

PRÉDICTION DE LA VARIATION DU NIVEAU PIÉZOMÉTRIQUE D'UNE NAPPE ALLUVIALE SOUMISE AU MARNAGE

PREDICTION OF THE PIEZOMETRIC LEVEL'S VARIATION IN AN AQUIFER IN TIDAL RANGE

Matthias FERREIRA¹, Lomig BRONNEC²

¹Directeur grande région Normandie-Bretagne-Pays de Loire Hydrogeotechnique – Comité technique et scientifique Hydrogeotechnique – ZA le Polen – Secteur C1 – 76710 ESLETTES, France

²Ecole et observatoire des Sciences et de la Terre (EOST) - Spécialisation géotechnique – 5 rue René Descartes 67000 STRASBOURG, France

RÉSUMÉ - Le marnage de la Seine génère une variation du niveau de la nappe alluviale associée. Notre expérience locale de suivi piézométrique de cette nappe, couplée aux travaux de Rat et Vautrain (1973) nous a permis de vérifier l'approche analytique de l'évolution de cette nappe. En exploitant ces résultats nous avons pu estimer la perméabilité globale de l'aquifère ainsi que l'amortissement de ce phénomène avec l'éloignement à la Seine.

ABSTRACT – The aquifers in tidal range from the Seine see a variation in their level because of it. Our local piezometric measurements combined with M.RAT work allowed us to confirm that the evolution of this kind of aquifer can be obtained analytically. Using these results, we managed to estimate global permeability in the aquifer, the decay due to the distance with the Seine and the inertia of this variation.

1. Introduction

Depuis la ville du Havre jusqu'au barrage de Poses, la Seine est soumise au marnage. Elle génère un battement continu pluri-métrique de la nappe alluviale associée. Le suivi piézométrique de cette nappe permet d'observer l'influence des coefficients de marée, de la saison et de l'engraissement de la Seine suivant la pluviométrie du moment. Notre expérience locale nous a amené à réaliser un bon nombre de suivis piézométriques à acquisition automatique en bord de Seine. Sur la base des travaux du laboratoire central des Ponts et Chaussées (Rat et Vautrain, 1973), nous avons confirmé l'approche analytique pour prédire l'évolution de la nappe dans des conditions de nappe captive.

En exploitant cette expression analytique, nous avons pu apporter un nouveau regard sur :

- l'estimation de la perméabilité globale de l'aquifère par traitement du suivi piézométrique,
- l'amortissement de ce phénomène avec l'éloignement de la Seine, permettant de fait d'optimiser les niveaux d'eau à retenir en phase chantier et durant la vie de l'ouvrage,
- mais également sur l'inertie de l'aquifère par rapport au signal d'entrée qui est le battement rapide de la Seine.

L'objectif de l'article est de retranscrire ces premiers travaux pour permettre une meilleure prédition des mouvements de nappe à proximité des fleuves soumis au marnage.

2. Mise en équation et corrélations utiles

La modélisation de l'écoulement d'une nappe soumise au marnage est la résultante de deux phénomènes qu'il convient d'identifier. Le premier concerne l'écoulement non permanent lié à l'influence du marnage, alors que le second consiste à traduire le fait que se sont bien les versants qui alimentent le fleuve et non l'inverse. Le second phénomène montre une inertie beaucoup plus importante que le premier phénomène, ce qui revient à considérer celui-ci comme la transcription d'un écoulement permanent.

2.1 Mise en équation de l'écoulement soumis au marnage

Les travaux sur la variation d'une nappe soumise au marnage (Cassan, 2005 ; Rat et Vautrain 1973), donnent une équation différentielle régissant la variation de la hauteur d'eau (h) due à la marée dans une nappe captive ou libre :

$$\frac{T}{S} \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

Avec :

- h la différence de hauteur d'eau dans la nappe due à la marée
- T la transmissivité du milieu
- S le coefficient d'emmagasinement global.

Notons ici que dans le cas d'une nappe libre, le coefficient d'emmagasinement est égal à la porosité efficace des matériaux constituants l'aquifère.

On a donc une équation de type diffusive avec une entrée oscillante :

$$h(0, t) = h_0 e^{-i\omega t} \quad (2)$$

avec :

$$\omega = \frac{2 \times \pi}{t_0} \quad (3)$$

- t_0 étant la période des oscillations.
- h_0 étant la demi-amplitude de la variation du niveau du fleuve à $x=0$

Cette entrée oscillante est la traduction de la variation du niveau du fleuve due au phénomène de marée, on a donc une période t_0 de environ 12h40min (approximation du temps entre deux marées hautes).

La solution de cette équation est de la forme suivante (Rat et Vautrain, 1973) :

$$h(x, t) = h_0 e^{-x \sqrt{\frac{\omega \times S}{T}}} \sin(\omega t - x \sqrt{\frac{\omega \times S}{T}}) \quad (4)$$

L'exponentielle traduit la décroissance selon x , et le sinus la périodicité selon t , plus on s'éloigne du fleuve plus l'influence du marnage est faible, ce qui est cohérent. Notons la présence d'une variable x dans le sinus qui crée un déphasage en fonction de la distance.

2.2 Intégration de l'effet de l'écoulement permanent issu des versants

La solution présentée précédemment n'est pas complète et ne permet pas d'intégrer une condition aux limites qui traduit le fait que ce sont bien les versants autour du fleuve qui l'alimentent et non seulement le fleuve qui alimente la nappe alluviale (Lefebvre et al., 1993). Pour corriger cela, nous suggérons donc d'intégrer un terme complémentaire issu de la parabole de Dupuits (Plumelle et al., 2013) qui décrit la surface piézométrique dans la zone d'influence du marnage. Notons ici que nous faisons l'hypothèse qu'en s'éloignant du fleuve que la nappe passe de captive à semi-captive puis à libre par effet du dépôt lenticulaire. La solution de Dupuits constitue une simplification qui permet de traduire la ligne directrice que suit la nappe et notamment d'intégrer le caractère constant de la piézométrie (en comparaison du marnage) au delà de la zone d'influence du fleuve.

$$h(x) = \sqrt{\frac{(h_\infty^2 - h_0^2)x}{L} + h_0^2} \quad (5)$$

avec :

- h_∞ : la hauteur piézométrique située en dehors de la zone d'influence du marnage
- L : distance à partir de laquelle l'influence du marnage est négligeable

Finalement, on obtient une solution de la forme suivante :

$$h(x,t) = h_0 e^{-x\sqrt{\frac{\omega \times S}{T}}} \sin(\omega t - x\sqrt{\frac{\omega \times S}{T}}) + \sqrt{\frac{(h_\infty^2 - h_0^2)x}{L} + h_0^2} \quad (6)$$

Cette solution reste valable pour le cas d'une nappe libre, le coefficient d'emmagasinement étant alors égal à la porosité efficace. Notons également que dans le cadre d'une analyse à proximité du fleuve le terme final peut être pris égal à h_0 .

2.3 Décomposition de la solution dans le cas d'une nappe captive

Nous proposons ci-après quelques décompositions et corrélations pour permettre une interprétation plus facile des solutions analytiques présentées ci-avant. En premier lieu, pour le cas d'un sol compressible, la compressibilité de l'eau devient négligeable et il vient pour une nappe captive (Rat et Vautrain, 1973 ; Cassan, 2005) :

$$\frac{T}{S} = C_v \quad (7)$$

$$S = H \cdot \gamma_w \cdot (m_v + n\beta) \approx H \cdot \gamma_w \cdot m_v \approx \frac{H \cdot \gamma_w}{E_{oed}} \quad (8)$$

avec :

- C_v : Coefficient de consolidation des sols
- m_v : coefficient de compressibilité volumétrique
- β : compressibilité de l'eau (négligée dans ce cas)
- n : porosité des matériaux

De l'équation (8), on obtient :

$$E_{oed} = \frac{1-\nu}{(1-2\nu)(1+\nu)} E_y = \frac{1-\nu}{(1-2\nu)(1+\nu)} \cdot \frac{E_M}{\alpha} \quad (9)$$

avec :

- ν : Coefficient de poisson
- E_y : module de Young
- E_M : module de Ménard
- α : coefficient rhéologique

Soit :

$$\frac{S}{T} = \frac{H \cdot \gamma_w}{E_{oed}} \cdot \frac{1}{k_x \cdot H} = \frac{(1-2\nu)(1+\nu)\alpha}{k_x(1-\nu)E_M} \quad (10)$$

En prenant $\nu=0,3$, on obtient :

$$\frac{S}{T} = \frac{H \cdot \gamma_w}{E_{oed}} \cdot \frac{1}{k_x \cdot H} = 0,74 \times \frac{\alpha}{k_x \cdot E_M} \quad (11)$$

Cette dernière équation (11) relie la solution de l'équation différentielle à des paramètres que l'on retrouve usuellement dans une campagne géotechnique, à savoir le coefficient rhéologique et le module de Ménard. Dans cette configuration, seule la perméabilité devient une inconnue (étant entendu que les deux paramètres précédents sont déterminés par ailleurs).

2.4 Corrélations utiles dans le cas d'une nappe libre

Nous avons vu précédemment que dans le cas d'une nappe libre, l'équation (1) et sa solution (6) restaient valables. La différence étant que dans le cas d'une nappe libre, le coefficient d'emmagasinement est théoriquement égal à la porosité efficace notée n_{eff} (Cassan, 2005). C'est la porosité qui est occupée par de l'eau pouvant s'écouler par la seule action de la gravité. Elle est définie comme le volume d'eau s'écoulant par gravité sur le volume total. Certains travaux (Gress, 2012) permettent également d'approcher ce paramètre :

$$\begin{cases} \frac{w_{RET}}{w_{SAT}} = \frac{w_L}{w_L + 0.05} \\ e_{eff} = \frac{\rho_s}{\rho_d} (w_{SAT} - w_{RET}) \end{cases} \Rightarrow n_{eff} = \frac{e_{eff}}{1+e_{eff}} \quad (12)$$

On relie ainsi la porosité efficace à des données géotechniques usuelles.

3. Application sur un suivi piézométrique sur les quais de Seine à Rouen (76)

3.1 Présentation du contexte et du suivi piézométrique

Nous avons choisi d'étudier un cas à Rouen (France, 76) où nous bénéficions de deux suivis automatiques sur deux piézomètres situés respectivement à 30m et 270m environ de la Seine (confère figure 1). Le premier ouvrage, situé à proximité immédiate du fleuve

retranscrit directement le battement de la Seine et on retrouve un signal sinusoïdal cohérent avec les travaux cités ci-avant. En revanche, le second ouvrage, beaucoup plus éloigné, ne présente aucun battement que l'on pourrait relier au marnage. On peut considérer son niveau comme constant sur une échelle de temps de plusieurs jours.



Figure 1 : plan de localisation des piézomètres

Le suivi a été réalisé avec des sondes d'acquisition automatique avec prise de mesure toutes les 15 minutes. Afin de faciliter la lecture, nous n'avons présenté les valeurs que sur 48h. La figure 2 ci-après présente les résultats de ce suivi. Le piézomètre PZ1, situé à proximité de la Seine, présente un battement pluri-métrique, avec une amplitude de 2m. Notons que cette amplitude sera directement fonction des coefficients de marée. Pour de forts coefficients, l'amplitude entre les mortes-eaux et les vives-eaux sera accentuée. Les mesures présentées ci-après, de juin 2017, ont été prises lors d'un coefficient de marée moyen de 76, ce qui traduit une amplitude moyenne entre les mortes-eaux et les vives-eaux.

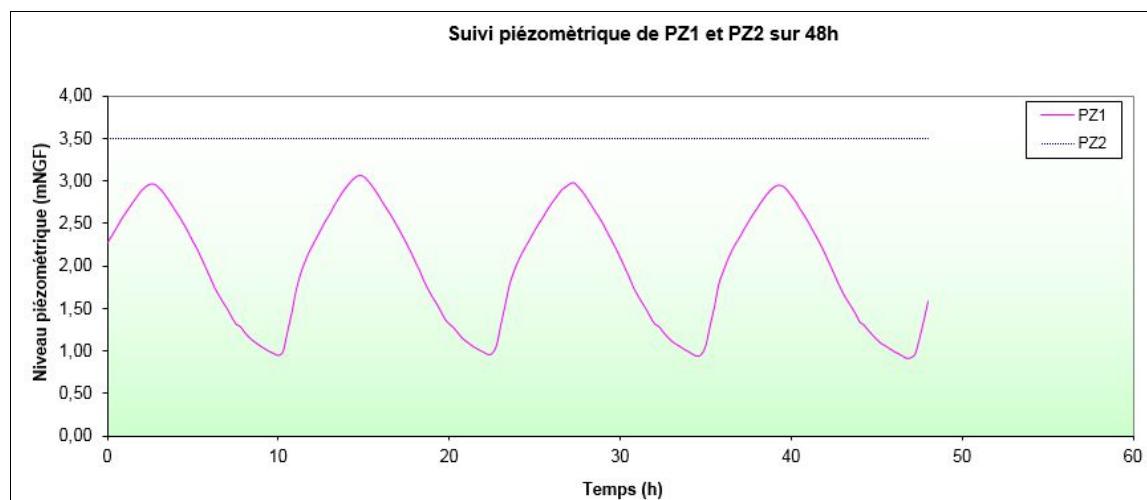


Figure 2 : Résultats du suivi piézométrique sur 48h pour PZ1 et PZ2

En ce qui concerne la lithologie, le sondage carotté réalisé pour équiper PZ1 a mis en évidence la coupe lithologique suivante :

- Remblais anthropiques sur 2 à 3m d'épaisseur,
- puis des alluvions fines classées A1/A2 au sens du GTR jusque 7m de profondeur,
- sous-jacent, un sable fin classé B5 au sens du GTR, reposant sur un substratum marno-calcaire.

Le piézomètre est crépiné sur la hauteur des sables fins. La coupe lithologique nous permet de supposer que les sables fins sont probablement captifs ou semi-captifs sous les alluvions fines.

3.2 Expression analytique

Nous rappelons la forme de la solution analytique :

$$h(x,t) = h_0 e^{-x \sqrt{\frac{\omega \times S}{T}}} \sin(\omega t - x \sqrt{\frac{\omega \times S}{T}}) + \sqrt{\frac{(h_\infty^2 - h_0^2)x}{L} + h_0^2} \quad (6)$$

Dans cette expression, certains paramètres sont fixés (soit par critère géométrique, soit par corrélation) alors que d'autres demandent un recalage par rapport au signal d'entrée analysé. Dans l'exemple d'application, nous avons :

- $E_{M,k} = 20,0 \text{ MPa}$ et $\alpha = 0,5 \rightarrow \frac{S}{T} = 0,74 \times \frac{\alpha}{k_x \cdot E_M} = 1,85 \cdot 10^{-5} \times \frac{1}{k_x}$
- $h_\infty = 3,5 \text{ m NGF}$
- $L = 270 \text{ m}$
- $x = 30 \text{ m}$
- $\omega = \frac{2 \times \pi}{t_0} = \frac{2 \times \pi}{12 \times 3600} = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$

Les inconnues restantes sont donc k_x (perméabilité horizontale) et h_0 , la demi-amplitude de la variation du niveau du fleuve à $x=0$. Ce dernier paramètre sera recalé par rapport au signal d'entrée par dichotomie en démarrant par la valeur moyenne à x . En effet, on gardera à l'esprit que le paramètre h_0 permet dans l'équation de centrer le signal sinusoïdal sur le signal mesuré. Si ce paramètre est sur-estimé ou sous-estimé, l'expression analytique se translate alors par rapport aux mesures réalisées. Une fois, le paramètre calé, il est aisément de faire un test en imposant $x=0$ et de vérifier que le signal obtenu est compatible avec la variation réelle du fleuve. Dans notre exemple d'application, le paramètre h_0 est calé à 1,7mNGF.

Dans ces conditions, seule la perméabilité horizontale devient l'inconnue de l'équation. Le calage de ce dernier paramètre nous permettra alors de faire coïncider le modèle. Dans notre exemple d'application, un calage de la perméabilité à $5 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ permet d'obtenir un calage satisfaisant (confère figure 3).

On illustre sur cette figure l'importance d'intégrer la solution de Dupuits à la solution simple de l'équation d'onde, pour donner à la solution sinusoïdale la ligne directrice qui tend vers la piézométrie constante hors zone d'influence.

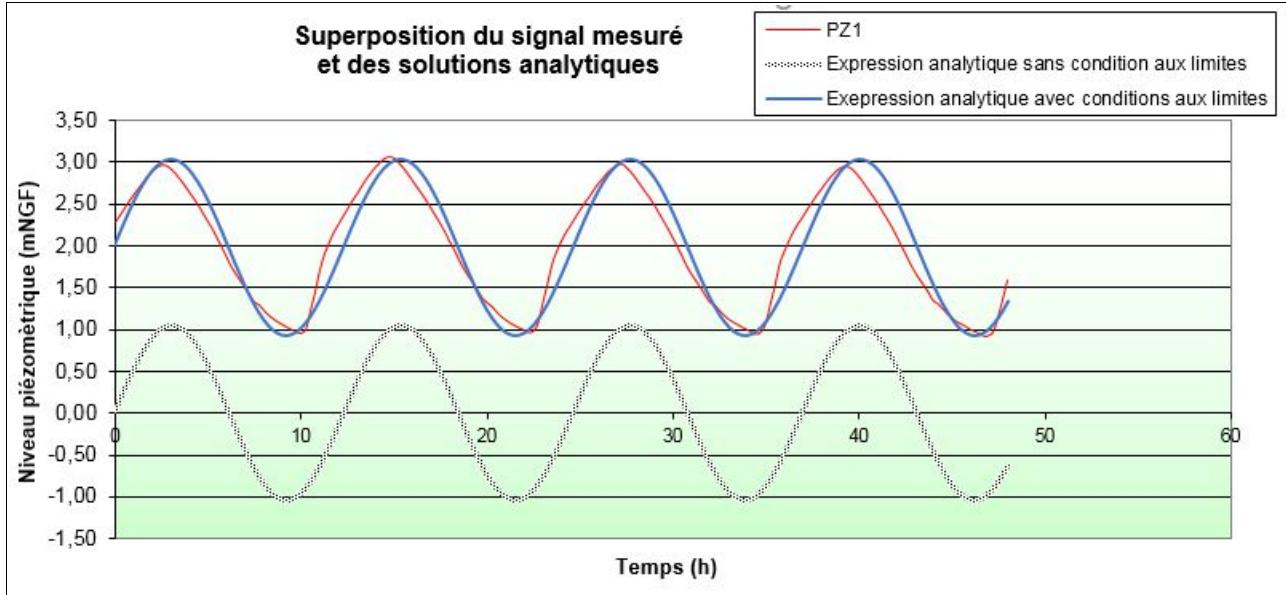


Figure 3 : comparaison entre le signal mesuré et la solution analytique

3.3 Exploitation du modèle

Si on modélise la solution analytique pour x égal 1m, 30m et 100m, on observe sur la figure 4, le déphasage avec l'éloignement du fleuve. Ainsi entre les vives-eaux à $x = 1\text{m}$ et les vives-eaux à $x = 100\text{m}$, on observe un décalage de 3h15. On observe également sur le graphe que le signal tend vers la condition aux limites, à savoir une piézométrie constante calée sur la mesure que l'on a sur PZ2, à savoir 3,5mNGF.

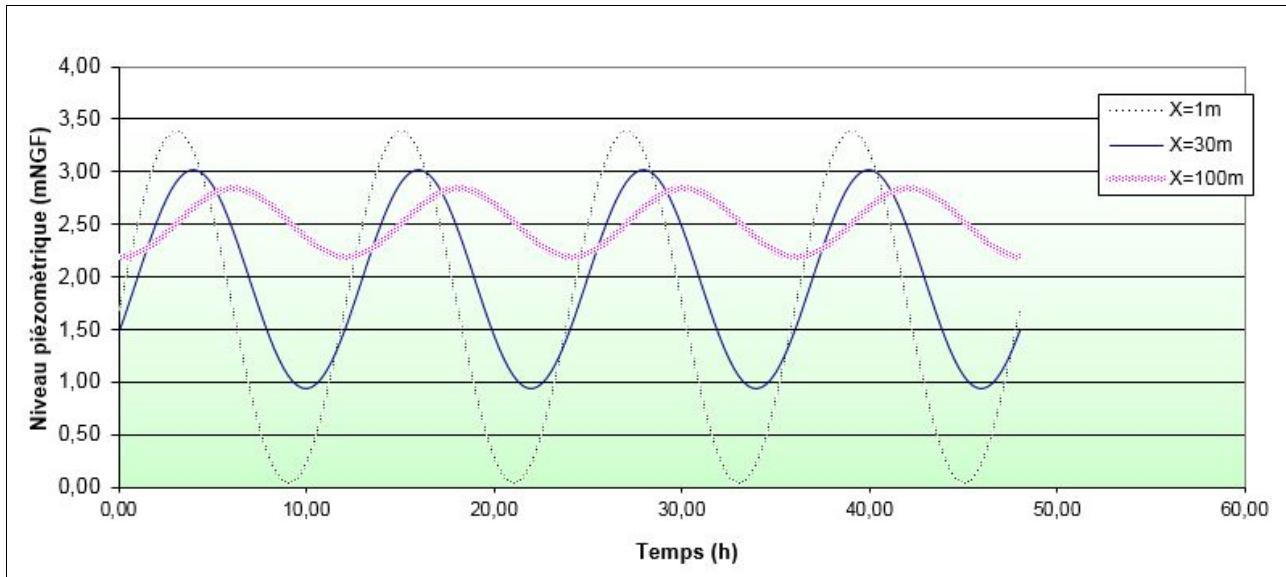


Figure 4 : déphasage du signal avec l'éloignement du fleuve

On peut également à partir du modèle déduire l'amortissement du phénomène avec l'éloignement du fleuve (Rat et Vautrain, 1973), ce qui est illustré sur la figure 5. Cet amortissement est régi par la formule suivante :

$$\lambda = e^{-x \sqrt{\frac{\pi \cdot S}{t_0 \cdot T}}} \quad (13)$$

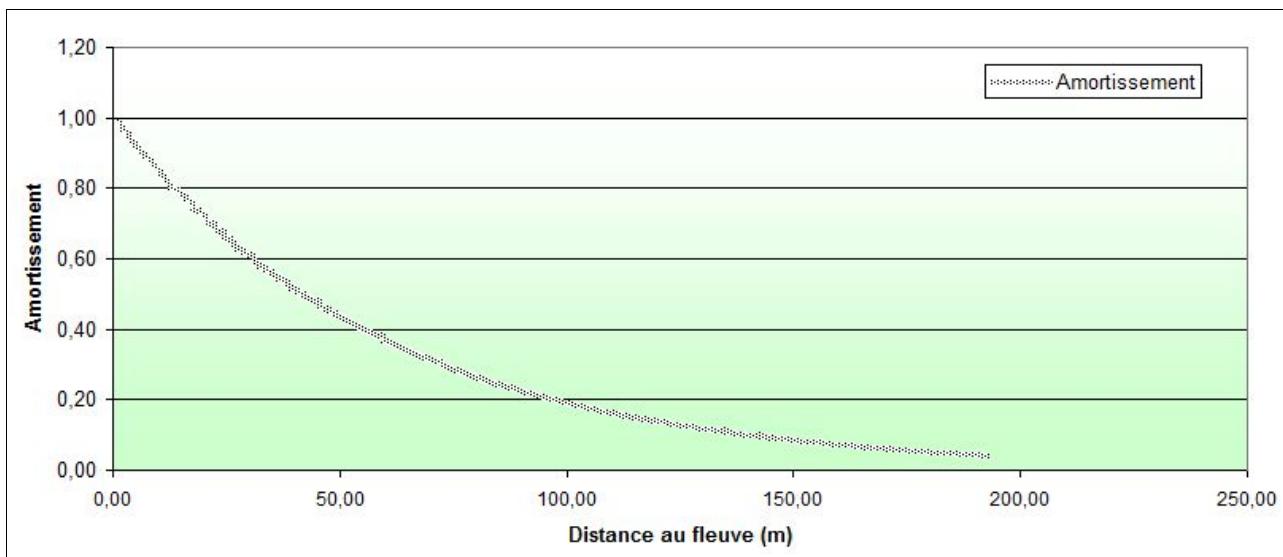


Figure 5 : amortissement du signal avec l'éloignement du fleuve

On retrouve bien qu'à plus de 200m, il y a moins de 5% de l'effet du marnage qui se fait sentir, ce qui est cohérent avec nos mesures de PZ2 situé à 270m environ du fleuve.

4. Conclusions et ouvertures :

Les travaux réalisés nous ont permis de confirmer qu'une approche analytique permettait d'obtenir des valeurs satisfaisantes de la variation d'une nappe soumise au marnage. Nous sommes également parvenu à la conclusion qu'une approche par mesure piézométrique permettait de trouver la perméabilité en grand de l'aquifère mais également le domaine d'influence du marnage.

De nombreux développements et analyses sont encore à faire. Cette première approche considère comme constante la piézométrie en dehors de la zone d'influence du marnage. Or on sait qu'il s'agit, sur une échelle de temps bien plus longue que le marnage, d'une donnée variable fonction de la pluviométrie et de l'engrangement de l'aquifère.

Également, il serait intéressant d'établir un modèle permettant de prédire l'amplitude du marnage en s'éloignant de l'estuaire (fonction des coefficients de marée, du débit de la Seine,...), ce qui permettrait de calculer analytiquement la demi-amplitude h_0 du modèle présenté ci-dessus.

Références bibliographiques :

- Cassan M. (2005) Les essais de perméabilité sur site dans la reconnaissance des sols – Presses des ponts et chaussées – pp 287, pp353 – 356.
- Gress J.C. (2012) Corrélations nouvelles pour améliorer la pertinence du diagnostic géotechnique. JNGG Bordeaux, France.
- Lefebvre D. et al. (1993) Nappe captive et sous-écoulements : le rôle des alluvions en Basse Seine – Quaternaire, 4 – pp 103-110.
- Plumelle et al. (2013) Théorie et pratique de la géotechnique – Le Moniteur – pp 598.
- Rat M. et Vautrain J (1973) Détermination des caractéristiques hydrauliques des sols à partir des variations piézométriques – Bulletin de liaison du laboratoire des Ponts et Chaussées – pp 103-119.