

## ÉVÉNEMENTS PLUVIEUX ET SENSIBILITÉ DES AQUIFÈRES LIBRES DANS LE CHAMP DE CAPTAGE DE GODOMEY AU BÉNIN

TOTIN V.S.H.<sup>(1,2)</sup>, TAYLOR R.<sup>(4)</sup>, AMOUSSOU E.<sup>(1,2)</sup>, ALASSANE A.<sup>(3)</sup>, BOUKARI M.<sup>(3)</sup>, BOKO M.<sup>(2)</sup>

(1) Département de Géographie et Aménagement du Territoire, Université de Parakou, BP 123, Parakou, Bénin [sourouhenri@yahoo.fr; totinsourouhv@gmail.com]

(2) Laboratoire de Climatologie, 03 BP 1122 Jéricho, Cotonou, Université d'Abomey-Calavi, Bénin

(3) Département de Géographie, Université Collège London, Gower Street, London WC1E 6BT [richard.taylor@ucl.ac.uk]

(4) Laboratoire d'Hydrologie Appliquée, Université d'Abomey-Calavi, Bénin, BP 526 Cotonou, Bénin [moussaboukari2003@yahoo.fr]

**Résumé** – Cette étude vise à analyser l'influence de la quantité d'eau précipitée dans la recharge des aquifères sous les séquences climatiques humides et sèches et géologiques dans le bassin côtier du Bénin. Les données de précipitations et de fluctuation des niveaux piézométriques des nappes côtières (FR4-2 et FE1) et de plateaux (F2PNUD, PUI-1 et SH) de 1991 à 2012 ont été corrélativement déterminées. Le temps de migration de l'eau pluviale vers les aquifères a été aussi calculé. Cette approche hydroclimatique a permis de déterminer les seuils pluviométriques de réponse des aquifères du Quaternaire et du Continental Terminal à la variation climatique précisément dans le champ de captage de Godomey. La recharge des aquifères à nappe libre est ainsi plus fonction du cumul saisonnier des pluies journalières excédant 10 mm. Ainsi, un événement pluvieux de plus de 10 mm induit une remontée moyenne du toit de la nappe de  $0,7\pm 0,6$  m (F2PNUD) à  $1,8\pm 1,1$  m (SH). Le temps de réponse hydrologique des aquifères à un événement pluvieux d'impact est 7 à 42 jours en séquence climatique humide avec un taux d'infiltration de 0,06 à 0,93 m/jour contre 21 à 49 jours sous séquence climatique sèche avec un taux de recharge de 0,06 à 0,8 m/jour.

**Mots-clés** : bassin côtier, aquifère libre, recharge, événement pluvieux, réponse hydrologique.

**Abstract** – *Unconfined aquifers sensitivity to rainfall events in the well fields of Godomey in Benin.* This study aims to analyze rainfall intensity and volume influence on aquifers recharge under wet and dry climatic and geological sequences in the coastal basin of Benin. Precipitations and fluctuation of the coastal (FR4-2 and FE1) and the plateau (F2PNUD, PUI-1 and SH) water table over the period 1991 to 2012 were correlated. Lag time of aquifers response is also calculated. This hydroclimatic approach helps to determine rainfall thresholds for the Quaternary and Continental Terminal aquifers response to climate variation precisely in the well field of Godomey. Unconfined aquifers recharge is thus a more function of seasonal sum of daily rainfall exceeding 10 mm. So, rainfall event exceeded 10 mm induces average rise of water table from  $0.7\pm 0.6$  m (F2PNUD) to  $1.8\pm 1.1$  m (SH). Lag time of aquifers hydrological response is 7 to 42 days in wet climatic sequence with the vadose-zone velocities of 0.06 to 0.93 m/day against 21 to 49 days under dry climatic sequence with a recharge rate from 0.06 to 0.8 m/day.

**Keywords**: coastal basin, unconfined aquifer, recharge, rainfall event, hydrological response.

### Introduction

La variabilité climatique est le plus important facteur de l'évolution du taux de recharge des aquifères et les précipitations constituent la composante dominante dans le bilan de l'eau dans un bassin (Healy et Scanlon, 2010). L'intensité des pluies et le volume d'eau pluviale jouent un rôle important dans la recharge des aquifères. L'importance des fortes pluies dans la recharge des eaux souterraines a été montrée en Afrique subsaharienne (Eilers *et al.*, 2007 ; Mileham *et al.*, 2009 ; Owor *et al.*, 2009 ; Taylor *et al.*, 2012). De plus, Boukari (1998), Allassane (2002), Totin *et al.* (2009), Totin (2010) ont montré la sensibilité du système aquifère à la variation du climat dans le bassin hydrogéologique côtier du Bénin. La recharge des aquifères à nappe libre dépendrait essentiellement des événements pluviométriques excédant 10 mm/jour (Taylor et Tindimugaya, 2012). Cette étude vise à mettre en évidence l'influence des événements pluvieux sur la recharge des aquifères sous différentes conditions géologiques, climatiques et d'occupation du sol dans le champ de captage de Godomey, localisé dans la partie sud-est du bassin sédimentaire côtier du Bénin.

Le champ de captage de Godomey est situé entre 6°20' et 6°30' de latitude Nord et 2°10' et 2°22' de longitude Est (figure 1).

Il est localisé au sud-est du bassin sédimentaire côtier qui contient 35 % du potentiel en ressources en eau souterraine du Bénin. Ce secteur est considéré comme représentatif de l'ensemble de la bordure sud du système aquifère du Continental Terminal.

Boukari (1998) explique que la distribution des niveaux piézométriques dans l'espace confirme la différenciation en une nappe superficielle et une nappe profonde.

Le régime hydraulique respectif des deux nappes suit les rythmes des précipitations et des prélèvements (pompages).

Il s'agit de déterminer dans ce travail à quel point les nappes superficielles et profondes de l'aire de pompage intensif d'eau souterraine de Godomey sont sensibles à la variation de l'intensité et du volume des précipitations.

## 1. Données et méthodes

### 1.1. Matériels et données d'étude

Les piézomètres de suivi régulier du niveau des nappes du Continental Terminal et du Quaternaire ont été retenus (tableau 1). Les relevés piézométriques journaliers disponibles et extraits de la base de données du Laboratoire d'Hydrologie Appliquée de l'Université d'Abomey-Calavi, couvrent la période 1991-2012.

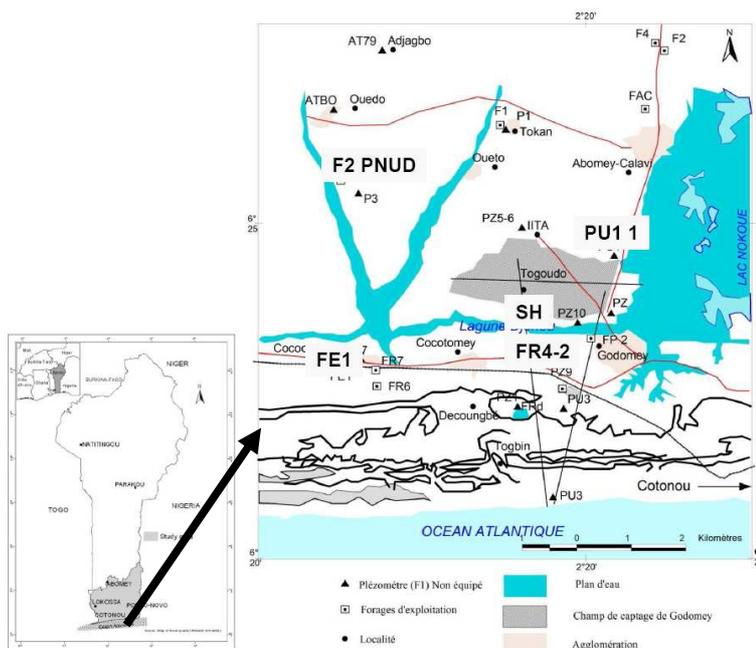
**Tableau 1.** Caractéristiques de quelques piézomètres du champ de captage de Godomey.

Piézomètres	Niveau statique/sol (m)	Localisation
FR4-2	2,60	Plaine sableuse côtière loin du site de pompage
FE1	3,94	
F2PNUD	17,48	Plateau sablo-argileux d'Allada loin du site de captage
PU1-1	15,38	Plateau sablo-argileux d'Allada dans le site de captage
SH	9,47	

Par ailleurs, la station climatologique de l'Institut International d'Agriculture Tropicale (IITA), située dans le secteur du champ de captage, a servi de base de collecte des données climatologiques, notamment les précipitations journalières.

### 1.2. Méthodes

Pour limiter les incertitudes d'évaluation du stockage des aquifères en général, la recharge a été estimée au niveau de chacun des piézomètres FR4-2, FE1, F2PNUD, PU1-1 et SH par l'équation :



**Figure 1.** Localisation géographique du champ de captage de Godomey.

$$R = N_{p_{t_1}} - N_{p_{t_0}}$$

avec :

$R$  = Recharge ou magnitude piézométrique ;  $N_{p_{t_1}}$  = Niveau piézométrique à une date  $t_1$  d'élévation par rapport à une date  $t_0$  et  $N_{p_{t_0}}$  = Niveau piézométrique à une date  $t_0$  où le toit piézométrique est à son plus faible niveau.

Cette méthode, inspirée des travaux de Healy et Cook (2002) et Lee *et al.* (2006) vise à mettre en évidence l'impact du signal pluviométrique dans la variation piézométrique. Ainsi, la corrélation des événements pluvieux (forts) à cette recharge a permis de déterminer le temps de réponse de l'aquifère à une pluviométrie d'impact (Lee *et al.*, 2006). La définition du seuil d'une forte pluie est basée sur l'analyse de la sensibilité aux seuils variant entre 5 et 25 mm/jour (Owor *et al.*, 2009).

Soit  $T_{rps}$ , le temps de réponse piézométrique d'une nappe :

$$T_{rps} = \text{date}_{\text{pluie-impact}} - \text{date}_{\text{pluie1sp}}$$

où :

$\text{date}_{\text{pluie1sp}}$  = date de la première pluie journalière de la mousson (> 10 mm/jour) en début de la grande saison pluvieuse (avril) et  $\text{date}_{\text{pluie-impact}}$  = date de la pluie journalière d'impact ayant permis de percevoir la réponse de la nappe.

Les dates en format jour/mois/année ont été préalablement converties en dates décimales à l'aide de la formule :  $D_{\text{décimal}} = \text{Année} + (\text{Mois} - 1)/12 + \text{Rang}_{\text{date}}/365,25$

La magnitude piézométrique a été ensuite corrélée avec la somme saisonnière des précipitations journalières ( $\Sigma Pi$ ) d'une part et la somme saisonnière des pluies au-delà du seuil 10 mm/jour ( $(\Sigma(Pi-10))$ ) d'autre part. Owor *et al.* (2009) ont montré à travers la première corrélation que la recharge est fonction de toute la pluviométrie mais que seules les fortes pluies (>10 mm/jour) contribuent réellement à cette recharge. Le taux de recharge des nappes est estimé en divisant la magnitude piézométrique par le temps de réponse de la nappe ; soit  $R/T_{rps}$ .

Cette approche analytique de la sensibilité pluvio-piézométrique des aquifères de la plaine côtière et du plateau d'Allada est conforme à celle utilisée par Döll et Florke (2005) pour modéliser la recharge dans la zone intertropicale qui intègre le Bénin et donc le champ de captage de Godomey.

## 2. Résultats et discussions

### 2.1. Caractéristiques hydroclimatiques du champ de captage de Godomey

Le champ de captage de Godomey est situé dans le domaine du climat subéquatorial. Le rythme hydroclimatique est lié à la succession des deux saisons pluvieuses et deux saisons sèches et surtout à la manifestation de la mousson ouest africaine. Lebel *et al.* (2003) ont montré que la mousson est le principal facteur régulant le cycle hydrologique et sa variabilité a un impact majeur sur les ressources en eau,...

De ce phénomène, important générateur des précipitations en Afrique de l'ouest en général et au Bénin en particulier, dépend essentiellement entre juin et septembre (figure 2), la réalimentation des aquifères à nappes libres et, même captives dans les secteurs où elles sont libres au nord du bassin sédimentaire côtier du Bénin.

Le relèvement du toit piézométrique est l'expression de l'impact du climat sur le système aquifère du champ de captage de Godomey.

Le climat de ce secteur est caractérisé en moyenne à l'échelle journalière par une pluviométrie de  $3,4 \pm 11,6$  mm, une évaporation de  $4,0 \pm 1,3$  mm. Les températures varient de  $22,4 \pm 1,8$  °C pour les minima à  $31,3 \pm 1,8$  °C pour les maxima et  $26,9 \pm 1,6$  °C pour la moyenne. Quant à l'humidité relative, elle est de  $59,6 \pm 12,5$  % pour les minima,  $95,8 \pm 3,7$  % pour les maxima et  $77,7 \pm 7,5$  % en moyenne.

Le rythme climatique saisonnier, notamment pluviométrique se superpose à la dynamique des niveaux piézométriques des nappes suivies par les piézomètres FR4-2, FE1, F2PNUD, PU1-1 et SH dans le secteur d'étude. Les régimes piézométriques coïncident avec une fonction polynomiale de 3<sup>e</sup> degré qui explique la réponse de la nappe aux grandes séquences climatiques de l'année (Totin, 2010). Ainsi, à une phase d'augmentation (saison pluvieuse) ou de baisse (saison sèche) des précipitations correspond, avec une certaine nuance, un relèvement ou d'abaissement du toit des nappes.

La décomposition des régimes piézométriques montre une période de remontée du toit de la nappe sur trois mois (d'avril à juillet) et une autre de récession qui dure environ neuf mois (août à avril). Ainsi, l'infiltration efficace s'effectue essentiellement au cours de la grande saison pluvieuse entre mai et juillet où l'évapotranspiration réelle (ETR) est inférieure aux précipitations. La petite saison sèche du mois d'août semble être l'élément de déclenchement du tarissement des nappes FR4-2, FE1, SH car déjà l'ETR égalant les lames d'eau précipitée, inhibe les processus d'infiltration. En effet, la petite saison pluvieuse n'a pas d'influence substantielle sur la remontée du niveau de ces nappes. La récession piézométrique continue pendant la grande saison sèche jusqu'au début de la grande saison pluvieuse 2 à 3 mois après les premières pluies. Ce constat est aussi fait par Boukari (1998) qui montrait que la remontée des niveaux ne se fait pas concomitamment avec le retour de la pluie. Cela est lié à la contribution des premières pluies à la saturation des couches superficielles et à la zone non saturée.

La réalimentation de la nappe de F2PNUD se fait de façon continue de mai à septembre voire octobre ou novembre correspondant à la période couvrant la grande saison pluvieuse, la petite saison sèche et la petite saison pluvieuse.

## 2.2. Réponse des nappes aux événements pluvieux

Les aquifères réagissent sensiblement aux différentes conditions climatiques (normale, sèche ou humide). Quelle que soit la tendance de variation pluviométrique, la recharge des aquifères à nappe libre (Continental Terminal ou Quaternaire) est, en effet, plus fonction des cumuls de pluies journalières excédant 10 mm (figure 3).

Ainsi, à l'échelle annuelle, les totaux de pluie excédant 10 mm/jour ont induit en moyenne (1991-2012) une remontée de niveau piézométrique de  $1,7 \pm 0,7$  m pour FR4-2,  $1,2 \pm 0,6$  m pour FE1,  $0,7 \pm 0,6$  m pour F2PNUD,  $1,0 \pm 0,5$  m pour PU1-1 et  $1,8 \pm 1,1$  m pour SH.

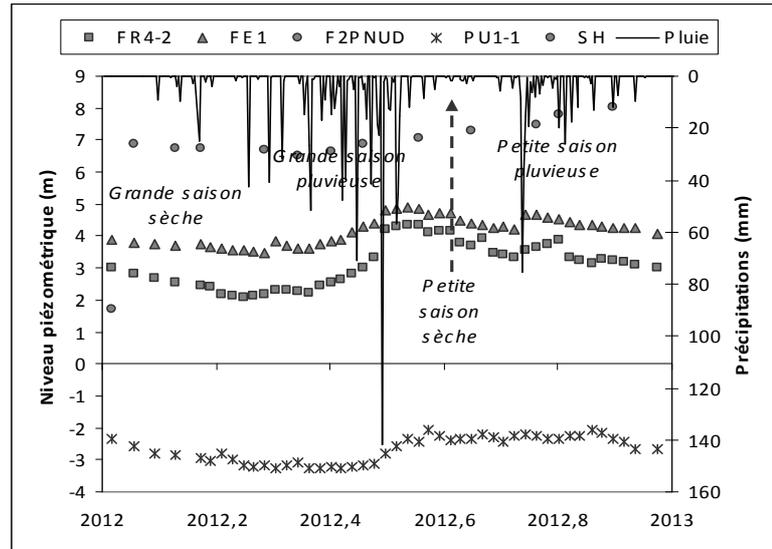


Figure 2. Régimes pluviométrique et piézométrique dans le champ de captage de Godomey.

Ce résultat corrobore celui de Owor *et al.* (2009) pour qui la magnitude piézométrique dépend plus du cumul des fortes pluies journalières excédant le seuil 10 mm/jour ( $\Sigma(P_i - 10)$ ) que de la somme des précipitations quotidiennes ( $\Sigma P_i$ ).

À conditions climatiques égales, la sensibilité des nappes est liée à leur profondeur ; 2 à 4 m pour FE1 et FR4-2 et 17,5 m pour F2PNUD. Malgré leur profondeur de 9 à 15 m, la grande sensibilité des nappes de PU1-1 et SH (remontée maximale moyenne 1,9 à 3,4 m) est due à l'influence combinée du climat et des pompages excessifs d'eau souterraine.

Le temps de réponse hydrologique (tableau 2) des aquifères à un événement pluvieux d'impact est 7 à 42 jours en séquence climatique humide avec un taux d'infiltration de 0,06 à 0,93 m/jour. Il est par contre de 21 à 49 jours sous séquence climatique sèche avec un taux de recharge de 0,06 à 0,8 m/jour.

De plus, la réaction piézométrique est plus rapide au niveau de la nappe de la plaine côtière sablonneuse (FR4-2 et FE1) qu'au niveau du plateau (F2PNUD, PU1-1 et SH) où les couches géologiques sont épaisses et le toit piézométrique plus en profondeur.

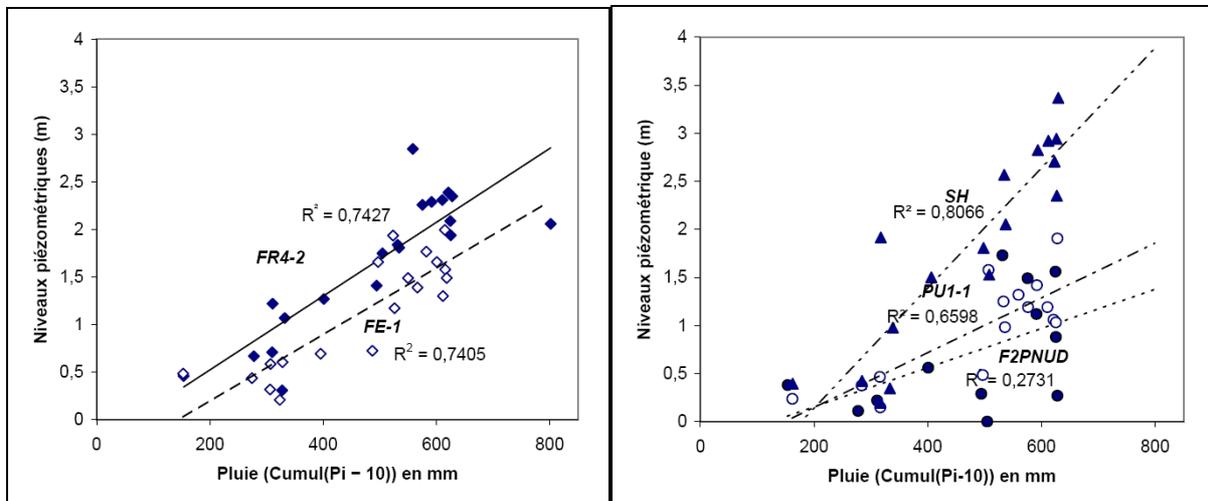


Figure 3. Corrélation de la recharge des nappes avec les cumuls d'événements pluvieux excédant 10 mm par jour.

Tableau 2. Temps de réponse et taux de recharge dans le champ de captage de Godomey.

	Climat humide		Climat sec	
	Temps de réponse (semaine)	Taux d'infiltration (m/semaine)	Temps de réponse (semaine)	Taux d'infiltration (m/semaine)
Secteur littoral loin du site de pompage intensif (FR4-2 et FE1) NS = 2,6 à 3,9 m ; Alt/NMM = 7,4 à 7,8 m	4 [1 to 6]	1,0 [0,4 to 2,3]	5 [3 to 7]	0,7 [0,4 to 1,0]
Secteur du plateau d'Allada loin du site de pompage intensif (F2PNUD) NS = 17,5 m ; Alt/NMM = 21,1 m	5 [ ? ]	3,4 [ ? ]	7 [ ? ]	3,0 [ ? ]
Secteur du plateau d'Allada proche du site de pompage intensif (PU1-1 et SH) NS = 9,5 à 15,4 m ; Alt/NM = 12,6 à 13,4 m	4 [2 to 6]	3,3 [1,5 to 6,5]	5 [3 to 7]	3,0 [1,4 to 5,7]

NS = Niveau statique ; Alt = Altitude ; NMM = Niveau Moyen de la Mer ; [ ? ] Données insuffisantes

## Conclusion

La dynamique du niveau piézométrique du système aquifère du champ de captage de Godomey est liée à la variation du climat. Les séquences climatiques (sèche ou humide) influent sur le régime de recharge et de vidange des nappes. Mais, la réponse hydrologique des aquifères du Continental Terminal et du Quaternaire, suivis à l'aide des piézomètres FR4-2, FE1, F2PNUD, PU1-1 et SH dépend plus des cumuls des pluies journalières excédant le seuil 10 mm/jour que des hauteurs de pluies annuelles.

La réponse différée des amplitudes piézométriques aux événements pluvieux est lié au temps de migration de l'eau pluviale à travers les couches géologiques (de la plaine sablonneuse ou du plateau sablo-argileux) dans le bassin côtier du Bénin.

## Références bibliographiques

- Alassane A., 2004 : Etude hydrogéologique du Continental terminal et des formations de la plaine littorale dans la région de Porto-Novo (Sud du Bénin) : Identification des aquifères et vulnérabilité de la nappe superficielle. Thèse de Doctorat du 3ème cycle. Université Cheikh Anta Diop, Dakar, Sénégal, 145 p. + annexes.
- Boukari M., 1998 : Fonctionnement du système aquifère exploité pour l'approvisionnement en eau de la ville de Cotonou sur le littoral béninois. Impact du développement urbain sur la qualité des ressources. Thèse Doctorat ès-Science. Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Sénégal, 278 p. + annexes.
- Döll P., Florke M., 2005: Global-scale estimation of diffuse groundwater recharge. Frankfurt Hydrology Paper 03 Institute of Physical Geography, Frankfurt University, Germany.
- Eilers V.H.M, Carter R.C., Rushton K.R., 2007 : A single layer soil water balance model for estimating deep drainage (potential recharge): An application to cropped land in semi-arid North-east Nigeria. *Geoderma*, **140**, 119-131.
- Healy R.W., Cook P.G., 2002 : Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeological Journal*, **10**, 91-109.
- Healy W.R., Scanlon R.B., 2010 : Estimating groundwater recharge. Cambridge University Press, 245 p.
- Lebel T., Didhiou A., Laurent H., 2003 : Seasonal cycle and interannual variability of the Sahelian rainfall at hydrological scales. *Journal of Geophysical Resources*, **108**(D8), 8389, doi:10.1029.
- Lee L.J.E., *et al.*, 2006 : Analysis of water-level response to rainfall and implications for recharge pathways in the Chalk aquifer. *SE England Journal of Hydrology*, **330**, 604-620.
- Mileham L., Taylor R.G., Todd M., Tindimugaya C., Thompson J., 2009 : Climate change impacts on the terrestrial hydrology of a humid, equatorial catchment: sensitivity of projections to rainfall intensity. *Hydrological Sciences Journal*, **54**, 727-738.
- Owor M., Taylor G.R., Tindimugaya C., Mwesigwa D., 2009 : Rainfall intensity and groundwater recharge: empirical evidence from the Upper Nile Basin. *Environmental Research Letters*, **4**, 035009.
- Taylor R., Tindimugaya C., 2012 : The impacts of climate change and rapid development on weathered crystalline rock aquifer systems in the humid tropics of sub-Saharan Africa: evidence from south-western Uganda. In: *Climate Change Effects on Groundwater Resources: A global Synthesis of Findings and Recommendations* (ed. by Holger Treidel, Jose Luis Martin Bordes, Jason J. Gurdak), CRC Press, **27**, 17-32.
- Totin V.S.H., 2010 : Sensibilité des eaux souterraines du bassin sédimentaire côtier du Bénin à l'évolution du climat et aux modes d'exploitation : Stratégies de gestion durable. Thèse de Doctorat, Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Bénin, 283 p.
- Totin V.S.H., Boukari M., Boko M., 2009 : Groundwater Recharge Mechanisms and Water Management in the Coastal Sedimentary Basin of Benin (West Africa). *Groundwater and Climate in Africa*. Proceedings of the Kampala Conference, June 2008 IAHS Publ. **334-21**, 127-134.
- Taylor R.G., Scanlon B., Döll P., Rodell M., van Beek R., Wada Y., Longuevergne L., Leblanc M., Famiglietti J.S., Edmunds M., Konikow L., Green T.R., Chen J., Taniguchi M., Bierkens M.F.P., MacDonald A., Fan Y., Maxwell R.M., Yechieli Y., Gurdak J.J., Allen D.M., Shamsudduha M., Hiscock K., Yeh P.J.-F., Holman I., Treidel H., 2002 : Ground water and climate change. *Nature Climate Change*, doi.org/10.1038/nclimate1744.

