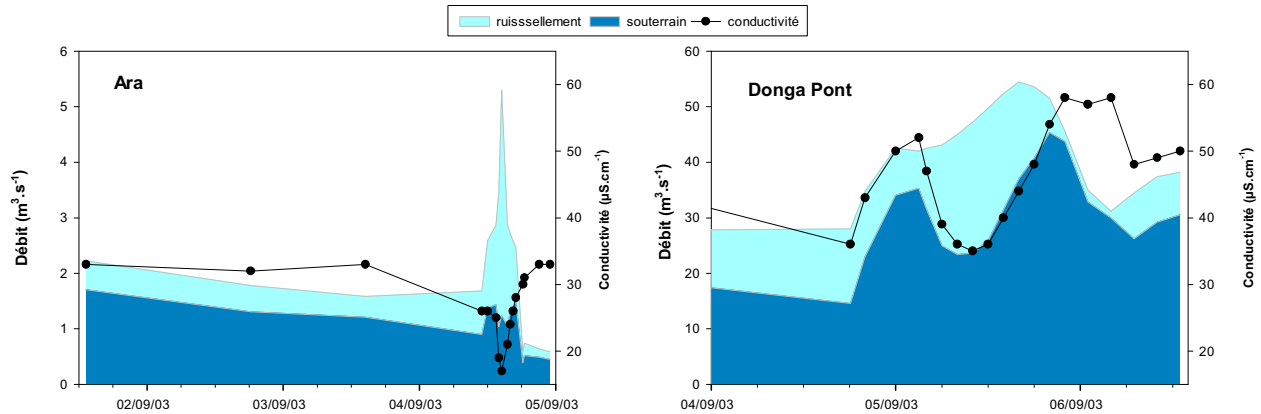


Figure 2: Évolution de la conductivité et du débit au cours d'une crue enregistrée aux stations d'Ara et de Donga pont. Modélisation de l'hydrogramme en 2 termes : ruissellement et écoulement souterrain. Les hydrogrammes ont été séparés en prenant une conductivité de $10\mu\text{S}/\text{cm}$ pour les eaux de ruissellement et de 40 et 60 $\mu\text{S}/\text{cm}$ respectivement à Ara et Donga Pont pour l'écoulement souterrain (valeurs observées en étiage après les crues).

Fonctionnement des versants

Le fonctionnement des nappes de sub-surface passe par la compréhension du fonctionnement hydrologique des versants. A cet effet, des toposéquences sont en cours d'instrumentation (forage, suivi de l'humidité et du développement de la végétation). La première toposéquence instrumentée est située sur le bassin d'Ara. Une campagne géophysique a été réalisée durant l'hivernage 2003. Une méthode électrique à courant continu a été mise en œuvre pour obtenir les premières informations sur la structure du sous-sol. Le type de mesures utilisé a été le Wenner alpha en 64 électrodes. Les résultats se présentent sous forme de coupes géoélectriques concaténées et interprétés en utilisant un logiciel d'inversion. Les valeurs calculées donnent une idée de la distribution des résistivités dans le sous-sol permettant ainsi de formuler les premières hypothèses sur la nature des terrains qu'elles représentent. On peut remarquer sur le profil de la figure 3 :

- La présence en surface de terrains résistants peu épais, qui correspondent à l'observation à des cuirasses de degrés d'altération variables,
- L'apparition sous les cuirasses de grandes couches conductrices qui s'étendent quasiment le long du profil. La nature de ces couches ne laisse pas de doute car la nappe a été observée dans des trous villageois à moins de 2 m de profondeur. Ces nappes sont entre 0 et 7 m de la surface. Tel qu'il apparaît sur les profils, les flux d'eaux dans ces nappes ne semblent pas se faire en direction du substratum mais plutôt vers les zones topographiquement basses comme les ravines.

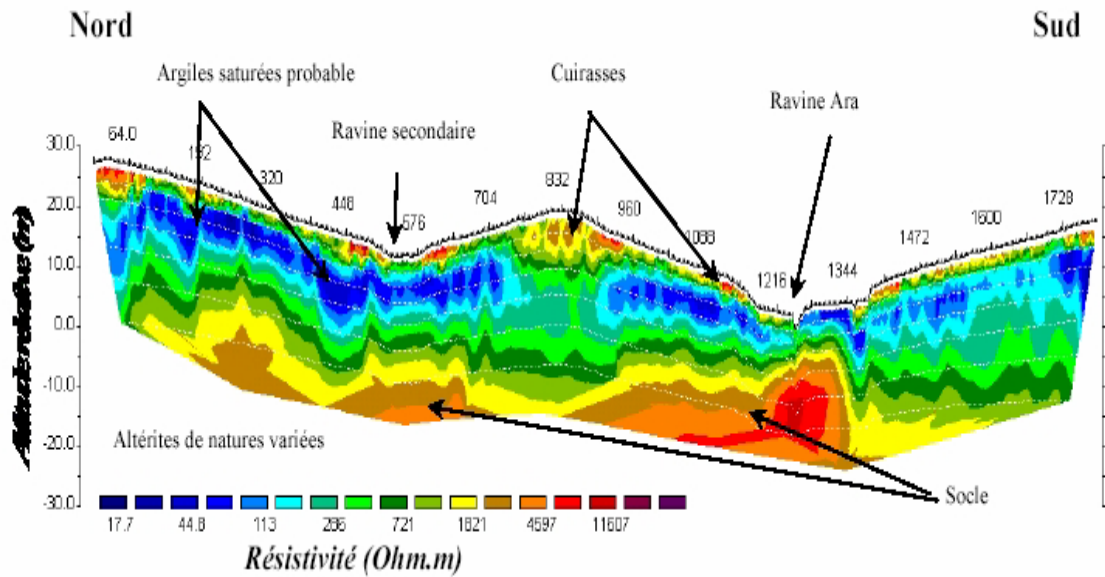


Figure 3 Profil électrique 2D (Wenner alpha) Résultats de l'inversion et interprétation de la distribution des résistivités du profil de reconnaissance P2.

Tout comme la géochimie, cette exploration géophysique renforce les présomptions sur le rôle des nappes perchées dans la production des écoulements. Néanmoins, des observations directes sont nécessaires. Pour cela, le réservoir sol va être instrumenté. Des forages à différentes profondeurs au long de la toposéquence seront réalisés. Déjà, une parcelle caractéristique d'une jachère jeune bénéficie d'un suivi humidité-succion sur les 3 premiers mètres depuis novembre 2003. La figure 4 présente les profils de succion et d'humidité pour le premier mois de fonctionnement du système (du 16/11/2003 au 11/12/2003, absence de pluie durant la période).

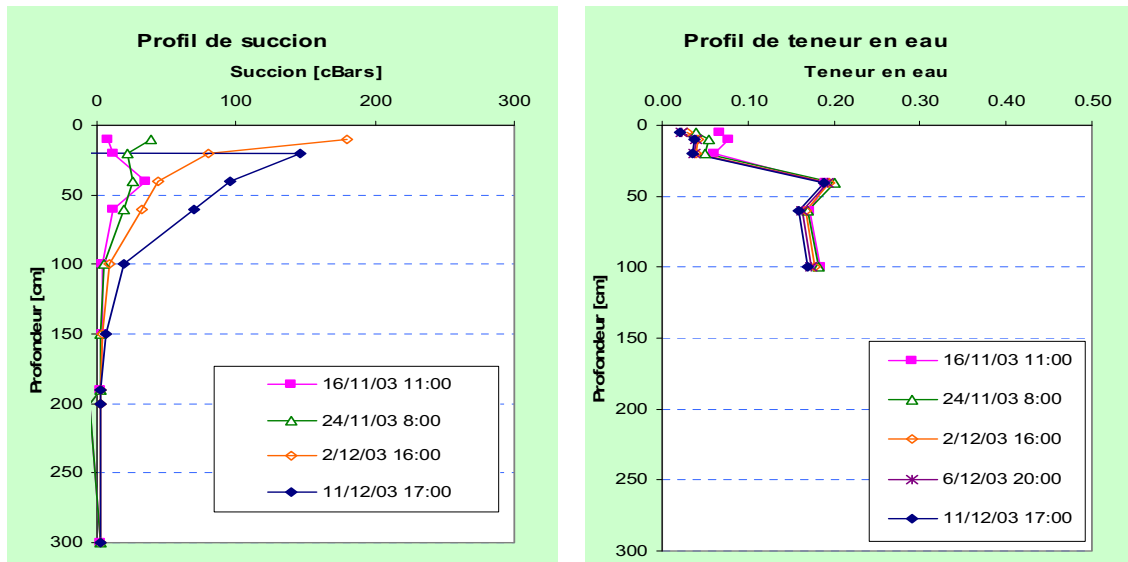


Figure 4 Profil d'humidité et de succion sur la parcelle de jachère jeune au sommet de la toposéquence instrumentée sur le bassin d'Ara

On observe un état proche de la saturation en deçà de 2 m et une reprise évapotranspiratoire au dessus. Néanmoins entre 0,3m et 1m, le déstockage est très faible de part le caractère argileux des horizons. Sur ce site sur la ligne de crête du bassin, un mois et demi après la fin des pluies, il existe une nappe à 2 m de la surface. Ces nappes, probablement drainées aux ruptures de pente et dans les points bas comme le laissent supposer la géophysique, servent de par leur faible profondeur de réservoir à la végétation. Le développement de celle-ci peut être partiellement conditionné par le niveau des nappes.

Conclusion

A l'éclairage de ces premiers résultats, on constate que le système complexe à étudier pour quantifier la production des écoulements mais aussi le développement de la végétation est le versant à travers le continuum sol-plante-atmosphère. L'accent doit être porté sur les dynamiques de la zone non saturée et des nappes perchées en relation avec la végétation. La possibilité d'un drainage profond vers les nappes de socle des nappes perchées sera à étudier. Cependant, le terme le plus difficile à quantifier à l'échelle du versant sera l'évapotranspiration, de part sa variabilité spatiale et temporelle. Le paysage est en effet constitué d'une imbrication de couverts (savane boisée, arbustive, jachère, culture). L'installation sur une saison des pluies d'un scintillomètre infra-rouge grande ouverture [8] permettra de mesurer le flux de chaleur sensible sur le versant. Cette mesure associée à une mesure de rayonnement net et du flux de chaleur dans le sol devrait permettre une évaluation du flux de chaleur latente.

Les mécanismes identifiés et modélisés sur les versants seront ensuite intégrés à l'échelle globale du bassin. On utilisera pour cela un modèle distribué à base physique (POWER [9]), s'appuyant sur des concepts de modélisation novateurs. Ce modèle nécessite une caractérisation spatio-temporelle fine des champs pluvieux. Pour cela, l'installation d'un radar polarimétrique bande X [3] durant l'été 2004 permettra de compléter les observations du réseau de pluviographes.

Bibliographie

[1] Le Barbé, L., Lebel, T., Tapsoba D., 2002, «Rainfall variability in West Africa during the years 1950-1990», J. Climate, vol.15,no. 2, pp. 187-202.

[2] Le Lay, M., 2002, « Caractérisation hydrologique et simulation numérique des écoulements sur le bassin de la Haute vallée de l'Ouémé », rapport de DEA MMGE, Grenoble, 40 p.

[3] Gosset, M., Cazenave F., 2004, « Applications hydrométéorologiques d'un radar bande X polarimétrique : projet expérimental sur la Donga au sein de l'ORE AMMA-CATCH », Atelier Expérimentation et Instrumentation, 23-24 mars 2004, INSU, Paris.

[4] Kamagaté, B., Seyigona Z., Malinur, F., Arjounin, M., Jacquin, F., Bouchez, J.-M., Depraetere, C., Le Barbé, L., Séguis, L., 2003, « Données piézométriques sur le bassin de la Donga (Bénin). Période 1999-2002 », Rapport ORE AMMA-CATCH, 21 p.

[5] Monin, M., Seidel, J.-L., 1998, «An automatic radon probe for earth science studies», J. Apl. Geophys., vol. 39, pp.209-220.

[6] Wubda, M., 2003, « Reconnaissance géophysique du bassin versant d'Ara (Djougou, Nord Bénin) », DESS Géophysique appliquée, Paris VI, 65 pp.

[7] Kamagate, B., Favreau, G., Séguis, L., Seidel, J.-L., Le Barbé, L., 2004 « Flux nappe - rivière en milieu tropical de socle au Bénin (haut-Ouémé) » in 20^{ème} colloque de Géologie Africaine, 2-7 juin 2004, Orléans, France.

[8] Cohard, J.-M., 2004, «Évaluation de l'évapotranspiration sur un versant: utilisation d'un Scintillomètre Grande ouverture et méthode du bilan d'énergie», Atelier Expérimentation et Instrumentation, 23-24 mars 2004, INSU, Paris.

[9] Zin, I., Braud, I., Chen, T., Gandola, F., Haverkamp, R., Vachaud, G., Varado, N., 2003 «A multiple-level discretisation in the POWER Hydrological model», EGS-AGU-EUG joint assembly, Nice, France, 6-11 April 2003, Geophys. Res. Abstracts, vol. 5, 12171.