

## **SIMULATION DES VARIATIONS DE STOCK D'EAU ET MESURES DE GRAVIMÉTRIE ABSOLUE A NALOHOU, BENIN**

**HECTOR B.<sup>1</sup>, DESCLOITRES M.<sup>2</sup>, SÉGUIE L.<sup>3</sup>, WUBDA M.<sup>4</sup>, LEGCHENKO A.<sup>2</sup>, YALON.<sup>5</sup>**

<sup>1</sup> EOST, CNRS/UdS, UMR 7516, Strasbourg, France, bhector@unistra.fr

<sup>2</sup> IRD-LTHE, IRD, Cotonou, Bénin, marc.descloîtres@ird.fr

<sup>3</sup> IRD-HSM, Montpellier, France, luc.seguis@ird.fr

<sup>4</sup> IRD, Cotonou, Bénin, maxime.wubda@ird.fr

<sup>5</sup> UAC, Lab. d'Hydrologie Appliquée, Cotonou, Bénin, yalonicaise@yahoo.fr

### **RÉSUMÉ**

Dans le cadre du projet ANR GHYRAF (Gravimétrie et HydRologie en Afrique), trois années de mesures de gravimétrie absolue ont été réalisées en zone de mousson ouest africaine au Bénin. Ces données sont comparées aux variations de stocks d'eau simulées grâce à un modèle numérique contraint par un suivi hydrologique (Sonde à neutrons, piézométrie) et dont la structure est basée sur des données géophysiques (résistivité EM et DC, RMP). La bonne concordance obtenue permet d'évaluer la zone de sensibilité du gravimètre, et d'estimer les contributions relatives de la zone non saturée et de la nappe phréatique dans la variation totale de stock. On montre que la gravimétrie absolue est une source de données indépendantes permettant de contraindre le modèle hydrologique.

Mots clés : hydrologie, hydrogéologie, gravimétrie, méthodes de résistivité, Résonance Magnétique des Protons, zone de socle, AMMA-CATCH, RBV, Bénin.

### **SIMULATION OF GROUNDWATER STORAGE VARIATIONS AND ABSOLUTE GRAVIMETRY MEASUREMENTS AT NALOHOU, BENIN**

#### **ABSTRACT**

In the framework of the GhYRAF (Gravimetry and Hydrology in Africa) ANR project, two years of absolute gravity measurements have been undertaken in northern Benin under monsoon climatic conditions. These measurements are compared to simulated water storage variations using a numerical model based on neutron probes and piezometer data, spatialized using geophysical data (resistivity methods, Magnetic Resonance Soundings). This experiment allows discussing the relative contribution of each layer (i.e. soil and water table fluctuation zone) to gravity signal in term of amplitude and relevant lateral extension. A conclusive fit shows the interest of gravimetric measurements to constrain the hydrological model.

Key words: hydrology, hydrogeology, gravimetry, resistivity methods, Magnetic Resonance Soundings, basement rocks, AMMA-CATCH, RBV, Bénin.

## 1. INTRODUCTION

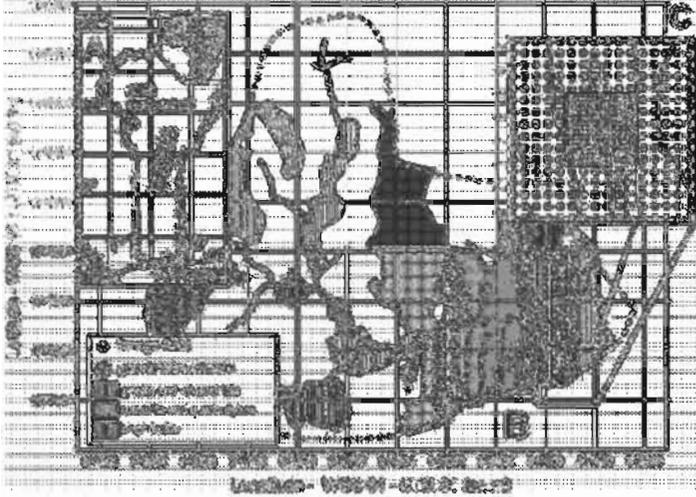
Le projet GHYRAF (Gravimétrie et HYdrologie en AFrique) a pour un objectif d'étudier la sensibilité de différents instruments de mesure gravimétrique aux variations de stock d'eau dans le sol en Afrique de l'Ouest (HINDERER et al, 2009). Cette région possède un cycle hydrologique très contrasté (mousson) et est confrontée à une pression anthropique croissante (SEGUIS et al., 2011). La station de Nalohou est la plus humide (1290 mm/an), située au Centre-Nord Bénin (cf. Fig. 1) sur le site de l'observatoire AMMA-Catch (Réseau des Bassins Versants). Les variations de stock se localisent majoritairement dans l'horizon altéré du socle métamorphique (gneiss et micaschistes).

L'objectif général de notre étude est d'évaluer la pertinence des données de gravimétrie absolue pour contraindre de façon indépendante un modèle hydrologique. Dans un premier temps, deux années de mesures discontinues de gravimétrie absolue ont été comparées aux variations de stocks déduites d'un seul forage de sonde à neutron (SAN), en faisant l'hypothèse d'un terrain homogène sous le gravimètre. Les résultats montrent que les pertes ou les gains d'humidité dans la Zone Non Saturée (ZNS) et la zone de battement de nappe (ZBN) suivent une dynamique similaire et restent en phase avec les variations de gravité. Cependant, dans le détail, les variations de stock ne sont pas correctement reproduites sur toute la période : à certaines dates, 25% du stock d'eau n'est pas correctement restitué par ce modèle homogène. Ces résultats ont été présentés dans notre précédente communication (HECTOR et al., 2011a). L'étude de DESCLOITRES et al. (2011) montre que l'hypothèse d'homogénéité du sous-sol ne peut pas être validée, à cause du caractère très hétérogène des altérites. L'objet de la présente étude est de construire une modélisation tridimensionnelle des variations de stock d'eau souterraine permettant de simuler des mesures de gravimétrie absolue en s'appuyant sur des données hydrologiques spatialisées à partir de données géophysiques et géologiques. Ces simulations sont comparées aux données gravimétriques absolues mesurées. Cet exercice de modélisation permet d'évaluer le rayon de sensibilité du gravimètre aux variations de stock dans les différents compartiments et d'en quantifier l'importance relative. La gravimétrie s'impose donc comme une méthode géophysique donnant accès à une information dynamique, en complémentarité avec la RMP, par exemple, qui offre une vision plus statique.

## 2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

D'après DESCLOITRES et al (2011), des bandes nord-sud d'altérites sont identifiées par une cartographie de résistivité et la géologie. Au sein de ces bandes, la géophysique confirme d'importants contrastes de WRMP, la teneur en eau mesurée par Résonance Magnétique des Protons (cf. Fig. 1). Sous une ZNS de 1.7m d'épaisseur, la nappe peut descendre jusqu'à 6m de profondeur (ZBN). Les variations de stock d'eau en ZNS sont régulièrement mesurées par sonde à neutrons sur le forage le plus proche du gravimètre. La structure du modèle 3D gravimétrique comprend a) une couche tabulaire représentant la ZNS dans laquelle les variations de stocks sont supposées identiques sur l'ensemble de la zone, b) une ZBN structurée en bandes nord-sud dans laquelle les variations piézométriques sont considérées uniformes. La discrétisation utilise des blocs de 10m de côté (ZNS) à 20m de côté (ZBN, épaisseur variant au cours

du temps), et prend en compte la topographie (cf. **fig. 1**). L'effet gravimétrique de chaque bloc est évalué selon l'équation de LEIRIAO et al. (2009). Pour la ZNS, à l'instant  $t$ , la teneur en eau est définie comme égale à l'humidité déduite de la SAN. Pour la ZBN, son épaisseur varie dans le temps, mais la teneur en eau reste constante et égale à WRMP, considérée comme maximisant la valeur de la porosité de drainage. A chaque instant, la contribution de l'ensemble des blocs au champ de pesanteur est simulée et comparée aux mesures gravimétriques absolues.



**Fig. 1 – A.** Localisation de la zone d'étude et du site de Nalohou, situé sur le bassin d'Ara au centre-nord Bénin. **B.** Structuration des altérites de schistes et de gneiss déduite des prospections géophysiques (selon DESCLOITRES et al, 2011) **C.** Modèle gravimétrique de la ZBN construit d'après les résultats RMP. Les couleurs des centres des blocs du modèle correspondent aux valeurs de WRMP des différents compartiments : rouge et jaune, 1,5%, vert, 3%, noir, 10% et gris, 6%.

### 3. RÉSULTATS

La **figure 2** présente le résultat de la simulation 3D sur deux années de mesures. La courbe verte (ZNS) est ajoutée à la courbe bleue (ZBN), pour simuler la variation totale de stock (courbe marron, trait plein). Les données de gravimétrie absolue sont représentées par les croix rouges. Une fois le minimum de la courbe marron ajustée sur le point mesuré de juin 2009 (point ne montrant aucune variation gravimétrique), la concordance entre simulation et mesures est bonne (écart inférieur à 20% du signal total): moins de 2  $\mu\text{g}$ al d'écart, ce qui correspond à un stock d'eau de 40 mm.

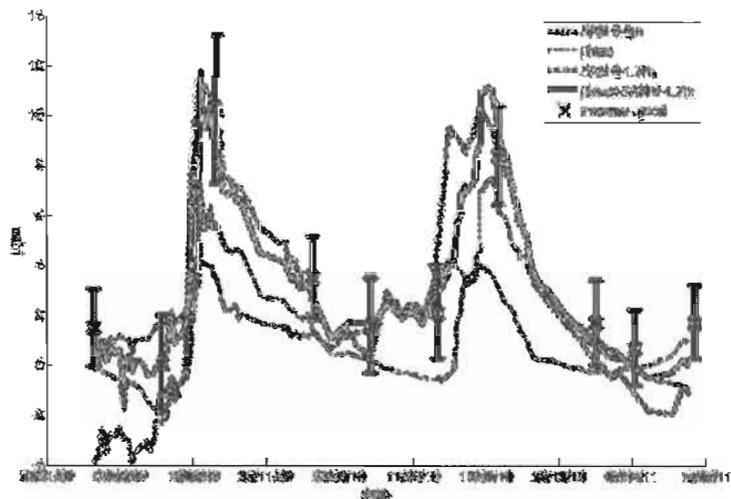
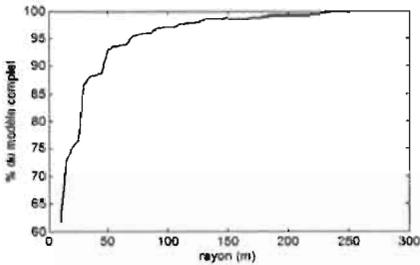


Fig. 2 - Modélisation numérique 3D des différences gravimétriques attendues, comparaison avec les mesures gravimétriques absolues (rouge). En bleu : stock d'eau déduit de la ZBN (et Wrmp) ; en vert : stock d'eau de la ZNS 0-1.7m (d'après données de SAN) ; marron continu : stock d'eau simulé total ; marron pointillé : simulation du stock en considérant un modèle homogène.

#### 4. DISCUSSION ET PERSPECTIVES

Sur la **figure 2**, on a aussi tracé en traits pointillés marron le résultat de la modélisation en conditions homogènes (HECTOR et al, 2011a). On constate que la prise en compte des hétérogénéités structurales améliore l'ajustement en particulier pour les simulations en début de période de mesure. Sans conclure prématurément que le modèle 3D est correct, nous comptons explorer le domaine d'équivalence en confrontant ce modèle 3D aux variations mesurées par SAN dans la ZBN, ainsi qu'à un gravimètre supra-conducteur en continu. La zone d'influence du gravimètre est présentée sur la **figure 3**. On constate que 90 % du signal gravimétrique enregistré dépend de variations de stocks situées dans un rayon de 50m. La remarquable sensibilité de la gravimétrie aux variations de stock nous conduit à réaliser des mesures relatives avec un appareil CG5 en 2011-2012. Les mesures CG5 sont réalisées au droit des unités géologiques et dans un bas-fond hydrologiquement très actif. In fine, la modélisation de la dynamique des flux souterrains pourra être confrontée aux résultats apportés par la gravimétrie.



**Fig. 3. Rayon d'influence des variations de stock autour du gravimètre absolu. Le rayon d'influence (en abscisse) en fonction du pourcentage du signal total (en ordonnée) simulé pour une zone de 500x500m autour du gravimètre absolu FG5.**

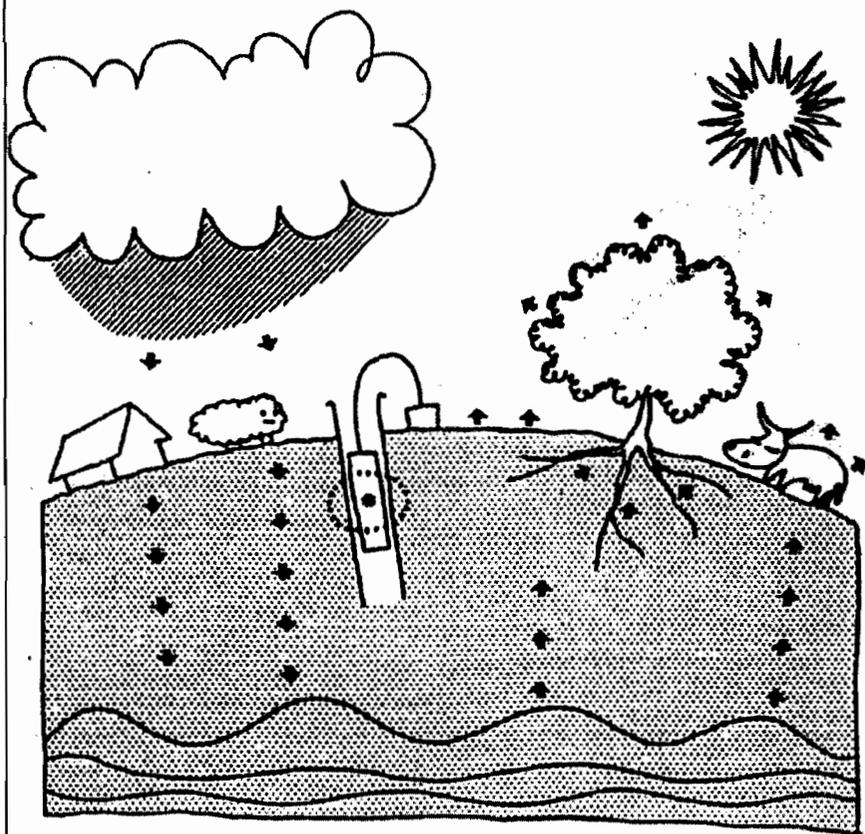
Remerciements : La Direction Générale de l'Eau du Bénin, l'ANR Ghyraf, l'ORE AMMA-Catch, J.C. Gbodogbe, Théo Ouani, Simon Afouda, Sarah Soubeyran, Idrissou, Émile, Saré et les villageois de Nalohou.

### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- DESCLOITRES M., SÉGUI S., LEGCHENKO A., WUBDA M., GUYOT A., COHARD J.M., 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, special issue on Magnetic Resonance Soundings, Vol.9, N°2, pp. 187-200.
- HECTOR B., SEGUIS L., HINDERER J., DESCLOITRES M., LUCK B., LEMOIGNE N., WUBDA M., 2011** - L'expérience ghyraf au Bénin : première comparaison entre suivi gravimétrique absolu et variation de stock hydrique, Bulletin du GFHN, présente édition.
- HINDERER J. ET THE GHYRAF TEAM., 2009** - The GHYRAF (Gravity and Hydrology in Africa) experiment: description and first results. Journal of Geodynamics 48, Issues 3-5, pp: 172-181.
- LEIRIAO, S., HE, X., CHRISTIANSEN, L., ANDERSEN, O.B. & BAUER-GOTTWEIN, P., 2009** - Calculation of the temporal gravity variation from spatially variable water storage change in soils and aquifers. Journal of Hydrology, 365, pp: 302-309.
- SÉGUI S., KAMAGATÉ B., FAVREAU G., DESCLOITRES M., SEIDEL J.L., GALLE S., PEUGEOT C., GOSSET M., LE BARBÉ L., MALINUR F., VAN EXTER S., ARJOUNIN M., BOUBKRAOUI S., WUBDA M., 2011** - Origins of streamflow in a crystalline basement catchment in the sub-humid Soudanian one: the Donga basin (Benin, West Africa). Inter annual variability of water budget. Journal of Hydrology, Vol.402, Issues 1-2, pp 1-13.

# MILIEUX POREUX ET TRANSFERTS HYDRIQUES

BULLETIN DU GROUPE FRANCOPHONE HUMIDIMÉTRIE  
ET TRANSFERTS EN MILIEUX POREUX



**MILIEUX POREUX  
ET TRANSFERTS HYDRIQUES**

---

**BULLETIN DU G.F.H.N.**

**GROUPE FRANCOPHONE HUMIDIMÉTRIE**

**ET TRANSFERTS EN MILIEUX POREUX**

---

**ÉDITION**

INRA Orléans  
Maud SEGER, Isabelle COUSIN  
UR SOLS  
2163 avenue de la Pomme de Pin  
CS 40001 Ardon  
45075 Orléans Cedex 2  
France  
tél. : +33 2 38 41 80 20  
maud.seger@orleans.inra.fr

**PUBLICATION**

CEMAGREF  
Carole ISBERIE  
UMR G-EAU  
3275, route de Cézanne  
CS 40061  
13182 Aix en Provence cedex 5  
France  
tél. : +33 4 42 66 69 67  
carole.isberie@cemagref.fr

**SECRETARIAT**

AgroSup Dijon  
Marjorie UBERTOSI  
Dép. Agronomie, Agroéquipement,  
Élevage et Environnement  
26, Bd Dr Petitjean  
BP 87999  
21079 DIJON cedex, France  
tél. : +33 3 80 77 23 46  
m.ubertosi@agrosupdijon.fr

<b>SOMMAIRE</b>	
<b>JOURNÉES SCIENTIFIQUES GFHN - GEOFCAN - ORLÉANS 29 NOVEMBRE - 1er DÉCEMBRE 2011</b>	
<b>MILIEUX POREUX ET GÉOPHYSIQUE</b>	
<b>COMPOSITION DU CONSEIL D'ADMINISTRATION DU GFHN</b>	<b>5</b>
<b>COMITÉ D'ORGANISATION ET COMITÉ SCIENTIFIQUE</b>	<b>6</b>
<b>JOURNÉES SCIENTIFIQUES DU GFHN ET COLLOQUE GEOFCAN</b>	<b>25</b>
<b>ÉDITORIAL</b>	<b>29</b>
<b>RÉSUMÉS DES COMMUNICATIONS</b>	<b>31</b>
<b>BULLETTIN D'ADHÉSION</b>	<b>294</b>

<b>CONTENTS</b>	
<b>SCIENTIFIC MEETING GFHN-GEOFCAN-ORLÉANS 29 NOVEMBER - 1 DECEMBER 2011</b>	
<b>POROUS MEDIA AND GEOPHYSICS</b>	
<b>GFHN MANAGEMENT COMMITTEE</b>	<b>5</b>
<b>MEETING GFHN-GEOFCAN 2011: ORGANISATION</b>	<b>6</b>
<b>GFHN AND GEOFCAN MEETINGS</b>	<b>25</b>
<b>EDITORIAL</b>	<b>29</b>
<b>ABSTRACTS OF COMMUNICATIONS</b>	<b>31</b>
<b>GFHN REGISTRATION FORM</b>	<b>294</b>