

## **Impacts des marées terrestres et de l'activité tectonique sur les eaux souterraines (Golfe de Corinthe, Grèce)**

**V. LEONARDI<sup>1</sup>, P. GAVRILENKO<sup>2</sup> & H. MARCHIONI<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *UMR Sisyphe, Université Paris 6, Case 123, 4 place Jussieu, F-75252 Paris Cedex 5, France  
[veronique.leonardi@cer.jussieu.fr](mailto:veronique.leonardi@cer.jussieu.fr)*

<sup>2</sup> *Géosciences Rennes, Université Rennes 1, 263 av. du Général Leclerc, F-35042 Rennes Cedex, France*

**Résumé** Dans un contexte tectonique distensif actif (Golfe de Corinthe, Grèce), l'influence des marées terrestres et de la pression atmosphérique sur des mesures de débit et de niveau piézométrique de deux aquifères artésiens a pu être mise en évidence. Par caractérisation de ces effets parasites sur les séries hydrologiques, d'autres types de fluctuations de pression ou de débit dans les puits ont pu être identifiés, semblant susceptibles de témoigner de l'activité sismique locale.

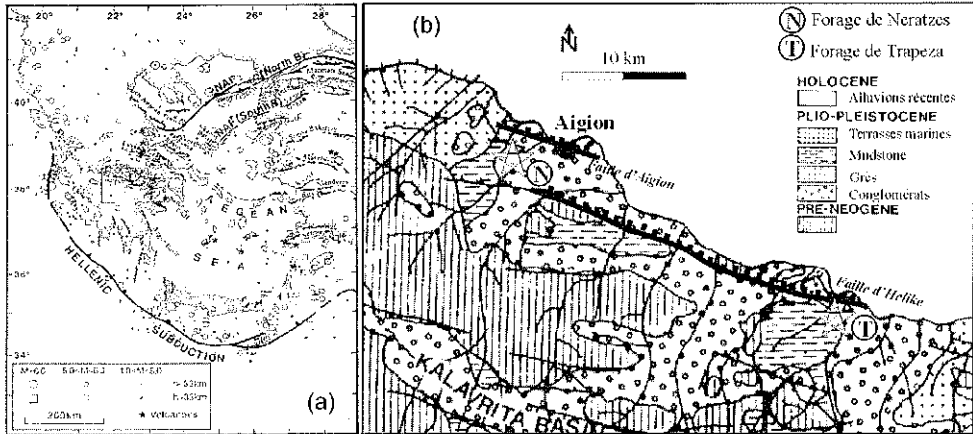
**Mots clef** Corinthe; hydrogéologie; marées terrestres; pression atmosphérique; séismes

**Key words** Corinth; hydrogeology; earth tides; atmospheric pressure; earthquakes

### **INTRODUCTION**

De nombreuses observations montrent qu'une déformation d'origine sismique est susceptible d'affecter le fonctionnement hydrogéologique d'un aquifère (Leonardi *et al.*, 1997; Roeloffs, 1988). Tous les aquifères ne sont cependant pas sensibles à une déformation de ce type. En effet, seuls ceux qui sont fortement confinés peuvent enregistrer des signaux induits par des variations infinitésimales de volume des roches. Afin d'utiliser un puits comme jauge de déformation lors d'un processus d'origine tectonique, il est nécessaire d'étalonner ce puits au préalable. On utilisera un processus de déformation d'amplitude connue pour réaliser cet étalonnage: les sollicitations naturelles que sont les marées terrestres et la pression atmosphérique (pouvant être considérées comme parasites) auxquelles les aquifères captifs sont sensibles pourront être utilisées à ces fins, nous permettant ainsi d'identifier d'éventuelles fluctuations résiduelles susceptibles de témoigner de l'activité sismique locale.

Notons par ailleurs que les aquifères sont en premier lieu sensibles aux précipitations: dans cette étude, l'influence précise de la mise en charge de l'aquifère par l'infiltration des précipitations n'a pu être réellement étudiée pour l'instant; la série pluviométrique disponible étant incomplète (année 2001–février 2002). Cependant, les aquifères étant artésiens et profonds, nous pouvons considérer que les fluctuations piézométriques dues à la recharge de l'aquifère sont lissées au cours du temps. Il faut noter enfin que le signal hydrologique peut être perturbé par des pompages d'origine anthropique, ce qui n'est pas le cas dans notre zone d'étude où aucun forage profond n'est présent dans un rayon de 3 km autour des sites.



**Fig. 1** (a) Contexte tectonique et géodynamique du Golfe de Corinthe (Grèce). Les ronds et carrés représentent les séismes de magnitude comprise entre 4 et 6 (modifié d'après Armijo *et al.*, 1996). (b) Cadre géologique de la région d'Aigion et localisation des forages de Neratzes et de Trapeza (modifié d'après Zeligidis, 2000).

## CADRE D'ETUDE

Le site d'étude est localisé dans la région d'Aigion, ville grecque du Péloponnèse près de Patras, située sur la rive sud du Golfe de Corinthe (Fig. 1).

**Contexte tectonique et géodynamique** La région d'Aigion s'inscrit dans l'ensemble tectonique du Golfe de Corinthe qui se trouve dans un contexte extensif de bassin d'arrière-arc et constitue un rift actif depuis le Miocène moyen. L'extension dans le Golfe est particulièrement active (de 1 à 1.5 cm an<sup>-1</sup>), et s'accompagne d'une activité sismique importante (Fig. 1(a)) (Armijo *et al.*, 1996). Les failles normales contrôlent la géométrie des bassins qui correspond à une structure en graben avec une série de blocs basculés. Cette structure en graben a favorisé le dépôt de séquences sédimentaires de forte épaisseur, de faciès continental et marin et d'âge Plio-quaternaire (Fig. 1(b)) (Zeligidis, 2000).

**Contexte hydrogéologique des forages d'étude** Ces séries sédimentaires détritiques, déposées dans les compartiments abaissés par le jeu des failles normales, constituent des aquifères multicouches, de perméabilité variable selon le degré de consolidation de ces séries et selon la nature et la granulométrie des sédiments. Elles reposent sur des formations carbonatées aquifères fortement fracturées et plissées, qui affleurent plus au sud à des altitudes moyennes de 1500 à 2000 m. Ces deux systèmes aquifères (détritiques et carbonatées) constituent les principales ressources en eau de la région d'Aigion.

Les forages d'étude de Neratzes et de Trapeza, localisés de part et d'autre des failles d'Aigion et d'Helike sont implantés dans les formations sédimentaires plio-pleistocènes (Fig. 1(b)):

- *Neratzes*: Ce forage artésien capte les eaux contenues dans des formations de type alluvial, entre 110 et 170 m de profondeur. Il est équipé avec un débitmètre électromagnétique (précision à 10<sup>-4</sup> l s<sup>-1</sup>, pas de temps de 4 min).

*Trapeza* Ce forage artésien capte les eaux contenues dans des formations de type lacustre, sableuses intercalées de marnes, entre 110 et 130 m de profondeur. Ce forage a été équipé d'une sonde de pression (pas de temps horaire).

## ANALYSE ET INTERPRETATION DES DONNEES

Le forages de *Trapeza* et *Neratzes* présentent des fluctuations de charge hydraulique et de débit de longues et de courtes périodes:

- les variations de longue période (de l'ordre du mois) ont des amplitudes de 20 à 60 cm: elles correspondent à la mise en charge et à la vidange de l'aquifère. Elles sont représentées par la tendance de la courbe brute, obtenue par une moyenne mobile sur 7 jours (Fig. 2(a));
- les variations de courte longueur d'onde, de semi-diurne à hebdomadaires, ont des amplitudes plus faibles de 3 à 10 cm (Fig. 2(b)). Ces variations semblent être induites soit par la déformation volumique due aux marées terrestres, soit par les variations de pression atmosphérique.

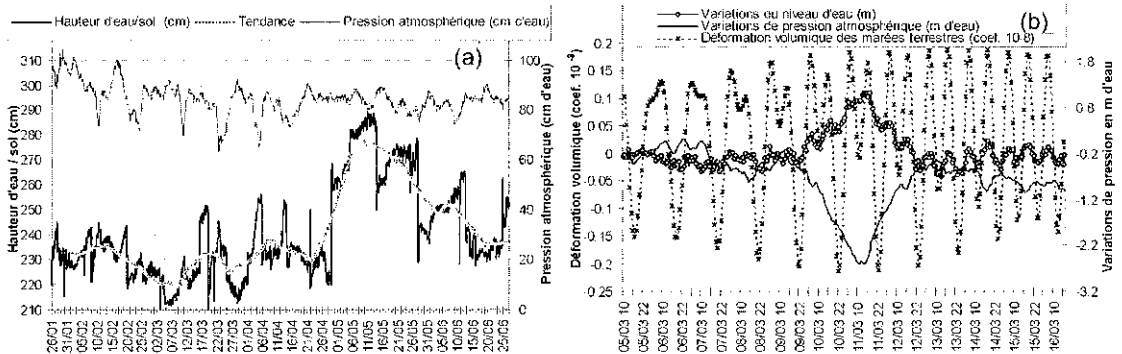


Fig. 2 (a) Fluctuations du niveau piézométrique et de la pression atmosphérique à *Trapeza*. (b) Variations de courte longueur d'onde du niveau piézométrique, comparaison avec les marées terrestres et la pression atmosphérique.

### Impact des marées terrestres sur les aquifères captifs de *Neratzes* et de *Trapeza*

Les valeurs de marées terrestres ont été obtenues grâce au programme ETGTAB Version 3.0 réalisé par Wenzel (1996), permettant de calculer ces données en fonction de la latitude et longitude du site d'étude. Pour pouvoir identifier l'effet des marées terrestres sur les aquifères étudiés, les données brutes de marées terrestres et des mesures sur puits ont été décomposées en domaine spectral en utilisant la Transformée de Fourier Rapide (FFT). Les composantes principales lunaires et solaires O1, K1, N2, M2 et S2 sont bien marquées sur les différentes séries spectrales (Fig. 3). Ceci met en évidence l'influence de la déformation volumique des réservoirs aquifères de *Trapeza* et de *Neratzes* induite par les marées terrestres. La sensibilité des aquifères à ces déformations dépend des coefficients d'élasticité de chaque réservoir. Les anomalies résiduelles d'origine éventuellement sismique observées sur plusieurs forages ne pourront donc être étudiées en référence à un événement tectonique qu'après

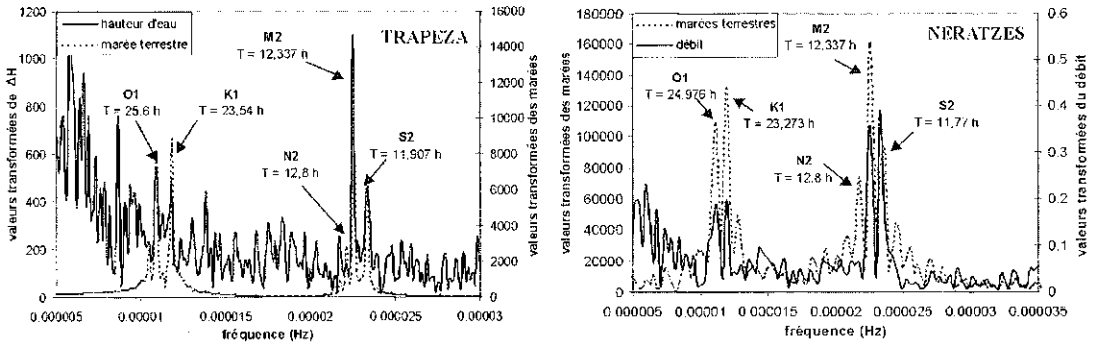


Fig. 3 Décomposition spectrale par FFT des séries de marées terrestres, de niveau piézométrique et de débit des forages de Trapeza et de Neratzes. O1: composante principale lunaire diurne, K1: comp. lunaire-solaire diurne, N2: comp. lunaire semi-diurne, M2: comp. principale lunaire semi-diurne, et S2: comp. principale solaire semi-diurne.

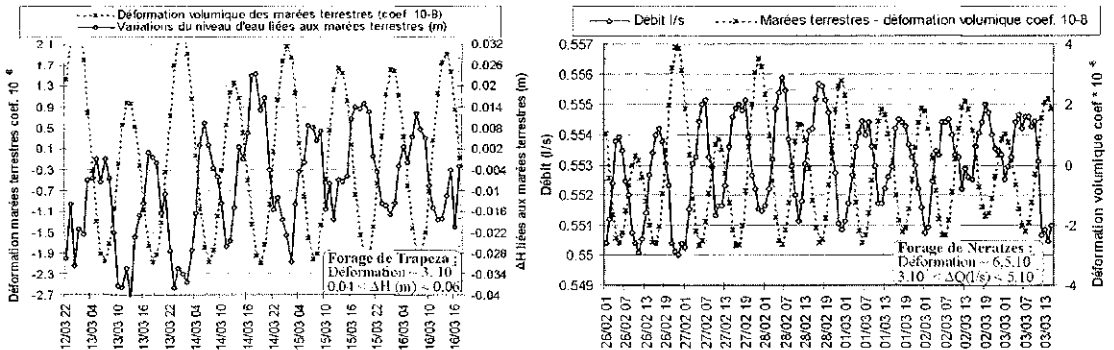


Fig. 4 Sensibilité des forages de Neratzes et de Trapeza à une déformation.

étalonnage des puits par rapport à une déformation connue, comme celle des marées terrestres.

Les coefficients de réponses des puits à une déformation de l'ordre de  $2 \times 10^{-8}$  induite par les marées terrestres sont, dans le cas des débits de Neratzes, de l'ordre de  $3$  à  $5 \times 10^{-3} \text{ l s}^{-1}$ , et dans le cas des niveaux piézométriques de Trapeza, de l'ordre de  $3$  à  $5 \text{ cm}$ , selon que l'on considère la phase la plus influente M2, ou les phases les moins influentes Q1 et O1 (Fig. 4). En réalisant une analyse plus fine de l'influence de ces différentes phases sur le niveau piézométrique de Trapeza, un étalonnage de ce puits a été établi comme ayant une sensibilité de l'ordre de  $30 \text{ cm}$  pour une déformation  $\epsilon_0$  de  $10^{-6}$ .

**Impact de la pression atmosphérique sur l'aquifère captif de Trapeza** Le signal piézométrique de Trapeza étant très perturbé, nous n'avons réalisé de corrélation linéaire avec la pression atmosphérique que pour certaines périodes, non affectées par des variations brutales de pression dans le puits. Les coefficients de corrélation  $R^2$ , de l'ordre de  $0.9$  (Fig. 5), montrent une forte influence de la pression atmosphérique sur la

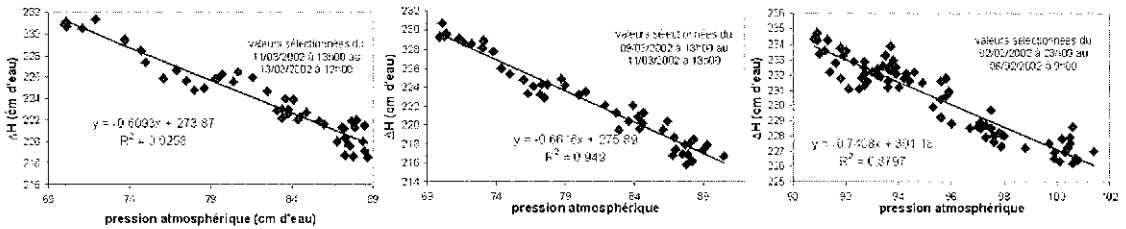


Fig. 5 Corrélation entre pression atmosphérique et pression d'eau à Trapeza.

charge hydraulique dans le puits. Les fluctuations des niveaux d'eau dues aux variations de la pression atmosphérique dépendent des coefficients d'élasticité de l'aquifère (Jacob, 1940), qui interviennent également dans l'expression du coefficient

d'emmagasinement  $S$  de l'aquifère:  $S = \gamma\phi\beta m \left( \frac{1}{BE} \right)$  avec  $\gamma$  = poids volumique de l'eau

(à 20°C,  $\gamma = 9798 \text{ kN m}^{-3}$ ),  $\phi$  = porosité (estimée à 0.1),  $\beta$  = module de compressibilité de l'eau (à 20°C,  $\beta = 4.59 \times 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$ ),  $m$  = épaisseur saturée de l'aquifère ( $m = 20 \text{ m}$ ), et où  $BE$  est un terme appelé "efficacité barométrique" (Jacob, 1940) correspondant à:

$$BE = \frac{dh}{dp_a / \gamma} = \frac{1}{1 + \frac{\alpha}{\phi\beta}}$$

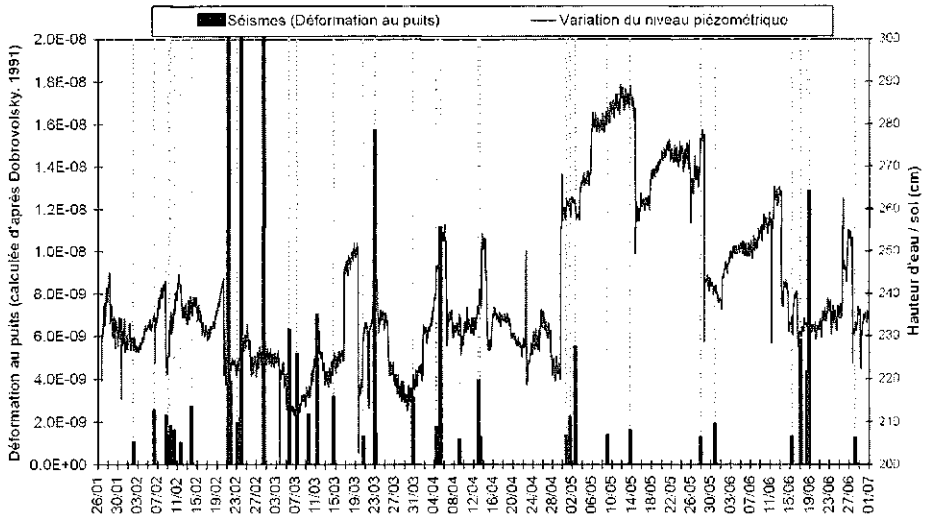
avec  $\alpha$  = module de compressibilité du milieu ( $\text{Pa}^{-1}$ ).

La pression atmosphérique étant déjà exprimée en mètres d'eau, cette efficacité barométrique correspond à la pente des droites de corrélation linéaire, et est comprise entre 0.61 et 0.74 (Fig. 5). En prenant une valeur intermédiaire de  $BE = 0.65$ , nous pouvons estimer un coefficient d'emmagasinement  $S$  égal à  $1.4 \times 10^{-5}$ , en l'absence d'essai par pompage.

### Première approche de l'étude de l'influence éventuelle des séismes sur Trapeza

Des fluctuations brutales sont observables sur le forage de Trapeza. Importantes (plusieurs dizaines de cm) et instantanées (en moins de 3 h), elles ne peuvent être provoquées ni par les marées terrestres ( $\Delta H_{\text{max}} = 6 \text{ cm}$ ), ni par la pression atmosphérique ( $\Delta H_{\text{max}} = 10 \text{ cm}$ , réponse sur plusieurs jours), ni par les précipitations qui ne peuvent s'infiltrer en 3 h! Aussi avons-nous réalisé une première mise en regard des variations du niveau piézométrique de Trapeza avec l'occurrence des séismes locaux (Fig. 6). Ces séismes provoquent au puits une déformation qui dépend de la distance et de la magnitude du séisme, pouvant être définie par (Dobrovolsky, 1991):  $\varepsilon = ((10^{0.5M} - 3.06)/D)^3$  où  $M$  = magnitude du séisme et  $D$  = distance séisme-puits.

Seuls les séismes provoquant une déformation élastique au puits supérieure à  $10^{-9}$  ont été retenus. La plupart des variations brutales du niveau piézométrique semblent se produire en même temps qu'un séisme mais tous les séismes répertoriés ici n'affectent pas l'aquifère, et toutes les anomalies identifiables ne se produisent pas systématiquement avec un séisme. De plus, l'amplitude des anomalies ne dépend pas de l'amplitude de la déformation d'origine sismique. Cette comparaison, bien qu'illustrative, n'est donc pas suffisante pour être démonstrative d'une relation existante entre séisme et niveau d'eau. Ceci s'explique par le fait que les mécanismes



**Fig. 6** Mise en regard des variations piézométriques au forage de Trapeza avec l'occurrence de séismes locaux exprimés en terme de déformation au puits d'après Dobrovolsky (1991) (les traits en pointillés permettent d'identifier l'intersection niveau piézométrique-occurrence du séisme).

mis en jeu ne sont pas uniques et que la réponse de Trapeza à la déformation crustale n'est pas linéaire: en effet, la déformation liée à l'activité sismique n'est pas toujours élastique, elle peut être cassante (irréversible), et, de plus, la réorganisation des contraintes à l'origine d'un séisme, à l'échelle des failles actives, provoque une répartition non homogène de la déformation. Enfin, cette déformation aura des effets de différents types sur les aquifères, pouvant se surimposer: (a) une déformation volumique de l'aquifère; (b) une déformation aux limites de l'aquifère induisant une modification de perméabilité des zones de failles et permettant ou non des échanges d'eau entre couches aquifères plus ou moins profondes, cet effet étant cependant retardé.

## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'objectif de ce travail était de mettre en place un système de mesure permettant l'identification de signaux hydrologiques éventuellement induits par des déformations d'origine sismique. Pour pouvoir mener à bien une telle étude, il nous a fallu caractériser et identifier les variations de charges hydrauliques sur nos deux puits considérées comme parasites, car d'origine autre que sismique, induites par l'effet de la pression atmosphérique et des marées terrestres. Cependant, l'influence des précipitations n'a pu être réellement étudié pour l'instant, faute d'absence de mesures. L'hétérogénéité des réponses piézométriques déjà observées à Trapeza montre cependant la nécessité d'une étude tectonique et hydrogéologique locale plus précise afin d'identifier les failles pouvant participer à des échanges d'eau entre couches aquifères plus ou moins profondes, et de comprendre comment la déformation d'origine sismique va se propager selon l'hétérogénéité des structures faillées.

**REFERENCES**

- Armijo, R., Meyer, B., King, G. C. P., Rigo, A. & Papanastassiou, D. (1996) Quaternary evolution of the Corinth rift and its implications for the late Cenozoic evolution of the Aegean. *Geophys. J. Int.* **126**, 11–53.
- Dobrovolsky, I. P. (1991) *Mechanika Podgotowki Tectonicheskovo Semletrjasenia* (in Russian). Nauka, Moscow.
- Jacob, C. E. (1940) On the flow of water in an elastic artesian aquifer. *Trans. Am. Geophys. U.* **2**, 574–586.
- Leonardi, V., Arthaud, F., Tovmassian, A. & Karakhanian, A. S. (1997) Relationships between seismic activity and piezometric level changes in the Arax basin (SW Armenia): attempt to a typology of seismically induced piezometric anomalies. *Tectonophysics* **273**, 293–316.
- Roeloffs, E. A. (1988) Hydrological precursors to earthquakes: a review. *Pageoph.* **126**(2–4), 177–209.
- Wenzel, G. (1996) The nanogal software: Earth tide data processing package LTERNA 3.30. *Bulletin d'Information Marees Terrestres, Bruxelles* **124**, 9425–9439.
- Zelilidis, A. (2000) Drainage evolution in a rifted basin, Corinth graben, Greece. *Geomorphology* **35**, 69–85.