



Étude par éléments finis de la propagation d'une onde de pression sinusoïdale dans un aquifère à nappe captive

Dufour, Marc

Ecole Polytechnique, Montréal, Québec, Canada

Chapuis, Robert P.

Ecole Polytechnique, Montréal, Québec, Canada

RÉSUMÉ

Les caractéristiques d'un aquifère peuvent être obtenues par essais de pompage ou par étude de la propagation d'ondes naturelles telles que la marée, dans le cas des aquifères côtiers seulement. Nous proposons d'étendre cette méthode à tout aquifère, en créant une onde sinusoïdale dans le puits et en mesurant le déphasage et la variation d'amplitude dans des piézomètres. Ce type d'essai ne donne que la diffusivité de l'aquifère. Une solution théorique existe pour l'aquifère idéal à nappe captive. Cet article présente les résultats obtenus par éléments finis et établit les limites d'utilisation de l'essai. On a vérifié que l'atténuation de l'amplitude et le déphasage permettent, en problème inverse traité avec Mathematica, de déterminer la diffusivité de l'aquifère. De plus, on propose une solution graphique.

ABSTRACT

The characteristics of an aquifer can be obtained either using pumping tests or studying natural wave propagation such as tide, in the case of coastal aquifers only. We propose to extend this method to any aquifer by creating a sinusoidal wave in a pumping well and by measuring the phase difference and amplitude attenuation in monitoring wells. This type of test provides only the aquifer diffusivity. There is a theoretical solution for the ideal confined aquifer. This paper presents results obtained using the finite element method and establishes the working limits of the test. It has been verified that the amplitude attenuation and phase difference provide the aquifer diffusivity by solving the inverse problem with Mathematica. In addition, a graphical solution is proposed.

1 INTRODUCTION

La détermination des paramètres hydrodynamiques à partir des essais de pompage est basée sur la stationnarité des charges hydrauliques dans l'aquifère avant et longtemps après le pompage. Cependant, même si cette approximation peut être considérée comme valable dans la plupart des cas, il est important dans certaines configurations de tenir compte des variations naturelles du niveau piézométrique. Dans les aquifères côtiers, il existe une relation dynamique entre l'eau de mer et la nappe phréatique, entraînant une variation de la charge dans l'aquifère, due aux vagues et à la marée. On peut aussi citer l'incidence barométrique et les marées terrestres, comme phénomènes impliqués dans la variation de la charge hydraulique. Ainsi, lors d'essais dans de telles zones, il sera important, avant de commencer l'essai et pendant toute sa durée, d'évaluer ces évolutions dues aux phénomènes naturels, afin d'en tenir compte au moment de l'interprétation des essais de pompage.

Il est aussi possible d'utiliser directement les variations liées aux phénomènes naturels pour identifier les caractéristiques hydrauliques du milieu souterrain. L'idée est alors d'analyser dans plusieurs puits le phénomène de propagation d'onde naturelle dans l'aquifère. En faisant varier les paramètres des modèles et en supposant que les ondes sont sinusoïdales, il est

alors possible de déterminer des solutions théoriques proches de cas réels.

Le principe consiste alors à imposer un régime forcé sinusoïdal au niveau du puits, et, comme dans le cas des ondes naturelles, de mesurer le déphasage et la variation d'amplitude de la charge dans des piézomètres. Cela permet d'imposer une onde de fréquence et d'amplitude connue, et de s'adapter aux paramètres de l'aquifère. Cependant, cette approche nécessite, comme dans le cas de la marée, de connaître une solution théorique des équations du problème.

2 ÉTAT DES CONNAISSANCES

Dès 1877, Boussinesq a signalé que les problèmes d'écoulement souterrain en condition saturée peuvent être décrits par similarité. De Cazenove (1950) a étendu la méthode aux cas simples d'aquifères côtiers soumis à des marées sinusoïdales et en présentant des applications pratiques. L'étude est alors basée sur la résolution de l'équation de diffusion, la solution étant fonction des conditions aux limites et des conditions initiales. Les études se sont ensuite diversifiées afin de tenir compte des différentes configurations naturelles d'un système d'aquifère, l'étude de Xia et Li (2007) proposant la solution plus générale.

Sur le même principe, les quelques études menées sur la propagation d'une onde sinusoïdale forcée ont permis d'obtenir les solutions théoriques, dans l'état permanent en supposant que l'onde garde une forme

sinusoïdale (Townley 1995) ou que le puits a un diamètre nul et que l'on peut négliger la partie non périodique du début de l'expérience (Rasmussen 2003). Dans cette dernière étude, un essai sur un système d'aquifères a été mis en place. Les résultats obtenus par cette méthode sont comparables à ceux des essais conventionnels en aquifère à nappe captive, alors qu'en aquifère à nappe libre, l'emménagement est très différent.

2.1 Théorie

Afin d'étendre les études précédentes, Saucier et al. (2009) ont résolu l'équation de diffusion en prenant en compte le rayon du puits. L'équation différentielle du problème est :

$$\nabla^2 h = \frac{S_s}{K} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

avec h , la charge hydraulique (m), S_s l'emménagement spécifique (m^{-1}), K la conductivité hydraulique saturée (m/s) et t le temps. Le rapport K/S_s est appelé diffusivité D . Dans le cas d'une propagation radiale 2D, à partir d'un puits cylindrique de rayon r_0 , dans un domaine infini et homogène, les conditions aux limites sont :

$$\begin{aligned} h(r, t) &= 0, & t \leq 0, & r_0 \leq r < \infty, \\ h(r_0, t) &= h_0 \sin(\omega t), & t \geq 0, & \\ h(\infty, t) &= 0, & t \geq 0 & \end{aligned} \quad (2)$$

avec h_0 et ω , l'amplitude et la fréquence angulaire de la perturbation. Afin de simplifier l'expression de la solution, on introduit les paramètres $\rho = r/r_0$, $\theta = Dt/r_0^2$ et $w = \omega r_0^2/D$.

Le système d'équations a été résolu par Saucier et al (2009) en utilisant les transformées de Laplace. On ne présente ici que la forme générale des solutions :

$$h(\rho, \theta) = \varepsilon(\rho, \theta) - R_1(\rho) \cos(w\theta) + R_2(\rho) \sin(w\theta) \quad (3)$$

avec ε , R_1 et R_2 fonctions de ρ et w . La solution montre que le comportement de l'onde varie linéairement en fonction de l'amplitude de l'onde au niveau du puits, et varie en fonction du rapport ω/D (équivalent à t_0/D). La solution peut être scindée en une partie transitoire ($\varepsilon(\rho, \theta)$

qui tend vers 0 lorsque θ tend vers l'infini) et une partie stationnaire dont le comportement est sinusoïdal.

Dans la mesure où la réponse de l'aquifère à la sollicitation sinusoïdale varie en fonction du produit t_0/D , dans la suite de l'étude, les comparaisons seront présentées uniquement à partir de t_0/D .

3 MODÉLISATION NUMÉRIQUE

Le modèle décrit par les équations (1) et (2) a été simulé numériquement en utilisant le logiciel d'éléments finis SEEP/W (Geo-Slope International Ltd. 2003). Les capacités de ce logiciel ont été examinées en détail par Chapuis et al. (2001). Ce code numérique utilise les courbes caractéristiques du sol, c'est-à-dire $K(u_w)$ et $\theta(u_w)$, où K est la conductivité hydraulique, u_w la pression interstitielle et θ la teneur en eau volumique du sol. Ainsi, les équations différentielles complètes sont résolues à la fois pour les sols saturés et non saturés, sans faire d'hypothèses.

Le maillage est choisi de manière à limiter le temps de calcul et obtenir des résultats précis. L'aquifère est alors représenté par une couche d'épaisseur 5 m et d'une longueur de 4000 mètres depuis le plan vertical du puits. Le rayon du puits est de 0,15 m et le modèle est pris axisymétrique. Pour la simulation, une longueur de 4000 m a été choisie afin de modéliser la condition de charge nulle à l'infini (on considère que la limite à droite peut être considérée comme infinie lorsque 15 X rayon d'influence < longueur totale du modèle).

La grille d'éléments finis est telle que les premiers éléments ont une taille inférieure au rayon du puits, leur taille augmentant ensuite progressivement. Des éléments finis de taille plus petite permettent d'obtenir de meilleurs résultats d'analyse près du puits (Figure 1).

Les quatre paramètres variables de l'étude sont la conductivité hydraulique, l'emménagement spécifique de l'aquifère, la phase et l'amplitude de l'onde dans le puits. Afin de travailler dans des conditions réalisables in situ, la période de l'onde ne sera jamais prise supérieure à 3600 s, les paramètres de l'aquifère seront choisis pour correspondre aux cas usuels d'aquifère à nappe captive

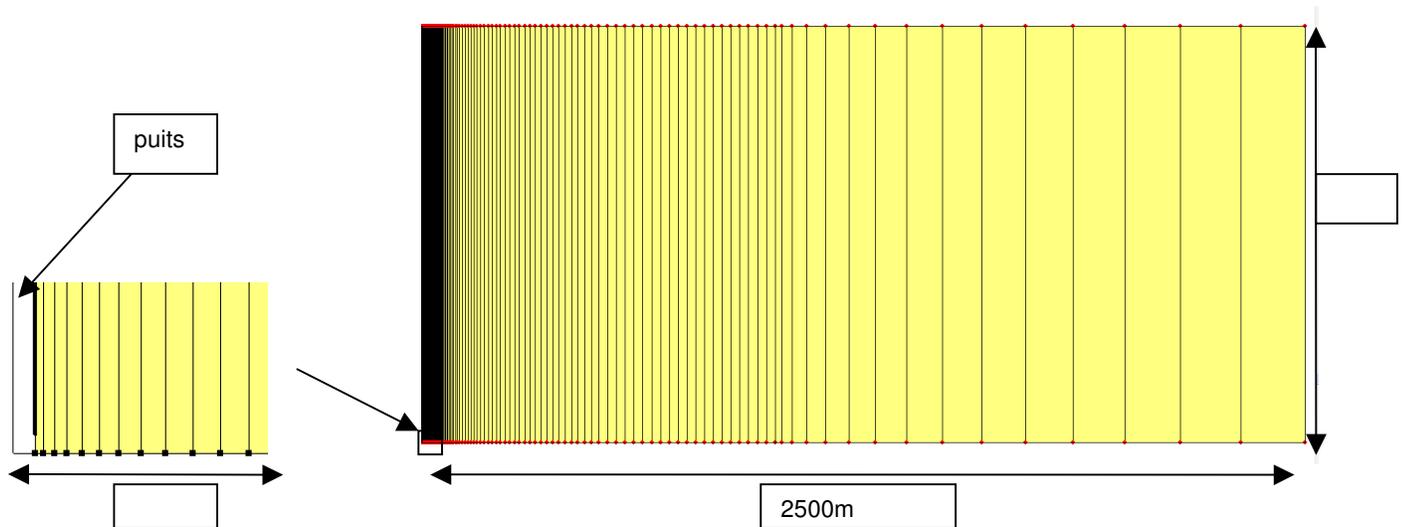


Figure 1 . Maillage utilisé dans le modèle et détail de la zone autour du puits

Concernant les conditions initiales, une charge hydraulique de 2 m est appliquée sur tous les nœuds. Le gradient d'écoulement est alors nul au temps zéro. Pour la phase transitoire, les conditions aux frontières sont choisies telles qu'elles satisfont le système (2) : charge nulle en $r = 4000$ m, une charge hydraulique fluctuant de forme sinusoïdale au niveau du puits et une frontière imperméable de part et d'autre de l'aquifère.

3.1 Présentation des résultats

A partir des simulations, il est possible d'obtenir l'évolution de la charge à chaque nœud du maillage. Il est alors possible de tracer l'évolution de la charge en fonction du temps et de la distance. Les Figure 2 et 3 présentent les résultats obtenus sous SEEP, avec les paramètres suivants : $K = 5 \times 10^{-3}$ m/s, $S_s = 8 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$, et $t_0 = 300$ s.

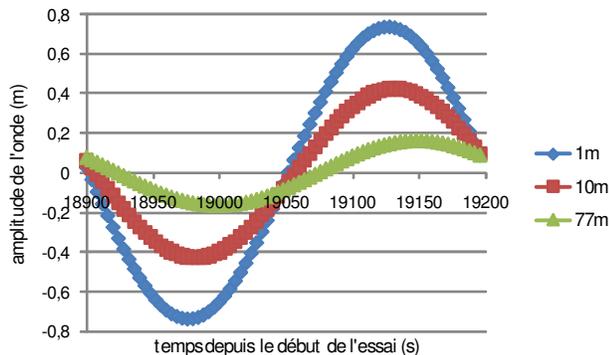


Figure 2 . Évolution de la charge en fonction du temps.

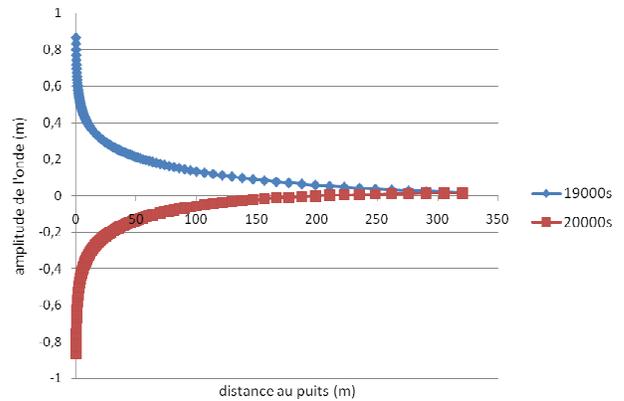


Figure 3 . Évolution de l'amplitude en fonction de la distance au puits

Il est possible de visualiser le déphasage et la diminution de l'amplitude lorsqu'on s'éloigne du puits. Les courbes restent cependant des sinusoïdes, de la même forme que le signal d'entrée, dans lesquelles il faudrait prendre en compte le déphasage et l'atténuation d'amplitude. Au niveau des piézomètres, l'évolution de la charge est alors de la forme

$$h = A \sin\left(\frac{2\pi}{t_0}(t - t_{lag})\right) \quad (4)$$

avec A l'amplitude à une distance donnée et t_{lag} , le temps de retard. Il est alors possible de déterminer simplement la valeur de l'amplitude et du temps de retard de l'onde à chacun des nœuds du modèle.

3.2 Phases transitoire et stationnaire

Comme présenté dans l'article de Saucier et al. (2009), la solution présente 2 phases : transitoire et stationnaire, la partie transitoire tendant vers 0 lorsque le temps augmente. On cherche alors à obtenir le nombre de périodes nécessaires pour que l'onde atteigne cet état stationnaire, à une certaine distance du puits.

Pour visualiser ces deux tendances, on utilise la différence totale sur les 75 pas de temps qui composent une période, entre la charge aux temps proches du début du pompage, et celle à un temps infini. Pour la comparaison, on suppose qu'après 65 périodes, l'état stationnaire est atteint et correspond au temps infini. La Figure 4 présente cette différence en fonction du nombre de périodes depuis le début du pompage pour 3 distances ($r = 1 \text{ m}$, $r = 5 \text{ m}$ et $r = 10 \text{ m}$). La valeur des paramètres sont : $K=5^e-4\text{m/s}$, $S_s=8^e-5\text{m}^{-1}$ et $t_0=300\text{s}$.

Le critère de validation de l'état stationnaire est vérifié pour une période. Il est choisi tel que la somme des différences de charge sur l'ensemble de chaque période soit inférieure à 7.5 cm. Dans la mesure où chaque période est subdivisée en 75 points, cela représente 1 mm de différence pour chaque mesure.

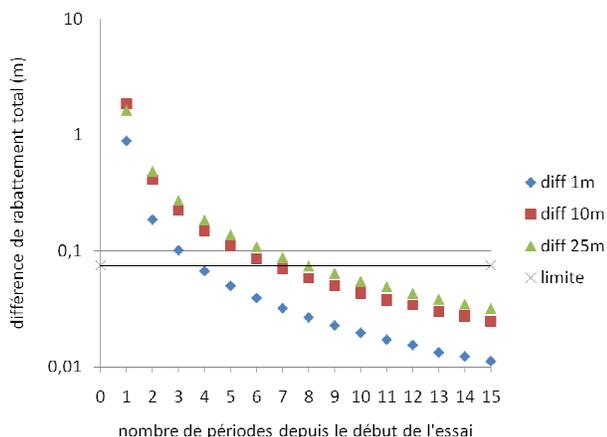


Figure 4 : différence de rabattement pour les premières périodes

Le comportement des courbes montrent que l'onde tend vers l'état stationnaire lorsque le nombre de périodes depuis le début de l'essai augmente, ce que montrait la solution (3). L'onde tend vers l'état stationnaire rapidement, car après seulement 3 périodes, soit 900 s, le critère est atteint à 1 m du puits. À 10 m, il faut attendre 6 périodes et à 25 m, 7 périodes. Ainsi, le nombre de périodes pour atteindre le critère de validation varie en fonction de la distance du piézomètre au puits.

De plus la différence dans les premières périodes est faible car la somme des différences est au maximum de 2 m pour la 1^{ère} période. Ainsi, l'évolution de la charge pendant la 1^{ère} période pourra être utilisée afin d'estimer si les paramètres de l'onde sont adaptés à l'aquifère (amplitude ou phase trop faibles).

Les autres paramètres de l'étude (la diffusivité de l'aquifère, la période et l'amplitude de l'onde) ont aussi de l'influence. Le Tableau 1 présente le nombre de périodes à atteindre afin d'obtenir l'état stationnaire, en fonction du paramètre $t_0 D$.

Dt_0	1 m	10 m	25 m	50 m
1875	4	7	7	
3750	4	7	7	8
11250	3	6	6	7
18750	3	6	6	7

Tableau 1. Nombre de périodes nécessaire pour atteindre l'état stationnaire en fonction de la distance au puits et du facteur Dt_0

Le nombre de périodes est toujours inférieur à 8 pour les cas usuels d'aquifère, et varie peu lorsque le facteur Dt_0 augmente. L'utilisation d'une onde sinusoïdale peut donc être un moyen rapide de déterminer la diffusivité d'un aquifère, surtout si les piézomètres sont proches du puits.

A partir de la solution théorique, Saucier et al. (2009) déterminent que l'on peut considérer que la partie transitoire de l'onde représente moins de 1% de cette onde après 5 périodes, et moins de 1%, comme on le considère ici, après 50 périodes, quelle que soit la distance au puits et les paramètres de l'onde et de l'aquifère.

Dans la suite de l'étude, on travaillera toujours sur la phase stationnaire des solutions, car elle constitue la partie exploitable des essais de terrain. Les résultats des simulations seront pris loin du début de l'essai (63 périodes).

3.3 Variations en fonction de la diffusivité

Selon la solution sans dimensions de Saucier et al. (2009), la valeur de la charge à un temps et une distance donnés ne dépend que de la diffusivité D . Les Figure 5 et 6 montrent pour plusieurs cas l'évolution du rapport d'amplitude $h(t)/h_0$ et du déphasage pour des aquifères ayant différentes conductivités hydrauliques et différents emmagasineurs spécifiques, mais la même diffusivité.

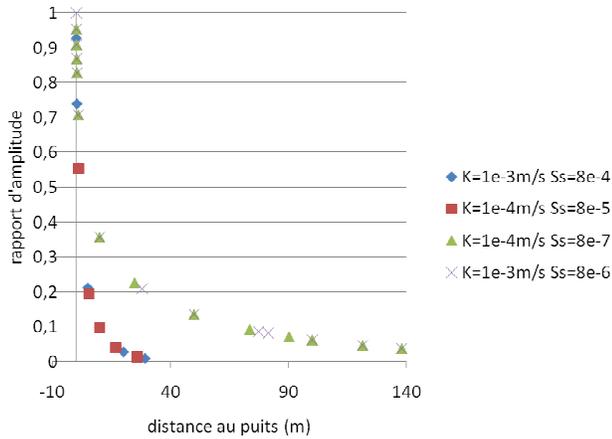


Figure 5. Évolution du rapport d'amplitude en fonction de la distance au puits.

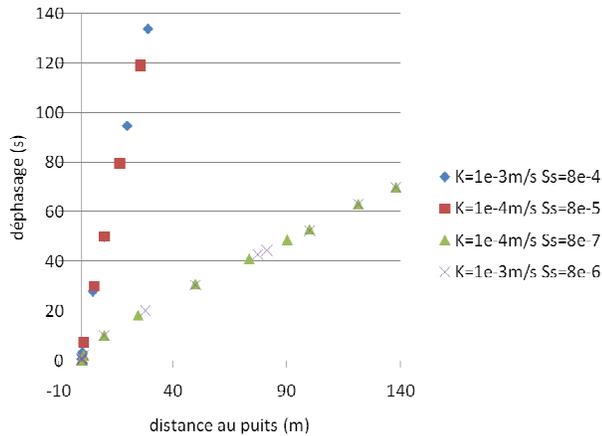


Figure 6. Évolution du déphasage en fonction de la distance au puits.

On remarque que lorsque $D = 1.25$ ou $D = 125$, les évolutions de l'amplitude et du déphasage sont identiques lorsque la diffusivité est identique. Ce résultat découle directement de la forme de l'équation différentielle.

3.4 Évolution du comportement en fonction des paramètres

Le comportement des ondes est fonction de 3 paramètres, D , a et ω . La diffusivité est imposée par le domaine d'étude et est a priori inconnue, tandis que la phase et l'amplitude sont imposées par l'opérateur. Les figures 7, 8 et 9 présentent l'évolution de l'onde en fonction du temps lorsqu'un paramètre varie, les autres étant considérés constants.

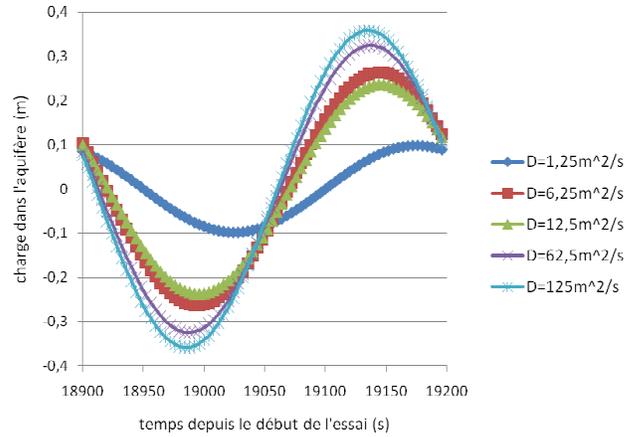


Figure 7. Évolution de la charge dans l'aquifère pour $t_0 = 300$ s et $h_0 = 1$ m.

Lorsque la diffusivité augmente, l'onde s'atténue moins et le déphasage par rapport à l'onde initiale est plus faible. Ceci s'explique par le fait qu'une faible conductivité hydraulique rend plus difficile la propagation de l'onde dans l'aquifère, donc en particulier la variation de la charge alors qu'un faible emmagasinement spécifique empêche l'onde de se disperser.

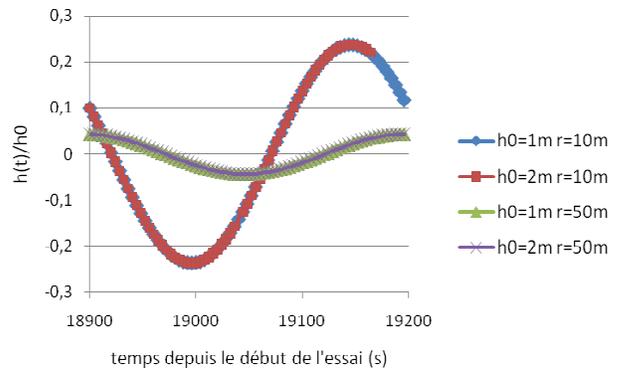


Figure 8. Évolution de la charge dans l'aquifère pour $D = 12.5 \text{ m}^2/\text{s}$ et $t_0 = 300$ s.

Le rapport $h(t)/h_0$ est constant, quelles que soient l'amplitude de l'onde et la distance au puits. Ainsi, l'amplitude de l'onde varie linéairement avec l'amplitude de l'onde au niveau du puits, ce que montrait la solution (3). Une onde d'amplitude 2 fois plus grande se propage alors 2 fois plus loin, et permet d'observer une amplitude plus forte dans les piézomètres. Cependant, l'amplitude de l'onde ne doit pas dépasser la moitié de l'épaisseur de l'aquifère, au risque de créer des variations de charge dans les couches adjacentes.

En se ramenant au rapport d'amplitude $h(t)/h_0$, il est alors possible d'utiliser la propagation de l'onde entre deux piézomètres alignés avec le puits, au lieu de celle entre le puits et un piézomètre. La valeur de h_0 est alors

l'amplitude maximale de l'onde dans le piézomètre le plus proche du puits. Cela permet alors d'obtenir les hétérogénéités de propriétés dans l'aquifère. La période de l'onde étant constante, le déphasage devra alors être mesuré entre les deux piézomètres.

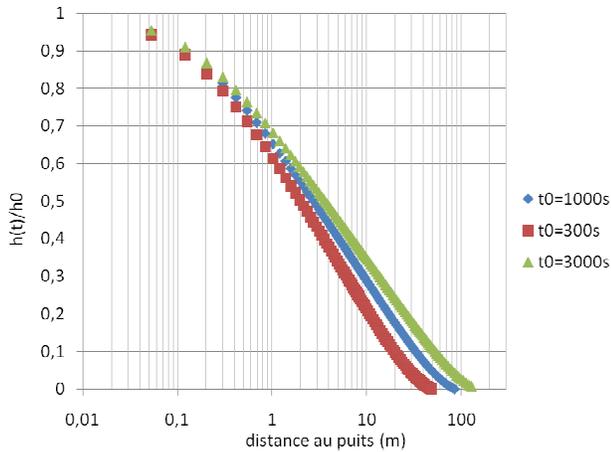


Figure 9. Variation du rapport d'amplitude maximale pour $D = 12.5 \text{ m}^2/\text{s}$ en fonction de la distance.

Lorsque la période augmente, l'onde s'atténue moins en fonction de la distance et se propage alors plus loin. Par exemple, si on considère une limite à 90% d'atténuation, l'onde pour $t_0 = 300 \text{ s}$ se propage à 20 m, pour $t_0 = 1000 \text{ s}$ à 35 m et pour $t_0 = 1000 \text{ s}$ à 50 m. C'est le phénomène que l'on observe dans le cas des marées dont le t_0 est voisin de 12 heures et qui peuvent se propager jusqu'à des distances supérieures à 1000 mètres dans les terres.

Ainsi le choix d'une onde de forte amplitude et de faible longueur d'onde permettrait une détermination de la diffusivité sur de grandes distances. Cependant, un choix d'amplitude trop grand risque de changer les caractéristiques de l'aquifère, en créant des variations de pression trop fortes, alors qu'une phase trop grande entraîne un essai de longue durée, peu intéressant économiquement.

3.5 Détermination graphique de la diffusivité

Afin de palier à la méconnaissance de la diffusion a priori et d'optimiser rapidement le choix des paramètres de l'onde, une méthode graphique a été mise au point. On définit alors le taux d'atténuation de l'amplitude, comme le rapport de l'amplitude maximale de l'onde durant la période et le déphasage normalisé, comme le rapport du déphasage de l'onde par rapport à l'onde du puits et de la période de l'onde du puits.

Ainsi, à partir de la mesure du taux d'atténuation $h(t)/h_0$ dans les piézomètres, on utilise les courbes types

dans un graphique de D/ω en fonction de la distance au puits. Les points ont été obtenus en cherchant, pour chaque valeur de D/ω , à quelle distance l'onde est atténuée ou déphasée de 50, 75, 90 et 95%.

Pour l'utilisation du déphasage, on utilise un graphique du déphasage normalisé en fonction de D/ω . On calcule la valeur de déphasage normalisé par la formule $t_{\text{lag}} / (t_0 + t_{\text{lag}})$.

Les figures 10 et 11 présentent les résultats obtenus par simulation. En utilisant (4) on détermine la valeur de l'atténuation d'amplitude et du déphasage, que l'on replace, en plus de la distance au puits et de la période de l'onde, dans le graphique correspondant.

On obtient ainsi 2 méthodes combinées permettant avant tout une estimation de la diffusivité et un ajustement des paramètres de l'onde.

4 INVERSION DES ÉQUATIONS

En substituant la solution en régime permanent dans l'équation différentielle, Saucier et al (2009) obtiennent un système de 2 équations différentielles linéaires (5).

$$\begin{cases} R_1'' + \frac{1}{\rho} R_1' + wR_2 = 0 \\ R_2'' + \frac{1}{\rho} R_2' - wR_1 = 0 \end{cases} \quad (5)$$

Les fonctions R_1 et R_2 sont identiques à celles présentées dans la solution (3). Même s'il n'est pas possible d'obtenir une solution explicite simple pour les fonctions R_1 et R_2 , il est possible de résoudre les équations à l'aide d'une méthode numérique.

Saucier et al. (2009) proposent d'utiliser la fonction NDSolve du logiciel *Mathematica* pour résoudre ce problème aux conditions aux limites. On obtient alors, pour une valeur de diffusivité, d'amplitude et de déphasage, l'évolution de l'onde en fonction du temps et de la distance au puits, pendant le régime stationnaire. En inversant le problème, il est alors possible d'obtenir la diffusivité à partir du comportement de l'onde.

Pour inverser le problème, on utilise un critère d'erreur soit sur l'amplitude, soit sur le déphasage donné lors de la résolution et une valeur d'amplitude ou de déphasage obtenue à partir d'un piézomètre et de l'Équation 4. Il reste alors à résoudre systématiquement le système d'équations en faisant varier la diffusivité jusqu'à atteindre le critère de convergence choisi. On utilise finalement le paramètre de terrain non utilisé pour vérifier le résultat obtenu en résolvant le système (5) à partir de la valeur de diffusivité déterminée et en vérifiant que les valeurs concordent.

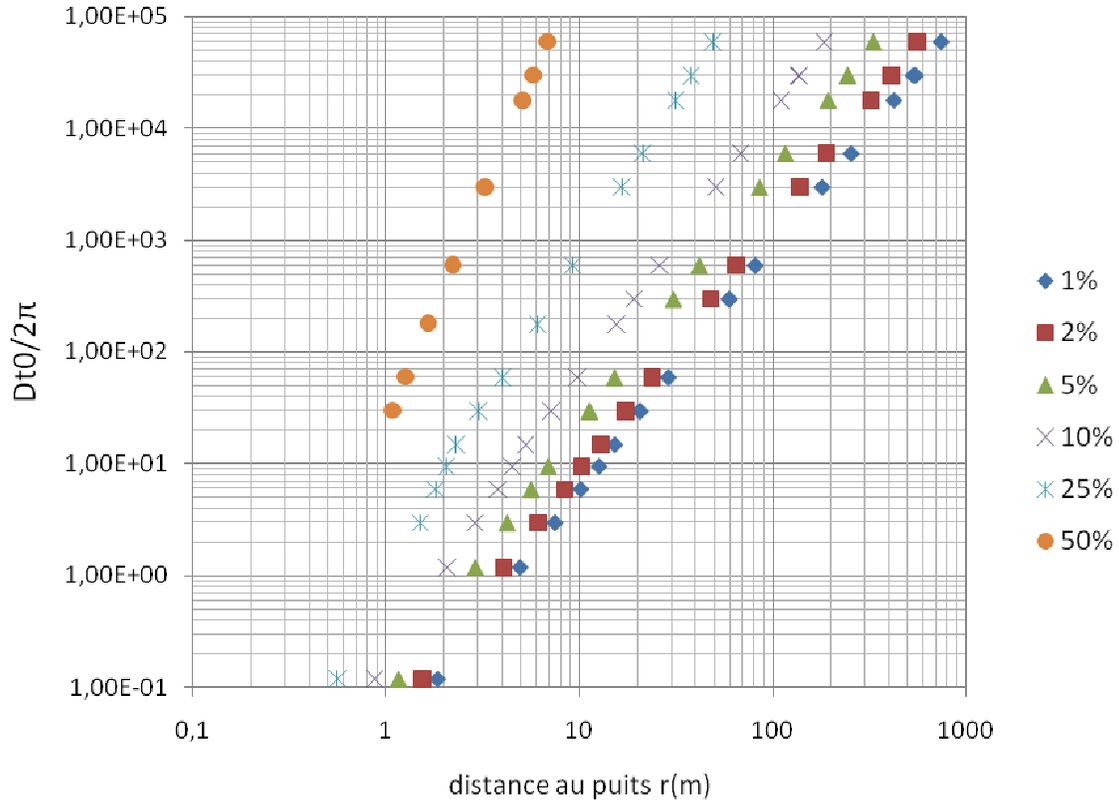


Figure 10. Détermination graphique de la diffusivité à partir du taux d'atténuation

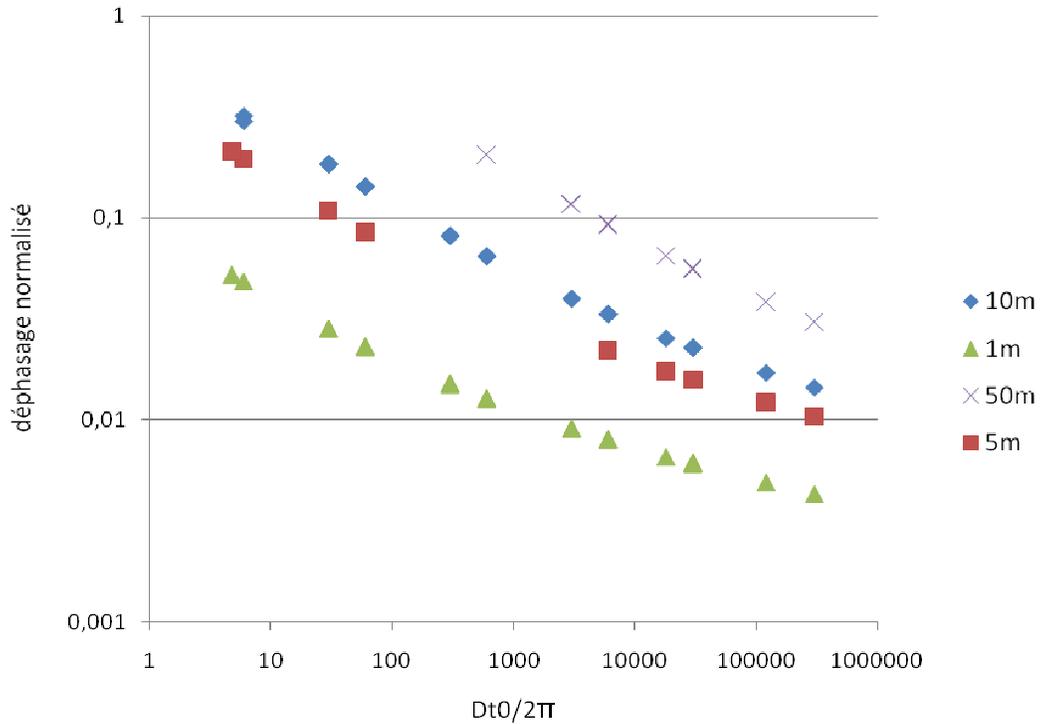


Figure 11. Détermination graphique de la diffusivité en utilisant le déphasage dans les piézomètres, pour plusieurs distances au puits.

5 CONCLUSION

Une procédure est présentée afin d'interpréter des essais de propagation d'une onde sinusoïdale, générée à partir d'un puits, dans un aquifère à nappe captive. L'utilisation du logiciel SEEP/W a permis de valider la solution proposée par Saucier et al. (2009), d'étudier le comportement de l'onde et de mettre en place deux procédures afin de déterminer la diffusivité à partir des données des piézomètres.

L'onde forcée imposée dans le puits montre un comportement identique vis-à-vis des paramètres de l'aquifère que celle de la marée : lorsque la conductivité hydraulique augmente ou l'emmagasinement spécifique diminue, l'onde se disperse moins, l'amplitude et le déphasage évoluent moins rapidement lorsque l'on s'éloigne du puits. C'est à partir de ces phénomènes de variations d'amplitude et de déphasage qu'il est alors possible d'obtenir une estimation de la diffusivité de l'aquifère.

Même s'ils ne permettent pas d'obtenir la conductivité hydraulique et l'emmagasinement de l'aquifère, mais leur rapport, les essais sinusoïdaux constitue un moyen rapide pour analyser des aquifères hétérogènes entre les piézomètres ou anisotropes. De plus, lors d'essais dans des aquifères contaminés, ils évitent l'utilisation de grandes cuves pour stocker l'eau pompée du puits, dans la mesure où l'eau reste dans le puits avant d'être réinjectée dans l'aquifère.

Les essais sinusoïdaux sur le terrain nécessitent la mise en place d'une pompe programmable, afin de pouvoir imposer le débit ou la charge désiré dans le puits. Des capteurs de pression doivent être installés dans les piézomètres et afin d'éviter l'influence de l'emmagasinement des tuyaux du puits et des piézomètres, il sera nécessaire d'installer des obturateurs pendant la durée de l'essai.

De plus, il sera important de vérifier rapidement si les paramètres choisis pour l'onde sont appropriés en utilisant les valeurs des premières périodes, l'influence de l'état transitoire étant faible et de courte durée.

RÉFÉRENCES

- Boussinesq, J. 1877. Essai sur la théorie des eaux courantes. Mémoires présentés par divers savants à l'Académie des sciences, Paris, *Imprimerie nationale*, p. 272.
- Chapuis, R.P., Chenaf D., Bussière B., Aubertin M., and Crespo R. 2001. A user's approach to assess numerical codes for saturated and unsaturated seepage conditions. *Canadian Geotechnical Journal*, 38: 1113-1126.
- De Cazenove, E. 1971. Ondes phréatiques sinusoïdales, *La Houille Blanche*, 7: 601-615.
- Geo-Slope International Ltd. 2003. Seep/W for finite element seepage analysis. User's guide. Geo-Slope International Ltd. Calgary, Alta.
- Rasmussen T.C. 2003. Estimating aquifer hydraulic properties using sinusoidal pumping at the Savannah River site, South Carolina, USA. *Hydrogeology Journal*, 11: 466-482.
- Saucier, A., Frappier, C. and Chapuis, R.P. 2009. Sinusoidal oscillations radiating from a cylindrical source in thermal conduction or groundwater flow: closed-form solutions, Submitted, *International Journal of Analytical and Numerical Methods in Geomechanics*.
- Townley, L.R. 1995. The response of aquifers to periodic forcing. *Advances in Water Resources*, 18(3): 125-146.
- Xia, Y., and Li, H. 2007. Tidal wave propagation in a coastal aquifer: effects of leakages through its submarine outlet capping and offshore roof, *Journal of Hydrology*, 337: 249-257.