



## L'EXPÉRIENCE GHYRAF AU BÉNIN : PREMIÈRE COMPARAISON ENTRE SUIVI GRAVIMÉTRIQUE ABSOLU ET VARIATION DE STOCK HYDRIQUE

HECTOR B.<sup>1</sup>, SEGUIS L.<sup>2</sup>, HINDERER J.<sup>1</sup>, DESCLOITRES M.<sup>3</sup>, LUCK B.<sup>1</sup>,  
LEMOIGNE N.<sup>4</sup>, WUBDA, M.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> IPGS-EOST, CNRS/UdS, UMR 7516, 5 rue René Descartes, 67084 Strasbourg  
Cedex, France, bhector@unistra.fr

<sup>2</sup> IRD-HSM UM2, Montpellier, France, luc.seguis@ird.fr

<sup>3</sup> IRD-LTHE, IRD, Cotonou, Bénin, marc.descloitres@ird.fr

<sup>4</sup> CNRS-GéoSciences, UM2, Montpellier, nicolas.lemoigne@gm.univ-montp2.fr

### RÉSUMÉ

Sur le site soudanien du SO Amma-Catch, le projet ANR GHYRAF effectue des mesures trimestrielles de gravimétrie absolue depuis 2008. Ces mesures sont comparées à des variations gravimétriques simulées à partir des données hydrologiques (piézométrie, sonde à neutrons) appliquées à un modèle homogène du milieu souterrain. Les mesures gravimétriques sont cohérentes avec les observations hydrologiques et suffisamment précises pour assurer un suivi de la variabilité inter-annuelle des stocks ou une estimation de l'évapotranspiration.

Mots clés : hydrogravimétrie, évapotranspiration, socle, zone soudanienne, Bénin.

### ABSTRACT

#### GHYRAF EXPERIMENT IN BENIN: TIME LAPSE ABSOLUTE GRAVIMETRY AND WATER STORAGE VARIATION

On the sudanian site of the long term observing system Amma-Catch, quarterly absolute gravimetric measurements have been undertaken by the GHYRAF project (Gravimetry and Hydrology in West Africa) since 2008. These data are evaluated against simulated gravimetric measurements deduced from local monitoring of water table and vadose zone water content variations with the assumption of a uniform medium. Gravimetric observations agree with hydrological data and can be used to evaluate the interannual water storage variability or to retrieve evapotranspiration.

Key words: hydrogravimetry, evapotranspiration, basement, sudanian climate, Benin.

### 1. INTRODUCTION

Le cycle hydrologique, de par les variations de masse d'eau qu'il engendre, est responsable de faibles variations du champ de pesanteur terrestre. Avec l'amélioration des instruments de mesure, l'utilisation de la gravimétrie à des fins hydrologiques a été envisagée. Les gravimètres absolus mesurent la gravité avec une précision de l'ordre de  $10 \text{ à } 20 \text{ nm.s}^{-2}$  ( $1 \text{ à } 2 \text{ } \mu\text{gal}$ ) (NIEBAUER, 2007). En considérant l'anomalie de Bouguer, cette précision de mesure correspond à la détection d'une variation de lame d'eau de 24 mm. Dès lors, le gravimètre absolu apparaît comme un nouvel outil non

invasif et intégrateur de suivi des stocks d'eau. Cependant, face à son déploiement délicat, il existe très peu d'exemples d'utilisation de cet instrument pour le suivi long terme des stocks. JACOB et al. (2010) ont ainsi observé sur 3 ans le fonctionnement d'un système karstique dans le Sud de la France. En Afrique, le projet GHYRAF (Gravimétrie et HYdRologie en Afrique) a comme un de ses objectifs d'évaluer la capacité des gravimètres absolus à suivre les variations de stocks souterrains (HINDERER et al., 2009). Des mesures ont été réalisées sur différents sites répartis du Golfe de Guinée au Sahara (HINDERER et al., 2011, PFEFFER et al., 2011). Dans ce papier, nous présenterons la comparaison des mesures gravimétriques et hydrologiques sur le site le plus humide du dispositif (Nalohou, 1.6056°E - 9.7424°N) sur le site soudanien de l'Observatoire hydrologique AMMA-Catch (<http://www.amma-catch.org/>). L'objectif est de vérifier que les fluctuations gravimétriques sont cohérentes avec notre connaissance hydrologique tant dans la dynamique saisonnière que dans la quantification de la porosité de drainage de l'aquifère. Nous utilisons pour cela une modélisation simple faisant intervenir un sous-sol homogène. Ce modèle est complexifié dans notre seconde communication (HECTOR et al., 2011b).

## **2. ZONE D'ÉTUDE**

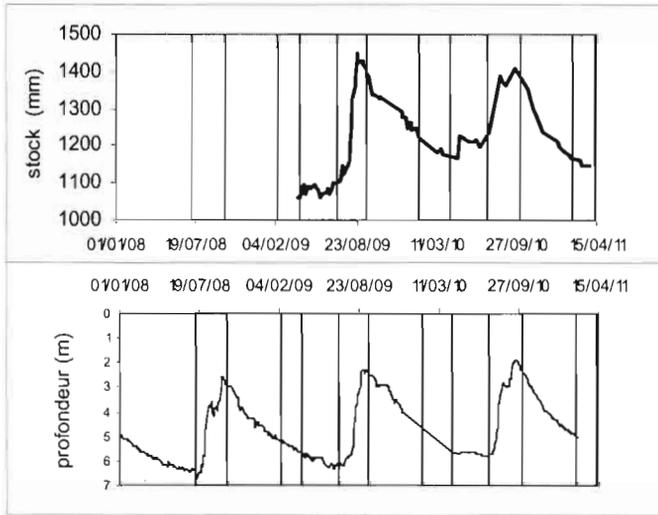
Le site de Nalohou est situé dans le bassin de la Donga, affluent de l'Ouémé, principal fleuve du Bénin. L'ensemble de la zone repose sur un socle paramétamorphique (micaschiste, gneiss et migmatite). Le relief est faible. Le climat est de type soudanien à 2 saisons contrastées (pluie moyenne annuelle : 1192 mm sur la période 1970-2006) avec environ 60% de pluie entre juillet et septembre. Les nappes sont libres et localisées à faible profondeur dans les altérites du socle.

## **3. MATÉRIEL ET MÉTHODE**

### **3.1. Mesures hydrologiques**

#### **3.1.1. Piézométrie**

La piézométrie est enregistrée depuis 2003. Le battement de la nappe est de 4 m et se caractérise par une montée brutale fin juin, un maxima mi-septembre puis une lente décroissance pendant les 9 mois suivants.



**Fig.1 - Données hydrologiques : Graphique inférieur : chronique piézométrique ; Graphique supérieur : stock d'eau 0-6 m obtenu par mesures neutroniques (en équivalent lame d'eau). Les barres verticales représentent les dates de mesure du gravimètre absolu.**

### 3.1.2. Humidité

Depuis avril 2009, des mesures neutroniques sont effectuées tous les 0.5 m dans un forage à coté du gravimètre. L'intérêt de cette méthode est de permettre de calculer les variations de stock d'eau (en équivalent lame d'eau), moyennant un étalonnage à l'aide de prélèvements de sol effectués à 2 périodes hydriques différentes.

## 3.2. Mesures gravimétriques FG5

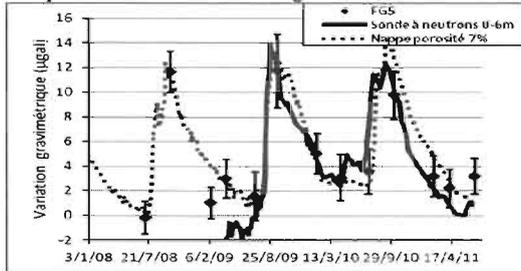
Depuis juillet 2008, 4 mesures sont réalisés annuellement aux dates clés du cycle hydrologique. Les données sont corrigées des effets temporels (marées terrestres, charge océanique, pression atmosphérique et mouvement des pôles), et les résidus obtenus sont supposés être uniquement liés à l'hydrologie. Les effets hydrologiques sont de trois types : effet newtonien direct des variations de stocks d'eau, réponse poro-élastique du sous-sol aux variations de saturation, effet de charge induisant une déformation élastique régionale. Le troisième effet est estimé à partir de modèles globaux et retiré à la mesure, tandis que le second est supposé négligeable.

### 3.3. Méthode

L'effet gravimétrique des variations de stocks souterrains a été modélisé en prenant comme hypothèse un sous-sol homogène. Les variations piézométriques et d'humidité sont donc uniformément distribuées. En fonction du relief du site, une tranche d'eau infinie de 1 m correspond à une variation gravimétrique de 45  $\mu$ gal.

#### 4. RÉSULTAT ET DISCUSSION

La conversion des variations piézométriques en stocks hydriques nécessite de faire l'hypothèse d'une porosité de drainage uniforme. Les variations gravimétriques déduites de la variation de piézométrie sont comparées aux observations gravimétriques (cf. Fig. 2). Les variations gravimétriques simulées à partir des mesures neutroniques entre la surface et 6 m de profondeur sont directement comparables aux mesures du gravimètre.



**Fig. 2 – Variations gravimétriques mesurées au gravimètre FG5 et simulées à partir des mesures piézométriques ou des mesures neutroniques**

Les mesures gravimétriques (cf. Fig. 2) sont cohérentes avec la dynamique annuelle des stocks. Elles sont aussi sensibles aux variations interannuelles : le stock minimal annuel a cru de 2008 à 2010 ( $2 \mu\text{gal}/\text{an}$ ). Cet accroissement est comparable à celui observée à partir de la piézométrie. Il résulte de 2 années à pluviométrie excédentaire. Le taux de décroissance journalier calculé entre les mesures gravimétriques de septembre et celle de fin janvier varie entre  $0.050$  à  $0.080 \mu\text{gal}/\text{j}$  soit  $1.1$  à  $1.8 \text{ mm}/\text{j}$ . Ces bornes encadrent les valeurs d'évapotranspiration en saison sèche déterminées par scintillométrie (GUYOT et al., 2009) ou par analyse du bilan hydrologique (SEGUIE et al., 2011).

Une valeur de porosité de drainage de 7% a permis d'ajuster les variations piézométriques aux mesures gravimétriques (cf. Fig. 2). Cette valeur est dans la gamme (2-10%) des porosités effectives déterminées par RMP au voisinage du gravimètre (DESCLOITRES et al., 2011). Cependant, cette porosité de drainage est considérée comme trop élevée car les variations calculées uniquement à partir de la piézométrie ne prennent pas en compte les modifications de stocks dans la zone non saturée.

Les mesures gravimétriques suivent plus fidèlement les variations gravimétriques issues de la sonde à neutron que celles calculées à partir de la piézométrie. Seules 2 mesures gravimétriques (1/4/2009 et 15/7/2010) s'écartent de la chronique neutronique. La raison est certainement à rechercher dans le choix d'un modèle de sous-sol homogène. Partant de cette interrogation, HECTOR et al. (2011b) tentent de raffiner le modèle de sous-sol 3D où les structures déterminant la distribution spatiale de la porosité de l'aquifère ont été établies par une cartographie des résistivités (DESCLOITRES et al., 2011).

## 5. CONCLUSION

Confronté à l'épreuve de la connaissance hydrologique de la zone, le gravimètre absolu apparaît comme un outil pertinent et fiable pour documenter les variations de stocks. A travers le suivi de 3 cycles hydrologiques, nous avons pu évaluer le stockage souterrain global interannuel. D'autres perspectives s'ouvrent aussi au-delà du suivi long terme des stocks souterrains. Dans l'équation classique du bilan hydrologique « Pluie = Ecoulement + Evapotranspiration + Variation de stock », ce dernier terme difficile à cerner était souvent le parent pauvre qu'on modulait pour équilibrer le bilan. Son estimation par gravimétrie offre maintenant la possibilité de fournir des estimations de l'évapotranspiration, l'autre terme du bilan délicat à définir. Depuis juillet 2010, un gravimètre supraconducteur est installé sur le site de Nalohou. Suivant en continu les variations de stocks avec une précision de 0.1  $\mu\text{gal}$ , il permettra d'affiner notre connaissance des processus hydrologiques grâce à des mesures quasi-continues.

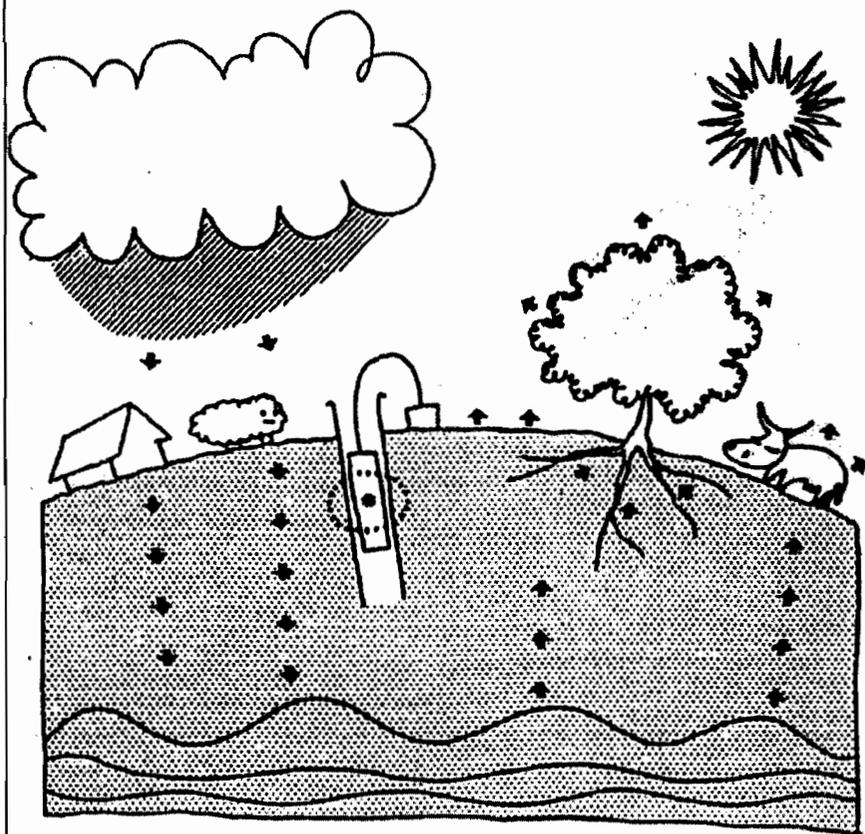
Remerciements La Direction Générale de l'Eau du Bénin, l'ANR Ghyraf, l'ORE AMMA-Catch, J.C. Gbodogbe, Théo Ouani, Simon Afouda, Sarah Soubeyran, Idrissou, Emile, Saré et les villageois de Nalohou.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- DESCLOITRES M., SÉGUI S., LEGCHENKO A., WUBDA M., GUYOT A., COHARD J. M., 2011** - Experimental study of domestic waste material using magnetic resonance measurements. *Near Surf. Geophys.*, 1-14.
- GUYOT A., COHARD J.-M., ANQUETIN S., GALLE S., LLOYD C.R., 2009** - Combined analysis of energy and water balances to estimate latent heat flux of a sudanian small catchment. *J. Hydrol.*, 375(1-2), 227-240.
- HINDERER J., THE GHYRAF TEAM, 2009** - The GHYRAF (Gravity and Hydrology in Africa) experiment: Description and first results. *J. Geodyn.*, 48(3-5), 172-181.
- HINDERER J., THE GHYRAF TEAM, 2011** - Land water storage changes from ground and space geodesy: first results from the GHYRAF (Gravity and Hydrology in Africa) experiment, *Pure Appl. Geophys.*, sous presse.
- JACOB T., BAYER R., CHERY J., LE MOIGNE N., 2010** - Time-lapse microgravity surveys reveal water storage heterogeneity of a karst aquifer. *J. Geophys. Res.*, 115(B6), 1-18.
- NIEBAUER T., 2007** - Gravimetric methods—absolute gravimeter: instruments concepts and implementation. *Treatise on Geophysics*, chapter 3.03, pp. 43–64, ed. Herring, T., Elsevier, Amsterdam.
- PFEFFER J., THE GHYRAF TEAM, 2011** - Local and global hydrological contributions to time-variable gravity in Southwest Niger. *Geophys. J. Int.*, 184(2), 661-672.
- 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., WUBDA M., 2011** - Origins of streamflow in a crystalline basement catchment in a sub-humid Sudanian zone: The Donga basin (Benin, West Africa). *J. Hydrol.*, 402, 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>