

ÉVALUATION DES TERMES DU BILAN HYDROLOGIQUE SUR LE BASSIN VERSANT DE LA DONGA PAR MESURE ET MODELISATION

Galle S, Séguis L, Arjounin M, Bariac T, Bouchez J-M, Braud I, Cohard J-M., Descloitre M, Favreau G, Kamagaté B, Laurent J-P, Le Lay M, Malinur F, Peugeot C, Robain H, Seghieri J, Seidel J-L, Varado N, Zin I, Zribi M

LTHE-Grenoble et Cotonou
HSM-Montpellier et Cotonou
GEOVAST-Bondy
BioMCo-Grignon
CESBIO-Toulouse
CETP-Vélizy

Mots-Clés : ORE AMMA-CATCH, climat soudanien, bilan hydrologique, mesures, modélisation

I – INTRODUCTION

L'Observatoire Hydrologique de la Haute Vallée de l'Ouémé (OHHVO, 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 (Le lay & Galle, 2005b). Ceci se traduit par une diminution des débits bien plus importante (environ 35%) sur l'Ouémé supérieur (Le lay & Galle, 2005a). L'état actuel des connaissances ne permet pas de transposer ce résultat à d'autres bassins de taille ou de couverture végétale différente. Pour identifier, quantifier les processus entrant en jeu dans les différents termes du bilan hydrologiques, le bassin de la Donga (586 km²) situé dans le cours supérieur du Haut Ouémé a été instrumenté. Les objectifs 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 écoulements, 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:

- La végétation en début de cycle par ses prélèvements contribue-t-elle à retarder les écoulements ?
- Le défrichement des forêts au profit d'une mosaïque culture-jachère a-t-il un impact sur les écoulements ?

II - MATÉRIELS ET MÉTHODES

Les objectifs sont d'assurer la fermeture du bilan hydrologique (pluie, ruissellement, infiltration dans la zone saturée et non saturée, débit et évapotranspiration) à l'échelle du bassin versant (Donga). Pour cela, il est nécessaire d'analyser les processus intervenant dans le bilan, à l'échelle élémentaire de fonctionnement, le versant. La modélisation permet ensuite de tester la représentation des processus aux différentes échelles.

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 dahoméen). Le dispositif d'observation est multi-échelle de la toposéquence au bassin de la Donga en passant par une succession de bassins emboîtés. Démarré en 1999, le dispositif comprenait 8 pluviographes et 1 limnigraphe à l'exutoire du bassin (dispositif financé par l'ORE AMMA-CATCH). Pour documenter les processus à une échelle plus fine cinq stations de jaugeage emboîtées sont implantées en 2002 le long du cours de la Donga. La station de Ara à l'amont du bassin limite un bassin de 13 km². La station de jaugeage la plus en aval (Don) est à 325 m d'altitude pour une superficie de 586 km² (cf. figure 1). Dix-neuf pluviographes sont répartis sur le bassin ou à proximité.

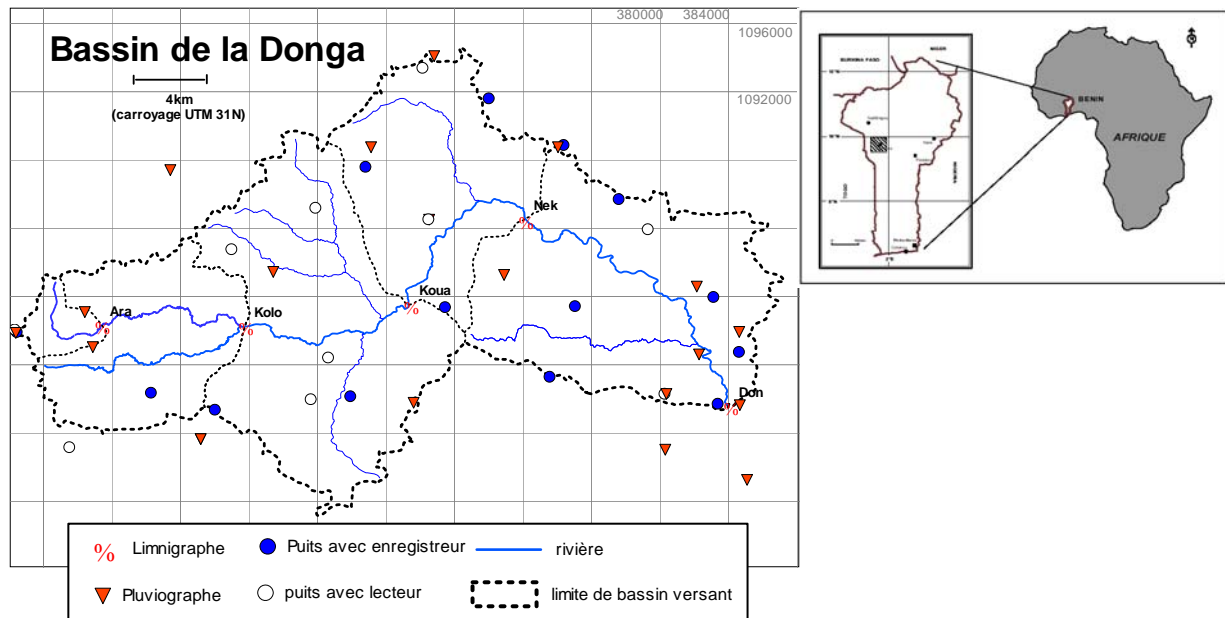


Figure 1 Équipement du bassin de la Donga avec délimitation des sous-bassins

Depuis 2002, la surface piézométrique est suivie à travers vingt-deux puits villageois dont douze équipés d'enregistreurs. L'ensemble des puits et des stations de jaugeage a été nivelé au GPS différentiel en février 2003. Deux conductimètres automatiques ont également été installés à des stations de jaugeage (Kolo et Don respectivement sur la figure 1). Parallèlement, la conductivité est aussi relevée sur les puits, et des campagnes géochimiques (analyse des majeurs, des éléments trace et des isotopes naturels de l'eau) ont été menées sur les puits, les forages villageois et les écoulements. A l'échelle globale du bassin de la Donga, la confrontation des précipitations, des écoulements, des fluctuations piézométriques et des données géochimiques doit nous permettre d'avancer des hypothèses sur l'origine des écoulements et le fonctionnement du bassin. Mais, elles ne peuvent être précisées et validées qu'à l'échelle la plus fine, le versant.

Les mesures ponctuelles du bilan sur le versant sont extrapolées en fonction des facteurs déterminant leur variabilité spatiale et temporelle. Les facteurs identifiés en zone soudanienne sont le type de couverture végétale et la position sur le versant :

- Les formations végétales rencontrées sur le haut bassin de l'Ouémé forment un continuum qui s'étend de la forêt claire à des couverts de plus en plus défrichés qui comprennent successivement les savanes boisée, arborée et arbustive pour arriver aux zones de culture permanente où de rares arbres sont conservés pour leur vertu thérapeutiques ou alimentaires. En bas de versant on trouve des forêts galerie ripicoles composée de végétation hydrophile qui bordent les cours d'eau à partir d'une aire drainée d'environ 1 km². D'un point de vue fonctionnel en terme de flux d'eau, c'est le rapport herbe/arbre qui va être déterminant. En effet ces deux strates ont un comportement différent vis à vis de l'eau du sol. Les arbres ont un système racinaire capable d'extraire l'eau des couches profondes et de réagir rapidement aux premières pluies. Au contraire, les herbacées ont un système racinaire dense en surface qui se développe au cours de la saison pour les annuelles et les cultures.

- La position sur le versant conditionne la couverture pédologique (granulométrie et profondeur du sol notamment) et la redistribution en eau latérale. La toposéquence type est caractérisée par une longueur de 800 m pour un dénivelé de 40 m. La succession classique est un sommet convexe, suivi d'un glacis de 600 m et d'une rupture de pente aux abords du marigot drainant, qui correspond à une zone humide, rarement cultivée où l'on peut parfois voir l'eau sourdre du sol.

Trois toposéquences avec une densité d'arbre croissante (jachère, savane arbustive et forêt claire) ont été instrumentées. Sur chacune, le dispositif se compose de 3 sites de mesure répartis du haut au bas de versant. En chaque site, une station de suivi automatique de l'humidité, de la succion et de la température de la zone racinaire est implantée. Il lui est associé 3 piézomètres crépinés respectivement à 2, 10 et 20 m de profondeur pour suivre les différentes nappes (nappe perchée de sub-surface et d'altérite). L'évolution saisonnière des couverts est également suivie. Elle comprend le stade phénologique, la biomasse des principales herbacées et des ligneux et des mesures de LAI par photographie hémisphérique. Cet ensemble de mesures (profil d'humidité + nappe + végétation) est appelé « station de bilan local ».

Pour caractériser l'extension latérale des nappes, ainsi que la profondeur du socle sur les trois toposéquences, des campagnes géophysiques (résistivimètre Syscal) ont été menées. Aujourd'hui, des profils ont été réalisés sur chaque toposéquence afin de connaître les profondeurs du socle et la meilleure implantation des piézomètres. A ce dispositif actuel de mesure du bilan hydrologique de surface viendra s'ajouter en novembre 2005 la mesure des flux d'évapotranspiration.

La modélisation permet de tester la représentation des processus à diverses échelles. Le premier niveau de modélisation concerne l'échelle de la station de bilan local. Le second niveau est celui de la toposéquence. Au-delà, l'extrapolation du bilan aux points non mesurés du bassin se fera par modélisation sur la base des deux éléments clés qui sont la densité d'arbre et la position sur la toposéquence. Ces informations seront connues à partir de la carte d'occupation des sols mise à jour annuellement par télédétection et de la couverture satellitaire à très haute résolution (2.5m) acquise en mai 2005. Les positions sur les versants seront déduites du MNT extrait des cartes topographiques au 1 :50 000.

III - RÉSULTATS ET DISCUSSION

Le dispositif sur les toposéquences s'est mis en place progressivement de 2003 à 2005. Dans un premier temps, l'analyse a porté sur les données du réseau de base de l'OHHVO. Nous présentons dans le tableau 1 les lames précipitées et écoulées de 2002 à 2004 sur 3 des 5 sous-bassins du dispositif (12.8, 105 et 586 km²). Une remarque générale portant sur l'éventuelle sensibilité au facteur d'échelle (taille des bassins) peut être tirée de ce tableau.

Bassin	2002			2003			2004		
	P (mm)	Le (mm)	Coefficient d'écoulement (%)	P (mm)	Le (mm)	Coefficient d'écoulement (%)	P (mm)	Le (mm)	Coefficient d'écoulement (%)
Ara	1028	109	11	1812	480	26	1102	159	14
Kolo	1145	147	13	1580	437	28	1103	106	10
Donga pont	1072	150	14	1827	429	23	1094	156	14

Tableau 1 Précipitation (P) et écoulement (Le) sur 3 sous-bassins de la Donga de 2002 à 2004

Replacée dans la statistique des lames précipitées entre 1950 et 2002 sur le bassin de la Donga, les pluviométries 2002 (ou 2004) et 2003 ont respectivement des fréquences au non-dépassement de 0.3 et 0.95. Que ce soit en année déficitaire (2002, 2004) ou excédentaire (2003), la production des bassins peut doubler mais est peu sensible au facteur d'échelle. Ceci semble indiquer que les processus intervenant dans la production des écoulements sont les mêmes d'une échelle à l'autre. Ceci devrait faciliter l'extrapolation de la modélisation mise au point sur les toposéquences au grand bassin, la Donga puis l'Ouémé supérieure.

Toujours simplement à partir des observations du réseau de base, il a été possible de déterminer des hypothèses quant à l'origine des écoulements. La figure 2 présente les écoulements à Donga Pont en 2002 et 2003 en relation avec les précipitations et la profondeur moyenne (au matin, avant les puisages) des 22 puits villageois. Cette moyenne est rendue possible car il a été vérifié que la profondeur piézométrique n'est pas

liée à l'altitude du puits. Les étiages et les maxima des nappes suivent l'importance des précipitations annuelles. On observe une montée très rapide des nappes suite aux événements pluvieux importants et ce même si les nappes sont proches de l'étiage. Ceci signale des transferts rapides entre surface et profondeur par des voies préférentielles. Le tarissement de la rivière suit de manière rapprochée la fin des pluies bien que le niveau des nappes soit encore haut. Un nivellement par GPS différentiel des puits et échelles de crue a aussi montré que les niveaux piézométriques étaient toujours à une altitude supérieure aux lits des rivières, même durant la saison sèche.

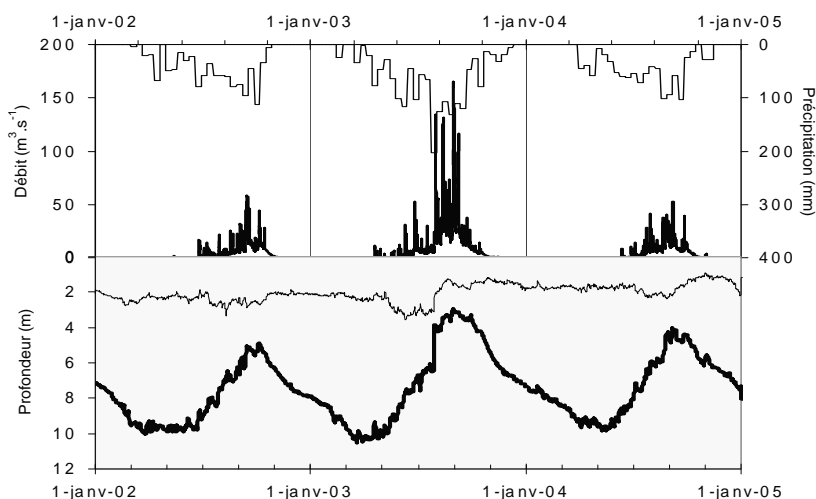


Figure 2 - Mise en rapport de la précipitation décadaire et du débit journalier à Donga Pont (graphique supérieur) avec la profondeur moyenne du niveau piézométrique (au matin) dans les 22 puits villageois (trait épais du graphique inférieur, écart-type en trait fin)

Enfin le suivi de la conductivité électrique de l'eau et la géochimie ont montré que la conductivité des rivières ($30 \mu\text{S.cm}^{-1}$ en crues, $60-80 \mu\text{S.cm}^{-1}$ en écoulement de base) est toujours inférieure à la conductivité des puits villageois ($300 \mu\text{S.cm}^{-1}$) (Kamagaté et al., 2004, 2005). Tout ceci semble indiquer le rôle mineur joué par les nappes d'altérites (celles qui alimentent les puits villageois) dans les écoulements. On en conclut que le réservoir impliqué dans l'alimentation des eaux de rivière est probablement superficiel (premier mètre du sol).

Les observations effectuées sur les toposéquences ont confirmé cette hypothèse (Séguis et al., subm.). La figure 3 représente la profondeur de la nappe le long du versant en jachère et culture en 2004 et 2005.

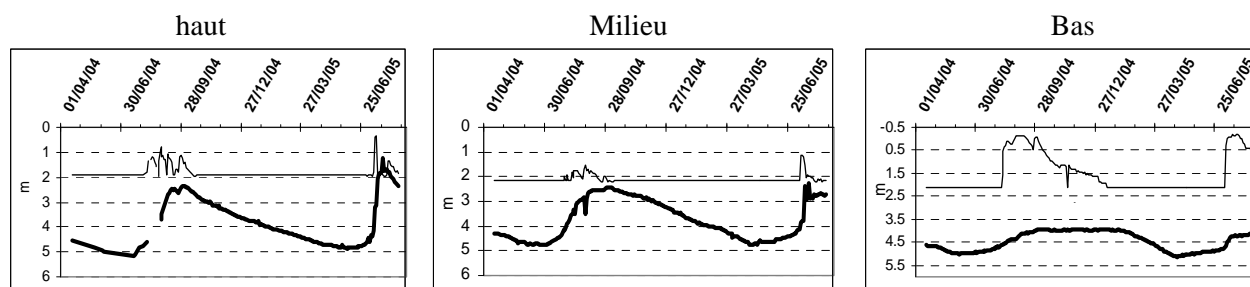


Figure 3 - Évolution en 2004 et 2005 des niveaux piézométriques (trait fin : piézomètre crépiné à 2m de profondeur), trait épais : piézomètre crépiné à 10 m de profondeur) sur les sites de bilan local « haut », « milieu » et « bas » de la toposéquence Jachère-culture.

On observe bien deux nappes aux comportements distincts. La première superficielle (piézomètre 2m) est temporaire, durant la période la plus intense de la saison des pluies. La seconde nappe (piézomètres 10 et 20m) est permanente, elle correspond à la nappe d'altérite observée dans les puits villageois. Cette nappe est à la même profondeur quelque soit la position sur le versant. Le suivi des conductivités montre que la nappe superficielle a une conductivité d'environ $50 \mu\text{S.cm}^{-1}$ tandis que la nappe permanente a une conductivité autour de $200 \mu\text{S.cm}^{-1}$.

A l'automne 2004, des campagnes géophysiques (tomographie de résistivité électrique) ont été réalisées sur les toposéquences de jachère-culture et de forêt claire. Sur les deux sites, une grande variabilité spatiale des couvertures d'altération a été décelée (Robain et al., 2005). Le socle peut passer brutalement de 30 m de

profondeur à quelques mètres de la surface. Ces observations ont permis de diriger l'implantation des piézomètres de la toposéquence de forêt. En haut de versant, la couverture d'altération sur la toposéquence de forêt apparaît bien plus importante que sur celle de jachère. Ceci pourrait expliquer la profondeur piézométrique (-19m) observée en toute saison au sommet de cette toposéquence. Comme la comparaison des différentes toposéquences a pour objectif d'évaluer le contrôle de la végétation sur les différents termes du bilan hydrologique, il sera nécessaire de tenir compte des différences d'organisation de la couverture d'altération mise en évidence pour que cette comparaison soit correcte.

Les premiers résultats du suivi de l'infiltration sur les sites de jachère et de forêt claire mettent en évidence deux périodes (Galle et al., 2005) : durant les deux premiers mois de la saison des pluies, les pluies sont espacées, l'eau s'infiltré uniquement en surface du sol (0-50cm) et est rapidement reprise par évapotranspiration. C'est dans cette couche de sub-surface que se trouvent la majorité des racines, elle est séparée du sol sous-jacent par une couche de granulométrie plus fine, à la conductivité hydraulique plus faible. Cette barrière à l'infiltration ne laisse pas pénétrer l'eau avant la mi-juin, lorsque les pluies deviennent plus régulières. On observe à partir de cette période une nette augmentation du stock d'eau dans le sol.

Le suivi de la végétation réalisé (phénologie, LAI, biomasse) a permis de documenter sa dynamique saisonnière et de mettre en évidence les interactions entre la pluviométrie et la dynamique du couvert. Ces données sont comparées au suivi satellitaire du NDVI.

Parallèlement à la mise en place du dispositif et à l'analyse des premières observations, des travaux de modélisation ont été entrepris à travers deux approches. La première a consisté à la mise à l'épreuve d'une version simplifiée du modèle POWER. Le modèle REW-4.0 (Varado, 2004) fonctionne à l'échelle de sous-bassins élémentaires, les REWs (*Representative Elementary Watersheds*) avec une conceptualisation homogène des termes d'échange entre les différents compartiments du bassin (zone non saturée, zone saturée, surface saturée, surface non saturée et rivière). A partir des pluies journalières distribuées et d'une segmentation du bassin en 23 REWs (ordre de Strahler de 3), les écoulements journaliers sont reproduits relativement correctement (efficacité d'environ 0.5 en calage et validation) jusqu'à une surface limite inférieure de bassin de 100 km². En deçà, un découpage spatial plus fin et une discrétisation infra-journalière des précipitations est nécessaire. La représentation simplifiée des transferts dans la zone non saturée du sol (modèle réservoir où l'évapotranspiration réelle est le produit de la valeur potentielle par le degré de saturation du réservoir) induit cependant plusieurs problèmes dans la représentation du fonctionnement du bassin que l'on identifie sur les autres variables du bilan (Varado et al., 2005) : premièrement, les nappes simulées sont beaucoup plus profondes (20 à 30 m) que les observées ; deuxièmement, la saturation d'horizons superficiels ne peut être reproduite du fait de la conceptualisation en un réservoir unique de la zone non saturée, enfin et probablement par compensation, les écoulements sont essentiellement générés par saturation de la surface. Devant ce constat, un module de zone non saturée avec extraction racinaire (Varado et al., 2004b) a été développé : il fonctionne de manière rapide et contient une discrétisation verticale du sol autorisant des horizons pédologiques aux propriétés distinctes. Il n'a pu être testé que sur une colonne avec les données de la Donga néanmoins la nappe générée remonte à proximité de la surface chaque année.

La seconde approche a consisté à modifier et utiliser un modèle conceptuel semi-distribué basé sur la notion de zone saturée (TOPMODEL) en lui intégrant les connaissances acquises sur le fonctionnement du bassin (Le Lay et al., 2005c). Pour cela on définit une profondeur maximale de sol en deçà de laquelle l'eau percolée est considérée comme perdue par le système. On distingue donc comme les observations le montrent, un réservoir superficiel (flux de subsurface) contribuant aux écoulements et un réservoir profond (nappe d'altérite) sans connexion avec les rivières. La capacité du modèle à simuler les écoulements est excellente en calibration comme en validation (efficacité supérieure à 0.8) avec une incertitude réduite sur les simulations (Le Lay et al. Subm.). On remarque une sous-estimation des ruissellements en début de saison qui est améliorée par la prise en compte du développement de la végétation. Les contributions aux écoulements des termes ruissellement direct et flux de subsurface dans le modèle sont en cours de comparaison avec les décompositions d'hydrogrammes calculés par méthode géochimique.

IV - CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Avec l'instrumentation déployée, nous avons compris l'origine des écoulements essentiellement composés d'un ruissellement direct (hortonien ou sur surface saturée) et d'un flux de subsurface. Des questions demeurent. Quelle est la dynamique latérale des zones saturées de subsurface ou dans les altérites ? Pour le moment, nous ne disposons que de quelques piézomètres sur chaque toposéquence. La campagne réalisée de

tomographie électrique a montré l'extrême variabilité de la couverture d'altération rendant difficile l'interpolation de la surface piézométrique entre les forages. En 2006, un suivi géophysique temporel permettra de suivre les fluctuations latérales des nappes et notamment le devenir de l'eau stockée dans les nappes superficielles. Une autre question porte sur la vidange annuelle des nappes d'altérite. Quelle est la part de l'évapotranspiration et du drainage vers le socle dans cette vidange? La réponse passera par l'analyse des données des stations de flux en cours d'installation et par la modélisation de la reprise évapotranspiratoire sur chaque site de bilan local. Le module mis au point de redistribution de l'eau dans le sol ne résout pas le bilan d'énergie mais utilise une ETP modulée par un coefficient cultural. Les mesures d'évapotranspiration permettront de caler ce coefficient sur les 3 couverts des toposéquences. A une plus grande échelle, un scintillomètre infra-rouge associé à une station de flux permettra d'évaluer l'évapotranspiration d'un couvert hétérogène sur un transect d'environ 2.5 km (Cohard, 2004).

A l'échelle des bassins, seule la modélisation permettra d'estimer les termes spatialisés du bilan hydrologique. Ceci passe par l'intégration du module de redistribution latérale de l'eau dans POWER et donc le découpage des REWs en RECs (*Representative Elementary Column*) qui représentent explicitement les hétérogénéités spatiales de la surface en terme d'occupation du sol, de propriété du sol et de végétation. Le découpage en RECs sera obtenu à l'aide des cartes d'occupation du sol en cours de réalisation suivant la méthodologie proposée par Zin et al., (2003) et des cartes pédologiques du bassin. Parallèlement, les études se poursuivront sur TOPMODEL avec le souci de paramétriser le fonctionnement reconnu du bassin (remplacement du terme puits actuel par un compartiment profond avec évaporation et drainage). Enfin la base de données permettra une validation multicritère des deux modèles sur l'ensemble des termes du bilan hydrologique (dynamique de la zone non saturée, des nappes superficielle et profonde, contributions aux écoulements, évapotranspiration). Nous aurons ainsi des outils solides pour quantifier l'impact hydrologique d'un changement climatique au Bénin et l'incertitude associée.

V - REFERENCES

- Cohard, J-M., 2004. Evaluation de l'évapotranspiration sur un versant : utilisation d'un Scintillomètre Grande ouverture et méthode du bilan d'énergie. ORE AMMA-CATCH. Atelier Expérimentation et Instrumentation (AEI2004), Paris, INSU.
- Galle S., Thévenot N., Laurent J-P., Séguis L., Peugeot C., Afouda S., Ouani T., 2005. Local water balance for three vegetation cover of the Donga watershed (Benin). Subm. to AMMA FInt. Conf. Dakar.
- 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 20ème colloque de Géologie Africaine, 2-7 juin 2004, Orléans, France.
- Kamagate, B.; Favreau, G.; Séguis, L.; Séidel, J.-L. Geochemical approach of streamflow at various time scales in a tropical catchment (Benin, upper Oueme river), Vienna, April 2005, EGU05-A-04379
- Le Lay, M. and S. Galle, 2005a. How changing rainfall regimes may affect the water balance. A modelling approach in West Africa. in « Regional hydrological impacts of climatic changes-Hydroclimatic variability » *IAHS Publ.* n°296: 203-210.
- Le Lay, M. & S. Galle, 2005b. Variabilités interannuelle et intra-saisonnière des pluies aux échelles hydrologiques. La mousson ouest-africaine en climat soudanien. *Journal des Sciences Hydrologiques* 50 (3) : 509-524
- Le Lay M., Zin I., Galle S., Saulnier G.M., Peugeot C., Séguis L., Braud I.: 2005c. Hydrological behaviour of the Donga catchment: testing some modelling assumptions. Subm. to AMMA First Int. Conf. Dakar.
- Le Lay M., Galle S., Saulnier G-M. and Braud I., (subm). Detecting changes in watershed behavior: a model-based methodology. Application on West African non-stationary conditions. Subm. To WRR
- Robain H., Wubda M., Galle S., Séguis L. et Peugeot C., 2005. Etude du Site de Djougou (Bénin) par tomographie de résistivité électrique : importance de la variabilité spatiale des couvertures d'altération pour la connaissance du fonctionnement hydrique souterrain. Subm. to AMMA First Int. Conf. Dakar.
- Séguis L., Galle S., Peugeot C., Robain H., Afouda S., Arjounin M., Boubkraoui S., Bouchez J-M., Jacquin F., Malinur F., Ouani T., Thévenot N., Wubda M., 2005. Water redistribution over two catena of the Donga watershed (Benin) during the rainy season. Impact on the discharge outlet. Subm. to AMMA First Int. Conf. Dakar.
- Varado, N., 2004a. Contribution au développement et à la mise en œuvre d'une modélisation hydrologique distribuée sur le bassin de la Donga (580 km²) au Bénin. Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 28 Septembre 2004, 320 pp.
- Varado, N., Braud, I. and Ross, P.J., 2004b. Development and assessment of an efficient numerical solution of the Richards' equation including root extraction by plants, *Journal of Hydrology*, accepted.
- Varado N., Braud I., Galle S., Séguis L., Depraetere C., Le Lay M., (subm). Multi-criteria assessment of the Representative Elementary Watershed approach on the Donga catchment (Benin) using a downward approach of model complexity. Subm. To HESS.
- Zin, I., S. Galle, C. Guérin, S. Mascle-Le Hégarat, C. Otlé, J. Seghieri and M. Zribi (2003). Remote sensing data and ground measurements merging for land cover/land use monitoring and hydrological modelling in Benin. Troisième conférence COPROMAPH (COntemporary PROblems in MAThematical PHysics), Cotonou (Bénin).