

Exploitation des hydrogrammes de puits du projet PACES en Montérégie Est

Jean - Sébastien Gosselin^{1*}, Marc Laurencelle^{1**}, Christine Rivard², Richard Martel¹ et René Lefebvre¹

¹ INRS-ETE, 490 rue de la Couronne, Québec, Qc, Canada, G1K 9A9 ; *jean-sebastien.gosselin@ete.inrs.ca; jsebgosselin@gmail.com **marc.laurencelle@ete.inrs.ca; marc.laurencelle@gmail.com

² CGC- Division Québec, 490 rue de la Couronne, Québec, Qc, Canada, G1K 9A9

1. Introduction

Il est pratique courante dans le cadre des projets de caractérisation hydrogéologique régionale de mesurer le niveau d'eau dans les puits d'observation sur une base quotidienne, voire horaire. Toutefois, l'interprétation et la valorisation de ces données ne sont pas toujours évidentes, ce qui explique sans doute la sous-utilisation de ce type de données.

Pour le projet d'Acquisition de Connaissances sur les Eaux Souterraines (PACES) en Montérégie Est (~9000 km²), 25 forages conventionnels au roc ont été réalisés (Figure 1), qui ont tous été convertis en puits d'observation (Figure 2).

Cette affiche découle d'une collaboration entre deux étudiants dont les projets de doctorat portent sur la recharge et l'écoulement régional en Montérégie Est.



Figure 2: Foreuse Foremost DR-12

L'objectif est de vérifier si des séries temporelles de niveau d'eau acquises dans des puits d'observation peuvent être utilisées comme outil diagnostique autonome afin de caractériser le contexte hydrogéologique d'un aquifère rocheux à l'échelle locale ou subrégionale.

Pour ce faire, les mesures de niveau d'eau acquises depuis 3 ans ont été analysées avec diverses approches qualitatives et quantitatives. Les résultats ont ensuite été comparés avec différents livrables du PACES.

L'affiche présente un survol du travail réalisé, dont les résultats sont prometteurs.



Figure 1: Puits d'observation PO19

2. Acquisition des données météorologiques

La Figure 3 présente la carte de localisation des stations météorologiques et des puits d'observation pour la région d'étude.

Une station météorologique a été associée à chacun des puits à l'aide de la méthode des polygones de Thiessen.

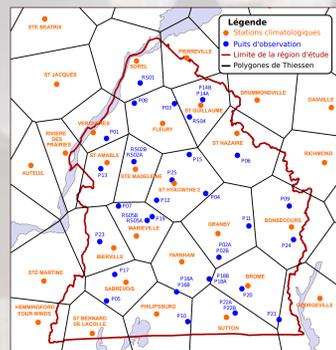


Figure 3: Localisation des puits d'observation, des stations météorologiques et des polygones de Thiessen associés aux stations météorologiques

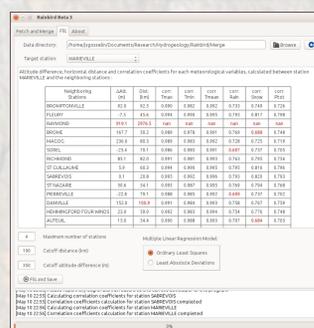


Figure 4: Interface graphique du logiciel Rainbird

Les données pour chacune des stations météorologiques ont été téléchargées sur le site climate.weather.gc.ca du Gouvernement du Canada avec le logiciel Rainbird (Figure 4). De plus, ce logiciel a été utilisé pour combler automatiquement les données météorologiques journalières qui étaient manquantes.

Rainbird est développé à l'INRS-ETE et est disponible gratuitement (contactez l'un des auteurs de cette affiche pour plus de détails).

3. Production des hydrogrammes de puits

Les hydrogrammes ont été produits à l'aide du logiciel Hydroprint développé à l'INRS-ETE (Figure 5).

Afin de faciliter l'interprétation visuelle des hydrogrammes, les quelques lignes directrices suivantes ont été respectées:

- (1) Les échelles des axes sont cohérentes pour l'ensemble des puits de la région d'étude ;
- (2) Les niveaux d'eau représentent des profondeurs par rapport à la surface du sol et non une altitude par rapport au niveau de la mer ;
- (3) Les hydrogrammes sont tracés sur une période de 2 à 3 ans maximum afin de pouvoir discerner les variations du niveau d'eau dues à la recharge ;
- (4) Les données météorologiques (précipitations totales et températures maximales) sont tracées sur une base hebdomadaire.

Par une simple inspection visuelle des hydrogrammes ainsi produits, il est possible de les classer en fonction de leur réponse aux événements de précipitations et de fonte de la neige. Cela permet de donner une indication qualitative du niveau de confinement (libre, captif ou semi-captif) de l'aquifère dans lequel le puits est installé.

Quelques hydrogrammes sont présentés à la section 5 pour illustrer ce propos.

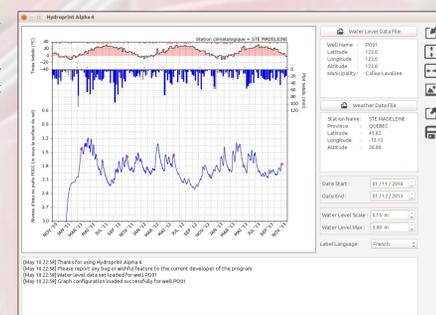
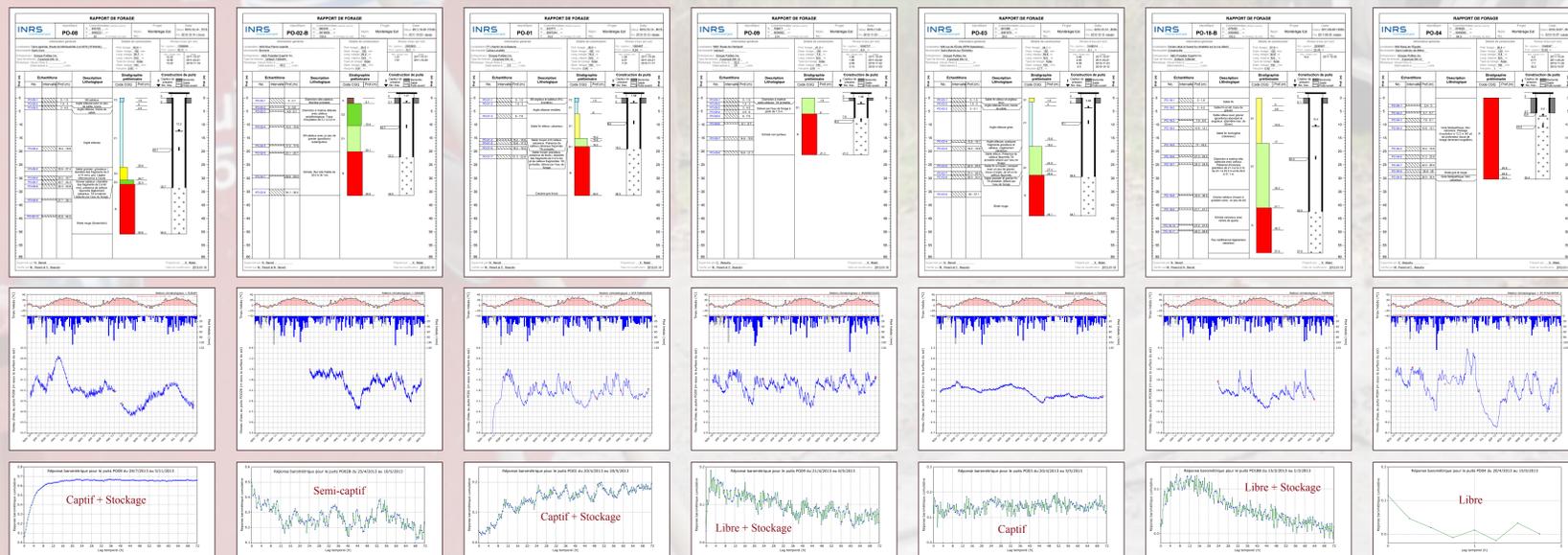


Figure 5: Interface graphique du logiciel Hydroprint, qui permet de mettre en forme automatiquement les données de niveau d'eau et les données météorologiques sur un même graphique. Hydroprint est compatible avec Rainbird.

5. Rapports de forage, hydrogrammes et réponses barométriques pour quelques puits



4. Réponse barométrique des puits

4.1. QUELQUES NOTIONS THÉORIQUES

Les variations de la pression atmosphérique (ΔP_{atm}) sont connues pour causer des fluctuations proportionnelles et opposées du niveau d'eau dans les puits (cf. Figure 6).

Plusieurs techniques existent pour corriger les niveaux d'eau de ces effets qui, parfois, masquent les variations réelles du niveau piézométrique de l'aquifère (ex. : courbe verte sur la Figure 6).

Or, ce « bruit », qui semble à première vue indésirable, contient de l'information utile car la réponse temporelle du niveau d'eau aux variations de pression atmosphérique, dite réponse barométrique, varie en fonction :

- (1) des propriétés mécaniques et du niveau de confinement de l'aquifère ;
- (2) des propriétés hydrauliques et géométriques des puits.

La Figure 7 présente différents types de réponses barométriques produites avec des modèles théoriques de cas idéalisés. Cependant, les réponses barométriques obtenues à partir de l'analyse de données réelles correspondent le plus souvent à une combinaison de ces courbes théoriques.

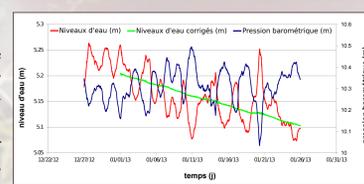


Figure 6: Pression atmosphérique et niveaux d'eau bruts et corrigés pour le puits d'observation PO13.

4.2. RÉPONSE BAROMÉTRIQUE DES PUITS EN MONTE RÉGIE EST

Des mesures de niveau d'eau ont été acquises aux 15 minutes plutôt qu'aux 6 heures, sur une période de près d'un an, dans l'ensemble des puits d'observation de la région.

La réponse barométrique des puits a été calculée à partir de ces données avec le logiciel KGS_BRF développé par Butler et al., 2011.

La comparaison des réponses barométriques des puits aux courbes théoriques renseigne sur le niveau de confinement et la transmissivité de l'aquifère, au moins à l'échelle locale autour du puits. La réponse barométrique pour quelques puits est présentée à la section 5.

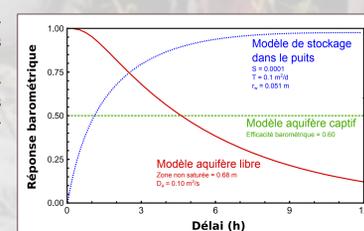


Figure 7: Modèles théoriques de réponses barométriques pour des cas idéalisés (adapté de Spaine, 2002)

6. Analyse des variations saisonnières des niveaux d'eau

6.1. ESTIMATION DU DÉLAI DU CYCLE SAISONNIER DES NIVEAUX D'EAU

En théorie, puisque l'aquifère rocheux régional est supposé continu, les variations saisonnières de la nappe dans les zones libres devraient être mesurables aux puits au roc dans les zones captives, mais avec un certain retard ou délai.

Afin de vérifier cette hypothèse, le décalage temporel des variations saisonnières des niveaux d'eau de tous les puits en Montérégie Est a été estimé par rapport au puits PO04, puisque ce dernier est installé dans une zone où le roc est affleurant et la nappe est libre.

Afin de faciliter la comparaison des hydrogrammes entre eux, les niveaux d'eau de chaque puits ont été normalisés par rapport à leurs moyenne et écart-type (ex. : Figure 8).

Les délais ainsi estimés pour les puits au roc captif ont été comparés à la distance à la zone non captive la plus proche d'après la carte des conditions de captivité de l'aquifère rocheux régional produite dans le cadre du PACES en Montérégie Est (cf. Figure 9 et 11).

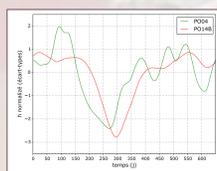


Figure 8: Estimation du délai pour le puits PO14B

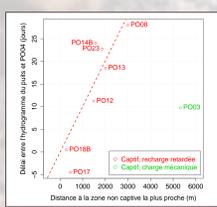


Figure 9: Relation délai-distance pour les puits au roc captifs

6.2. ESTIMATION DES PROPRIÉTÉS DE L'AQUIFÈRE ROCHEUX À L'ÉCHELLE SEMI-RÉGIONALE (~ 5 KM)

La propagation des variations de la charge hydraulique (h) dans un aquifère est décrite par une équation aux dérivées partielles parabolique. La solution analytique de cette équation pour un système transitoire 1Dx, auquel est imposée une charge hydraulique fluctuant de façon sinusoïdale de fréquence ω ($\omega = 2\pi/P$) avec une amplitude Δh , est analogue à l'équation de chaleur de Fourier (1822):

$$h(x,t) = h_0 + \Delta h \cdot \exp\left(-x \cdot \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}\right) \cdot \sin\left(\omega t - x \cdot \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}\right)$$

atténuation déphasage

h_0 : charge hydraulique moyenne (m)
 α : diffusivité hydraulique (m²/s)
 ω : fréquence angulaire (rad/s, s⁻¹)
 P : période de l'onde (s)
 x : distance à la zone de recharge (m)

Il est possible de mettre en relation le déphasage de $h(x,t)$ observé à différents puits et la diffusivité hydraulique de l'aquifère, α , comme suit :

$$\alpha = T/S = \frac{1}{2\omega} \left(\frac{\Delta x}{\Delta t}\right)^2 \quad \text{ou} \quad \begin{cases} T: \text{transmissivité de l'aquifère rocheux (m}^2\text{)} \\ S: \text{emmagasinement de l'aquifère rocheux (-)} \\ \alpha: \text{diffusivité hydraulique (m}^2\text{/s)} \end{cases}$$

où $\Delta x/\Delta t$ est estimé à partir de la pente de la relation linéaire présentée à la Figure 9. La diffusivité hydraulique subrégionale de l'aquifère rocheux peut ainsi être estimée : $\alpha \approx 1.65 \text{ m}^2/\text{s}$. De plus, ayant analysé statistiquement les données hydrauliques directes et indirectes de la base de données régionale du PACES et déterminé un mode $T \approx 5.6 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ pour la transmissivité, nous pouvons déduire une valeur d'emmagasinement pour l'aquifère rocheux : $S \approx 3.4 \times 10^{-5}$.

L'intérêt de cette démarche est que les propriétés hydrauliques ainsi obtenues sont représentatives à l'échelle subrégionale (~5 km) plutôt que locale.

6.3. ESTIMATION D'UNE LIMITE DE DÉTECTION

D'après le modèle analytique présenté précédemment, pour une fluctuation saisonnière typique du niveau d'eau dans les zones où la nappe est libre, l'amplitude crête à crête de l'onde dans l'aquifère captif à l'étude passe sous les 0.5 m à partir de $x \approx 5 \text{ km}$, tel que représenté sur la Figure 10).

Cette amplitude atténuée est similaire à la variation hydraulique que peut induire la charge mécanique exercée par le poids de la neige s'accumulant au sol au cours de l'hiver (cas du puits PO03) et constitue une limite de cette approche.

6.4. INTERPRÉTATION DE LA CARTE DE LA FIGURE 11

La majorité des puits ouverts dans l'aquifère rocheux captif du secteur nord-ouest de la région d'étude répondent aux variations saisonnières après un délai de 6 jours ou plus (Figure 11). En comparaison, la majorité des puits crépinés dans les dépôts meubles montrent un délai négatif à nul, démontrant la pertinence du délai comme indicateur de l'étendue de la zone captive autour du puits. Certains hydrogrammes de puits ont des comportements particuliers, qui peuvent s'expliquer par l'influence de conditions locales ou d'autres mécanismes que la diffusion hydraulique horizontale (ex. : PO03, RS04).

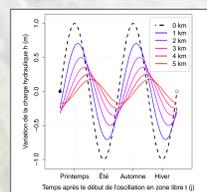


Figure 10: Modèle analytique de $h(x,t)$ pour une oscillation cyclique d'une période de 1/2 an

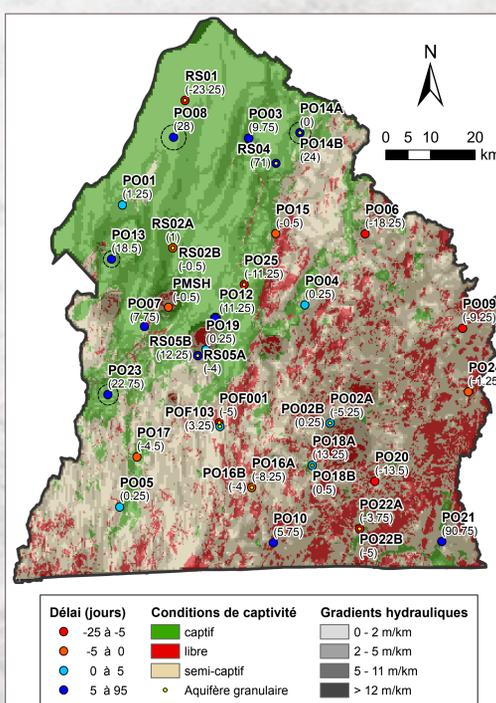


Figure 11: Mise en relation du délai de propagation des fluctuations piézométriques des zones libres (repr. par PO04) jusqu'aux puits, et des conditions de captivité de l'aquifère rocheux

7. Conclusion

Cette affiche démontre qu'en utilisant diverses méthodes d'analyse des séries temporelles de niveau d'eau dans les puits, il est possible de définir le contexte hydrogéologique de l'aquifère dans lequel le puits est ouvert. En résumé :

- (1) L'inspection visuelle des hydrogrammes et des données météorologiques permet de caractériser la réponse de l'aquifère aux événements de recharge, permettant de départager les puits qui ont une réponse libre de ceux qui ont une réponse captive.
- (2) En plus d'éliminer le « bruit » induit par les variations de la pression atmosphérique présent dans les hydrogrammes bruts, la réponse barométrique des puits permet de caractériser le niveau de confinement de l'aquifère à l'échelle locale autour du puits.
- (3) L'analyse du cycle des variations saisonnières du niveau d'eau permet de caractériser le niveau de confinement ainsi que des propriétés hydrauliques de l'aquifère, à l'échelle subrégionale.

Les réseaux de suivi des niveaux d'eau installés lors des PACES pourraient donc être mis à profit au-delà du simple suivi descriptif de la piézométrie régionale, en utilisant des outils et méthodes d'analyse tels que ceux présentés ici.

RÉFÉRENCES

Butler J.J., Jin W., Mohammed G.A. and Reboulet E.C. 2011. New insights from well responses to fluctuations in barometric pressure. Ground Water 49(4), 525-533.
 Fourier, J.-B.-J. 1822. Théorie analytique de la chaleur. Firmin Didot, Père et Fils, Paris.
 Spaine, F.A. 2002. Considering barometric pressure in groundwater flow investigations. Water Resources Research 38(6), 1078.