

Excavations et eau souterraine : l'intérêt des banques de données des puits

Robert P. Chapuis, Vahid Merefat et Lu Zhang
Polytechnique Montréal, P.O. Box 6079, Sta. CV,
Montréal (Québec), Canada, H3C 3A7

RÉSUMÉ

La construction de nombreux projets requiert des excavations temporaires ou permanentes. Ingénieurs et entrepreneurs doivent collecter des informations sur les valeurs anticipées des débits, conductivités hydrauliques, rabattements et risques d'instabilités. Très souvent, les études du site collectent des informations hydrauliques limitées et n'incluent pas un essai de pompage. Cependant, celles-ci peuvent être bonifiées par l'usage des banques publiques de données sur les puits, qui donnent des informations souvent inexploitées, par exemple les débits des puits proches du projet. L'article donne quelques exemples de statistiques pour ces débits dans le roc, à une échelle plus grande que celle du site du projet. Les résultats dépendent beaucoup du type de roc. Ils sont une addition importante à toute étude géotechnique pour tous les professionnels impliqués dans un projet avec excavation.

ABSTRACT

The construction of many projects requires temporary or permanent excavations. The engineers and contractors must collect information about the anticipated pumping rate, hydraulic conductivities, drawdowns, and risks of instabilities. Most often, the site studies gather limited hydraulic information and do not include a pumping test. However, this information may be improved by using public data banks for wells, which contain information that is usually, such as pumping rates at existing wells near the project site. The paper gives a few examples of statistics for pumping rates in the rock at a larger scale than that of the project site. The results highly depend upon the type of rock. They make a key addition to a geotechnical investigation for all professionals involved in a project with excavation.

1 INTRODUCTION

Il faut de bonnes informations sur l'eau souterraine pour concevoir, installer et opérer les systèmes d'assèchement et de drainage requis par des excavations temporaires et permanentes. En majorité, les études de sites n'ont ni puits de pompage ni essai de pompage. Pour des égouts et aqueducs, les études incluent des forages espacés le long des tracés. Pour des structures souterraines, les forages sont plus rapprochés. L'information hydraulique est habituellement plus dense pour les sols que pour le roc. On constate aussi que les variations latérales des propriétés sont plus rapides dans le roc que dans les sols. Il en résulte que les conditions entre forages diffèrent des conditions aux forages, ce qui rend difficile la prédiction des conditions hydrauliques.

On peut prédire la conductivité hydraulique saturée K d'un sol in situ à partir de sa granulométrie et d'un estimé de son indice des vides in situ (Chapuis 2012a, 2012b). Les équations fiables, qui ont survécu à l'analyse critique de 45 équations prédictives (Chapuis 2012a), et leurs domaines d'application, sont celles de la Figure 1 pour les sols non plastiques. On peut utiliser l'équation de Hazen (1892) couplée avec celle de Taylor (1948), la charte de NAVFAC DM7 (1974) – résumée par une équation (Chapuis et al. 1989) – l'équation de Kozeny–Carman (Chapuis et Aubertin 2003), celle de Chapuis (2004), et

celle de Chapuis et al. (2015).

Les méthodes prédictives (Fig. 1) sont applicables aux sols homogènes. Cependant de nombreux sols aquifères sont stratifiés. Dans ce cas, un échantillon de sol prélevé dans un forage, par exemple avec une cuillère fendue, peut contenir plusieurs strates qui sont mêlées pendant le battage et l'extraction du carottier, puis la manipulation et le transport de l'échantillon jusqu'au laboratoire.

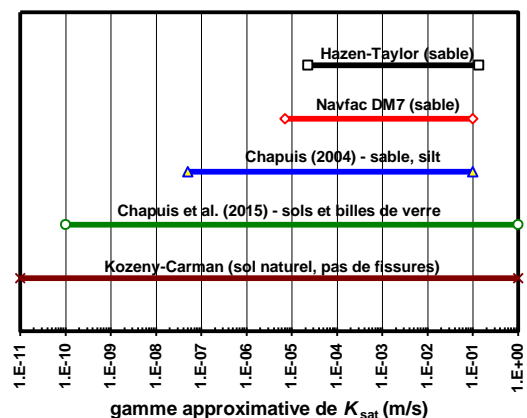


Figure 1. Méthodes fiables de prédiction de la conductivité hydraulique saturée (figure inspirée de Chapuis 2012a).

Si l'échantillon est remanié, on peut analyser sa granulométrie par la MDM, méthode de décomposition modale (Chapuis et al. 2014). La MDM donne les pourcentages en masse solide de chaque couche et la granulométrie de chaque couche. Elle donne aussi une équation pour la surface spécifique (S_s) dont les résultats sont très proches de ceux obtenus avec la méthode de Chapuis et Légaré (1992). La MDM quantifie la stratification, ce qui améliore les prédictions des valeurs K in situ (Chapuis 2013, 2019a). Par exemple, les essais de pompage donnent la valeur de K à grande échelle. Celle-ci est égale à la valeur horizontale obtenue par la règle de composition appliquée aux strates identifiées par la MDM (Chapuis 2013, 2019a). Cette capacité est essentielle pour les excavations dans des sols.

Il est difficile de caractériser un roc fracturé au stade des études, surtout pour la valeur de K in situ (Berkowitz 2002; Coli et al. 2008; Kayabasi et al. 2015; Shahbazi, et al. 2020) et la valeur du débit (Chapuis et al. 1991). C'est pourquoi cet article examine les propriétés hydrauliques du roc fracturé, fréquemment mises en doute dans les poursuites légales relatives aux excavations.

L'article explique comment utiliser les banques publiques de données relatives aux puits de pompage en vue d'en tirer des informations utiles pour des excavations projetées. L'article fait une synthèse des diverses corrélations proposées pour relier la capacité spécifique du puits, SC , à la transmissivité, T , de l'aquifère. L'article analyse ensuite statistiquement les données de quelques municipalités. On trouve que la performance relative des méthodes de forage des puits dépend du type de roc. Finalement, l'article discute la dispersion des valeurs de Q sur de courtes distances.

2 MATÉRIAUX ET MÉTHODES

Les essais de pompage peuvent être longs (72 h et jusqu'à 30 jours) et être suivis par quelques piézomètres, ou bien courts (moins de 2 heures) et sans piézomètre. Les données des longs essais peuvent figurer dans les banques. Souvent, elles ne sont accessibles que dans des rapports techniques et interprétées par des méthodes classiques (e.g., Theis 1935; Cooper et Jacob 1946). Les banques donnent surtout des informations sur les essais de pompage de courte durée.

Un tel essai rapide est fait par le puisatier après avoir développé le puits. On descend une tige de forage au fond du puits et on y injecte de l'air comprimé. Comme le mélange eau-air est moins dense que l'eau, la charge hydraulique est diminuée dans le tubage. La différence de charge ainsi créée produit un débit depuis l'aquifère vers le tubage, qui évacue alors un mélange eau-air. Un débitmètre ne peut donc pas être utilisé. Le débit est donné par le temps qu'il faut pour remplir un récipient de volume connu. Le rabattement peut être soit obtenu avec un capteur de pression installé au fond du puits, ou bien calculé en supposant une valeur de masse volumique pour le mélange eau-air dans le tubage. L'essai continue jusqu'à obtenir un débit Q constant, ce qui peut prendre de 30 minutes à deux heures. Cette technique d'air comprimé est rarement utilisée pour un essai de longue

durée. Elle l'est surtout pour un essai de courte durée, destiné à évaluer la productivité, faible à forte, d'un puits privé. Dans le cas d'un puits très productif pour lequel il faut une étude hydrogéologique, l'essai de courte durée est un essai préliminaire pour l'essai de longue durée avec pompage et remontée.

2.1 Capacité spécifique et transmissivité

Soit $Q(t)$ le débit au temps t et $s_w(r_w, t)$ le rabattement mesuré au puits de rayon r_w au temps t . La capacité spécifique SC du puits est obtenue par :

$$SC(t) = Q(t) / s_w(r_w, t) \quad [1]$$

Dans le cas d'un puits idéal (sans pertes de charge parasites) en régime permanent, tous les paramètres sont constants. La valeur de SC dépend alors de r_w , K , du degré de pénétration du puits dans l'aquifère d'épaisseur b . La transmissivité T est définie par $T = Kb$.

Dans le cas d'un puits idéal en régime transitoire, la valeur de SC dépend aussi du temps t et du coefficient d'emménagement S (Theis 1963; Brown 1963; Mace, 1997). La Figure 2 montre des courbes de rabattement typiques au puits pompé dans le cas d'essais par paliers, le débit du palier 1 étant nommé Q_1 , etc.

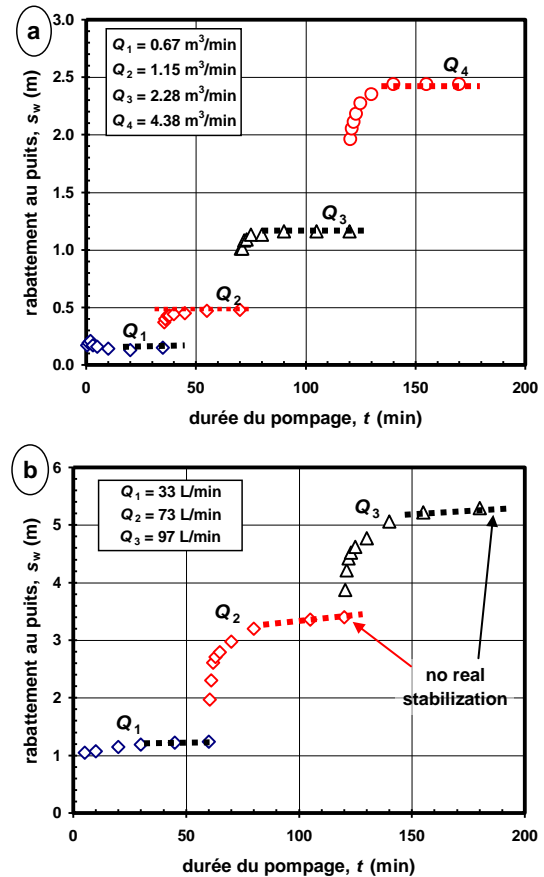


Figure 2. Exemples d'essais par paliers : (a) cas où le régime permanent est rapidement atteint pour chaque palier de pompage; (b) cas où le rabattement n'est pas stabilisé pour chaque palier.

Plusieurs expressions analytiques ont été proposées pour relier SC et T dans des cas idéalisés (Thomasson, et al. 1960; Theis 1963; Brown 1963). Toutefois, les puits réels ne sont pas idéaux et les corrélations entre valeurs mesurées de T et valeurs estimées de T à partir de SC sont souvent médiocres (Razack et Huntley 1991). Par ailleurs, les valeurs dites mesurées de T sont en fait des valeurs calculées à la suite de diverses hypothèses, alors que les valeurs de l'Équation 1 sont vraiment mesurées.

2.2 Corrélations entre SC et T

De nombreuses équations ont été proposées pour les régimes permanent et transitoire, et pour les différents types d'aquifères. Celles-ci prennent deux formes :

$$T = a SC + b \quad [2]$$

$$T = \alpha SC^\beta \quad [3]$$

Les valeurs des paramètres a , b , α et β sont données par le meilleur ajustement trouvé entre les valeurs de T et celles de SC , pour une formation géologique donnée. Elles dépendent des unités qui ont été utilisées pour T et SC respectivement. Les articles récents utilisent m^2/j pour T et SC , alors que les anciens peuvent utiliser gpm/ft pour T et gpd/ft pour SC , ou bien simultanément m^2/min pour T et m^2/j pour SC . Pour les besoins de cet article, et afin de faire des comparaisons correctes, les unités des articles originaux ont été prises en compte et toutes les valeurs initiales de α et β , quelles que soient les unités initiales, ont été converties en nouvelles valeurs de α et β , valables quand T et SC sont exprimées en m^2/j .

La revue de littérature a trouvé de nombreux groupes de valeurs (a , b) ou (α et β) avec les unités fournies pour T et SC . Elle a aussi trouvé des groupes pour lesquels les publications ne donnaient pas les unités pour T et SC : ces groupes ont été exclus pour faire la Figure 3.

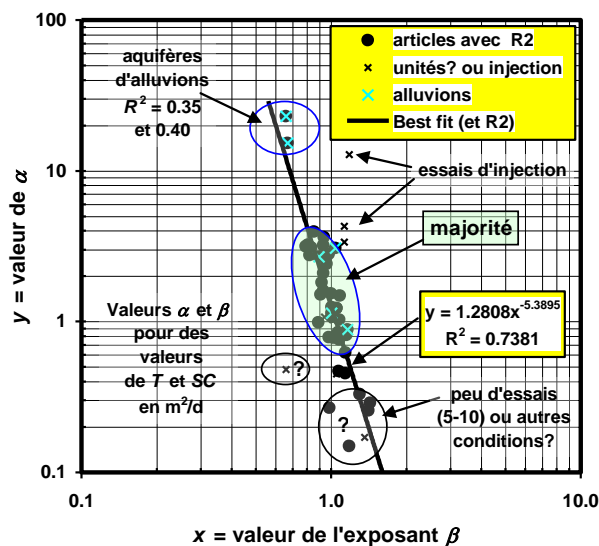


Figure 3. Valeurs publiées pour les paramètres α et β dans la loi puissance de l'Équation 3.

Les valeurs expérimentales de α et β (Eq 3) semblent bien corrélées (Fig. 3), sauf quand le point (α et β) est celui d'un aquifère où il y a eu peu d'essais de pompage (5 à 10 essais), ou bien quand les valeurs de T ont été obtenues par des essais d'injection entre obturateurs et non pas par des essais de pompage. La plupart des résultats donnent une gamme de 0.8 à 4 pour α et une gamme de 0.8 à 1.2 pour β . On trouve que les valeurs publiées de α et β sont bien corrélées ($R^2 = 0.738$) par :

$$\beta = 1.208 \alpha^{-5.3895} \quad [4]$$

3 RESULTATS UTILES POUR UNE EXCAVATION

On peut tirer des informations utiles pour les excavations à partir des banques publiques de données relatives aux puits de pompage. L'article fournit quelques exemples en utilisant la banque du Québec, le SIH ou Système d'information hydrogéologique (Environnement Québec 2019).

Le SIH rassemble les informations sur les puits depuis les années 1980. De cette banque de données on peut extraire des données pour les analyser. L'extraction peut se faire autour d'un point de coordonnées connues (latitude, longitude), pour une municipalité, ou pour une zone rectangulaire définie par ses coordonnées. L'utilisateur doit être conscient que les données du SIH ne sont pas toutes complètes et fiables. Quelques données peuvent être absentes. De plus, les compagnies de forage qui remplissent les fiches des puits donnent généralement une description assez vague des sols alors que le roc est rarement identifié à partir des débris récupérés par le forage, généralement de type destructif.

Le SIH ne fournit pas les données des longs essais de pompage (72 heures à 30 jours) mais celles des courts essais de pompage (0.5 to 2 h), qui testent habituellement les puits avec de l'air comprimé. Les niveaux d'eau sont mesurés dans le puits pompé et il n'y a pas de puits d'observation.

Le territoire du Québec compte trois provinces géologiques : le Bouclier canadien ($\approx 94\%$), les Appalaches ($\approx 3.5\%$) et les Basses Terres du Saint-Laurent ($\approx 2.5\%$), qui concentrent presque toute la population. Cet article donne des résultats pour une municipalité des Basses Terres et des municipalités des Appalaches.

Celle de Saint-Hyacinthe est dans les Basses Terres. Des couches récentes de sable, argile et till y recouvrent des roches sédimentaires localement percées par les roches intrusives formant les collines montérégiennes. Sur le territoire municipal, les roches appartiennent aux formations de shale de Richmond et Lorraine. On sait que ces shales sont fracturés dans leurs 3 à 6 mètres supérieurs, ce qu'on explique usuellement par le relâchement des contraintes du rebond postglaciaire. La densité des fractures décroît avec la profondeur. Le débit extrait des puits, pendant les essais de courte durée, sont très variables. Le shale par lui-même serait un aquitard sans les fractures qui créent une porosité secondaire et font de la partie supérieure du shale un aquifère.

Pour les besoins de la ville, Saint-Hyacinthe pompe environ $3 \times 10^4 m^3/j$ dans la rivière Yamaska. Sur le territoire municipal, de nombreuses industries, fermes et

résidences isolées possèdent des puits privés, qui pour la plupart prennent de l'eau dans le roc.

Presque tout le territoire est recouvert d'argile sensible de la mer Champlain. La sensibilité est liée à la perte des sels dans les pores de cette argile déposée il y a environ 11,000 années (Duhaime et al. 2013). L'argile est micro fissurée dans sa partie supérieure qui forme une "croûte" suite aux cycles de gel-dégel et mouillage-séchage, et aux actions biologiques. La croûte, épaisse de 1.2 à 1.5 m, s'épaissit près de la Yamaska, qui a traversé l'argile pour couler sur le till et le roc. Sous sa croûte, l'argile n'est pas fissurée, avec une valeur de K entre 10^{-9} et 10^{-10} m/s. Le dépôt d'argile forme un vaste aquitard au-dessus du till et du roc. Une fraction de la pluie et de la neige fondue migre verticalement dans l'argile et alimente le roc aquifère de quelques centimètres par an (Duhaime et al. 2017). La rivière draine le roc aquifère en conditions normales (pas en conditions de crue) : cet aquifère est alors à nappe semi-captive à une échelle de 1 km^2 et plus. La différence entre "captive" et "semi-captive" dépend de la taille du problème étudié : "captive" pour un essai de pompage et "semi-captive" à l'échelle régionale.

Un exemple d'excavation est utile pour illustrer le lien hydraulique direct entre roc aquifère et rivière Yamaska. Le premier auteur a été impliqué dans un projet avec une excavation profonde proche de la rivière. Pendant une crue, les charges hydrauliques dans le roc ont augmenté rapidement et l'eau souterraine, qui allait du roc vers la rivière, a changé de direction : elle allait maintenant de la rivière vers le roc. Pour éviter un soulèvement du fond de l'excavation, que la crue aurait provoqué, le personnel et les équipements ont été retirés de l'excavation, qui a ensuite été envoyée.

Pour analyser les conditions de l'eau souterraine dans l'argile et le roc, on peut utiliser les solutions analytiques pour des cas horizontaux et inclinés (Chapuis et Saucier 2013). Quand on résout le problème inverse (on cherche alors les valeurs de K qui expliquent les valeurs mesurées de charge hydraulique), il faut être prudent parce que le problème inverse a plusieurs solutions. Cette multiplicité des solutions existe aussi pour les aquifères à nappe libre sur substratum horizontal ou incliné (Chapuis 2016a). La multiplicité est dangereuse pour les études d'approvisionnement en eau potable et les études de contamination. Même en ajoutant des temps de transport de traceurs non-réactifs, le problème inverse a encore plusieurs solutions. Cela se produit pour plusieurs raisons : (1) peu de modélisateurs connaissent les règles mathématiques de base de modélisation numérique; (2) plusieurs séquences stratigraphiques peuvent donner de bons ajustements pour les paramètres hydrauliques mais différentes valeurs pour les concentrations et les temps dans les cas de contamination (Chapuis 2017a); (3) la valeur de la porosité effective n_e , souvent mal connue, devient alors un paramètre d'ajustement alors qu'elle doit être déterminée par un processus indépendant (Chapuis 2019b).

Cet article présente aussi quelques résultats pour les municipalités de Standstead et Salaberry-de-Valleyfield, dans les Appalaches, dans les zones Sud et Est proches des USA. En général, une couche de till recouvre le socle rocheux sédimentaire, composé de grès, shale et calcaire. Ces trois types de roc sont fracturés dans leurs

3 à 6 m supérieurs. La densité de fractures décroît généralement avec la profondeur. Les puits dans ces trois types de roc extraient une grande variété de débits.

On examine maintenant les informations que des ingénieurs et entrepreneurs peuvent tirer d'une banque de données des puits. La première information est celle de la localisation des puits : aucun exemple n'est fourni dans cet article. La deuxième information est celle de la variation du débit pompé Q (essais de courte durée) selon la profondeur forée dans le roc. La troisième information est celle des statistiques sur les valeurs de Q dans ces puits : par exemple, on veut savoir quel pourcentage des puits a une valeur de Q qui dépasse $100 \text{ m}^3/\text{j}$.

3.1 Débits pompés versus longueur forée dans le roc

Deux exemples de la variation de Q en fonction de la profondeur forée dans le roc apparaissent dans la Fig. 4. La Fig. 4a montre les données pour 504 puits de Saint-Hyacinthe alors que la Fig. 4b montre les données pour 556 puits de Standstead (données prise en Août 2019).

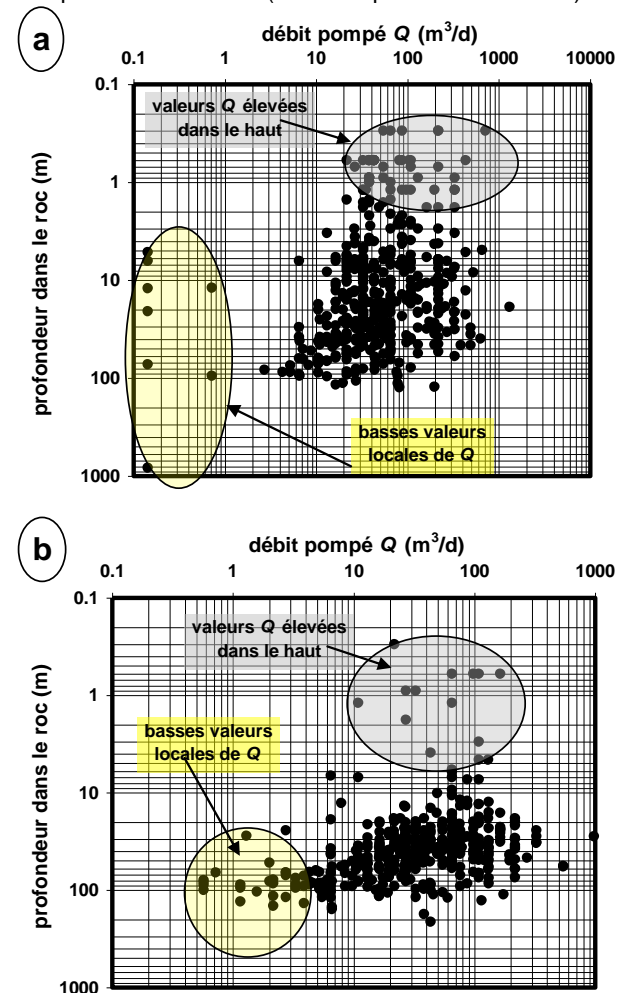


Figure 4. Débits pompés en fonction de la profondeur forée dans le roc : (a) Saint-Hyacinthe dans les Basses Terres; (b) Standstead, dans les Appalaches.

Certains de ces puits sont très profonds. Cependant, rares sont les excavations prévues qui vont dépasser dix mètres dans le roc. Dans ces conditions, sur le territoire municipal de Saint-Hyacinthe, on note que la valeur de Q est dispersée sur deux ordres de grandeur mais que 50% environ des puits ont un débit dans la gamme de 100 à 1000 m^3/j (Fig. 4a), ce qui est un avertissement de problèmes potentiels quand on planifie une excavation. Par comparaison, sur le territoire municipal de Stanstead, on note que la plupart des puits ont un débit Q dans la gamme de 10 à 170 m^3/j (Fig. 4b), ce qui constitue un avertissement moins sévère.

3.2 Statistiques sur les débits pompés

La distribution cumulée des valeurs de Q est donnée pour Saint-Hyacinthe (Fig. 5a) et Salaberry-de-Valleyfield (Fig. 5b). Les graphes ressemblent à des courbes granulométrique (GSDs) en masse solide. Pour analyser les nombreuses GSDs d'un projet, une méthode a été créée par Chapuis (2010), nommée décomposition modale (MDM) et utilisée dans quelques exemples (Chapuis et al. 2014). Elle est aussi utilisable pour la courbe de distribution de n'importe quel paramètre (Chapuis 2016b). Dans la Fig. 5, l'abscisse est $x = \ln [Q / 1 \text{ m}^3/\text{j}]$ et l'ordonnée va de 0 à 1 (ou 0 à 100%). Chaque courbe de distribution est considérée comme le résultat d'un mélange de quelques sous-populations ou modes, chaque mode ayant une distribution lognormale. On suppose cela parce que chaque mode dépend de plusieurs paramètres indépendants, qui confèrent une distribution lognormale à l'ensemble.

Pour l'aquifère de Saint-Hyacinthe (shale fracturé dans les Basse-Terres), la distribution de Q n'est pas normale mais celle de $\ln(Q)$ est normale (Fig. 5a). Les données suivent clairement une loi lognormale avec une espérance $\mu = 3.854$ et une déviation standard $\sigma = 1.01$. L'ajustement est excellent avec $R^2 = 0.991$.

Pour les aquifères de Salaberry-de-Valleyfield (trois types de roc dans les Appalaches) la distribution de Q n'est pas normale. Cependant, la distribution de $\ln(Q)$ est bien décrite par la somme de trois distributions lognormales (Fig. 5b), avec $R^2 = 0.996$. La première sous population ou premier mode représente 8.8% de tous les puits testés, avec une espérance $\mu = 1.145$ et une déviation standard $\sigma = 1.045$. Le deuxième mode représente 41.7% de tous les puits, avec une espérance $\mu = 3.933$ et une déviation standard $\sigma = 0.420$. Le troisième mode représente 49.6% de tous les puits, avec une espérance $\mu = 5.154$ et une déviation standard $\sigma = 0.410$. Comme indiqué précédemment, le roc est rarement identifié dans les rapports des foreurs (qui sont les bases du SIH). Par conséquent, on ne peut pas lier précisément chacun des trois modes à chaque sous population des trois types de roc (shale, grès et calcaire). Cependant, dans les Appalaches le shale est considéré comme un aquitard alors que le grès et le calcaire sont considérés comme aquifères. Cela indiquerait que le premier mode des valeurs Q représente les formations de shale alors que les modes 2 et 3 représenteraient les formations de grès et de calcaire, mais dans un ordre qui ne pourra être confirmé que par des études plus précises.

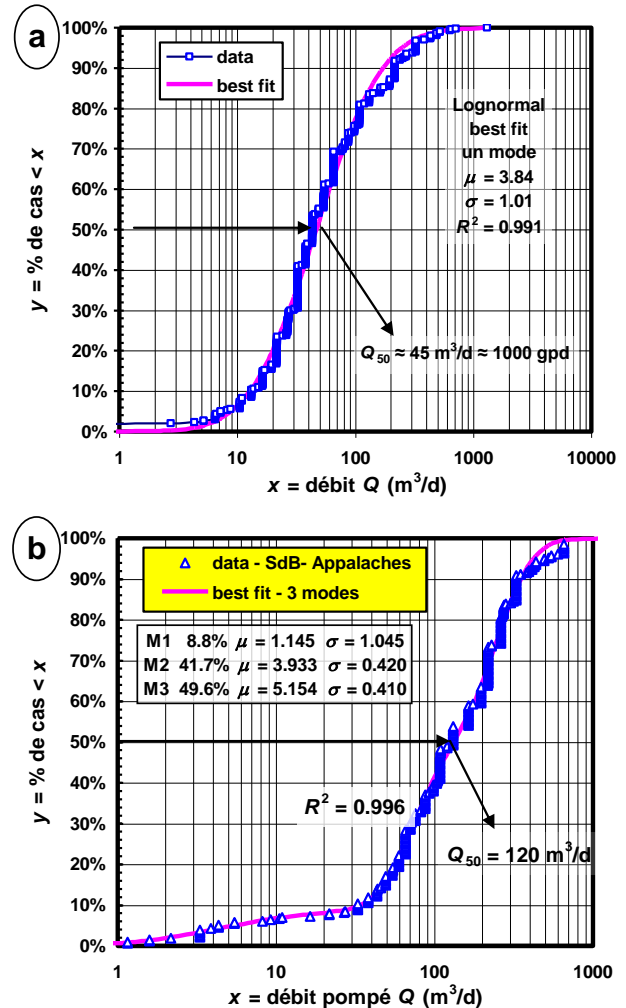


Figure 5. Distribution statistique des valeurs de Q : (a) Saint-Hyacinthe dans les Basses Terres; (b) Salaberry-de-Valleyfield, dans les Appalaches.

L'exemple suivant est instructif pour compléter l'information sur les trois types de roc dans les Appalaches. Le premier auteur a été impliqué dans un projet avec une excavation de 4 m sur quelques milliers de mètres carrés dans les Appalaches. Tous les forages géotechniques ont trouvé une couche de till dense (6 à 12 m d'épaisseur) recouvrant un roc fracturé. Des piézomètres hydrauliques ont été installés dans le roc. Deux d'entre eux coulaient naturellement. Le niveau piézométrique dans le roc était plus élevé que le sommet du tuyau, lui-même au-dessus de la surface du sol. Il y avait de toute évidence un risque d'instabilité du fond de la fouille, mais où ? Partout ou seulement aux emplacements de ces deux piézomètres qui coulaient. Sachant que le shale est un aquitard alors que le grès et le calcaire sont des aquifères, le premier auteur a conclu que seulement deux des piézomètres coulaient parce qu'ils avaient été installés dans des aquifères (à ce stade des études, il était inutile de mettre en cause la qualité des installations des autres piézomètres). Le premier auteur a proposé de clarifier les conditions du roc à l'aide de levés géophysiques. Des levés électriques

ont clairement identifiés les trois types de roc sous le till. La grande excavation a été réalisée avec succès, sans instabilité de son fond, après avoir installé environ trente puits de décharge. Ces puits ont été pompés pendant les travaux d'excavation, de façon à abaisser le niveau de la charge hydraulique dans le roc, et donc la valeur de la pression interstitielle, jusqu'au niveau requis pour assurer la sécurité de l'excavation.

3.3 Efficacité de la méthode de forage

Le SIH indique trois techniques de forage : aux diamants, par percussion (foreuse à câble) et rotary. Ces techniques forent et endommagent le roc de différentes façons et donc, modifient ses caractéristiques hydrauliques près de la paroi forée et tous les résultats des essais de pompage et de perméabilité. L'endommagement dépend de la technique de forage ainsi que du type de roc. Il prend des formes diverses : de nouvelles fractures sont créées, du roc est écrasé, le relâchement des contraintes crée de nouvelles fissures, d'anciennes fissures sont ouvertes et connectées aux nouvelles, des débris sont enlevés ou insérés dans des fissures ouvertes par la circulation des fluides de forage ou de fracturation hydraulique avec des additifs. Il en résulte soit un délavage des fissures, et une augmentation de la perméabilité, soit un colmatage et une diminution de perméabilité. En bref, différentes sortes de dommage sont produites par des interactions solide - solide (outils de forage vs. roc et roc vs. roc) et fluide - solide (fluide de forage ou de fracturation vs. roc).

Il faut noter que les foreurs de puits et les hydrogéologues utilisent surtout des forages destructifs pour les puits de pompage, et qu'ils accordent peu d'attention à l'endommagement dû au forage. À l'opposé, des forages non destructifs sont habituellement choisis par les ingénieurs en géotechnique pour leurs études de terrain, mais eux aussi accordent peu d'attention à l'endommagement dû au forage. Il y a seulement des ingénieurs spécialisés dans les questions environnementales, et ceux qui conçoivent les systèmes de stockage souterrain, qui étudient l'endommagement dû au forage parce que ce dernier menace la sécurité du projet de stockage.

Dans un roc aquifère, le forage endommage une zone annulaire autour du trou. Le dommage peut être bien reçu pour un puits parce qu'il augmente la productivité du puits ainsi que les valeurs apparentes de T et K . Par exemple, Schalla (1986) a constaté que dans une dolomie fracturée, les puits forés par la méthode rotary – eau avaient des valeurs T en moyenne un ordre de grandeur plus basses que les puits forés par la méthode rotary – air.

Les données du SIH ont été analysées pour comparer les trois techniques de forage (diamants, percussion et rotary) dans différents rocs. Dans le shale fracturé de Saint-Hyacinthe, les fractures verticales peuvent causer des instabilités locales des parois forées. Dans cette municipalité, le forage par percussion est le plus efficace pour obtenir une valeur élevée de Q (Fig. 6a), suivi par le forage aux diamants et le forage rotary. Cette information est importante pour les spécialistes qui préparent des travaux d'excavation, mais elle est valide uniquement pour ce site et ce roc aquifère. Une information différente est obtenue pour la municipalité de Stanstead, dans les

Appalaches, où l'on constate que les techniques par percussion et rotary ont des efficacités similaires (Fig. 6b).

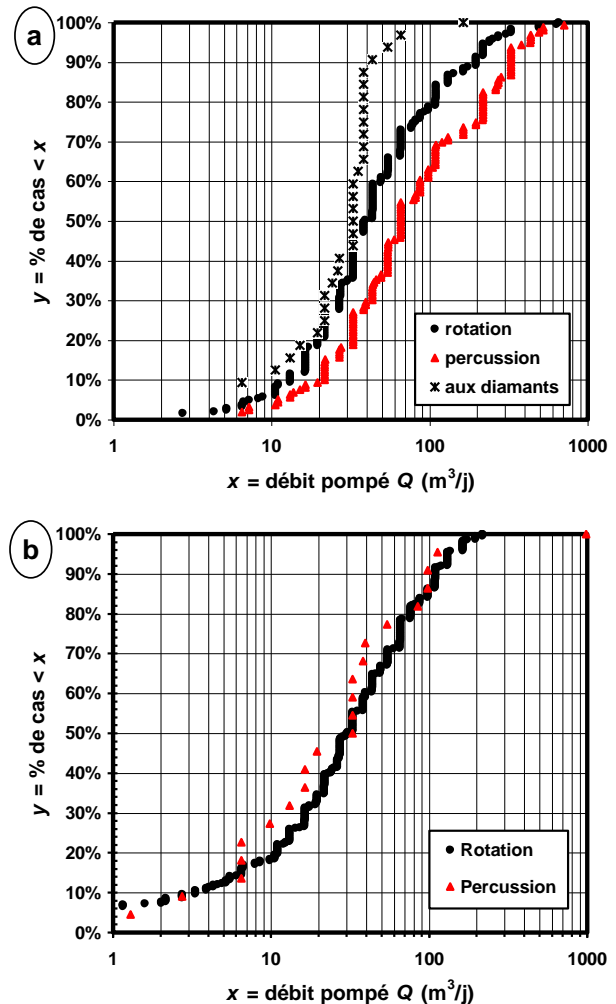


Figure 6. Efficacité relative des méthodes de forage pour atteindre un débit Q : (a) Saint-Hyacinthe dans les Basses Terres; (b) Stanstead dans les Appalaches.

3.4 Dispersion latérale des valeurs Q

La banque de données donne la position des puits (longitude, latitude). On peut analyser la variation de Q dans le plan horizontal. Il apparaît que les valeurs de Q dans le roc ont des variations rapides sur de courtes distances et qu'il n'y a pas de tendance claire.

Avec de tels résultats on peut se demander si on peut utiliser ces données pour faire de la géostatistique. Dans une telle étude, les valeurs tirées des essais de pompage de longue durée forment l'information primaire alors que celles tirées des essais de pompage de courte durée (comme ceux du SIH) sont traitées comme de l'information secondaire. Il y a donc deux niveaux de qualité dans les données. Si la distribution des données dans un volume de roc peut être décrite mathématiquement, la géostatistique permet de compléter les valeurs éparées des don-

nées primaires par les valeurs plus nombreuses mais moins fiables, des données secondaires.

Avec les banques de données, il est difficile de faire une analyse géostatistique qui soit correcte pour estimer la valeur de Q . Il y a plusieurs difficultés. La première vient d'une information incomplète. Dans certains cas, un foreur peut forer plusieurs puits avant de trouver de l'eau en quantité suffisante. Le puits fructueux est enregistré dans la banque de données mais les puits ratés, peu productifs, ne le sont pas. Les foreurs tirent aussi parti de leur expérience locale pour éviter de forer à certains endroits : ils suggèrent à leurs clients d'installer les puits ailleurs sur leur terrain. La deuxième difficulté est liée au biais créé par le désir du futur propriétaire du puits que son puits ait un certain débit. Comme le foreur ne fait pas d'essai à l'air comprimé à des profondeurs intermédiaires, toutes les valeurs de Q en fonction de la profondeur, celles des bases de données, sont biaisées. La troisième difficulté est liée à la forte variabilité de valeurs de Q et de K dans les aquifères de roc fracturé. Pour confirmer cette variabilité, il y a dans le SIH quelques cas de 2 ou 3 puits forés dans le même terrain (même adresse civique, mais des années différentes et généralement des propriétaires différents). Les puits sont proches (1–3 m), et la valeur mesurée de Q augmente depuis le puits le plus ancien jusqu'au dernier puits.

Selon l'expérience, les paramètres hydrauliques dans le roc fracturé donnent des variogrammes de piètre qualité, avec un fort effet de pépité. Cela signifie une forte variabilité à petite échelle ou des erreurs dans les mesures et la localisation. Quant un variogramme à peu près plat, avec un fort effet de pépité, est utilisé pour faire des prédictions, il en résulte une forte incertitude sur les valeurs estimées des paramètres (Razack et Lasm 2006). En général les spécialistes en géostatistique concluent que la variabilité à petite échelle pose un problème trop difficile à prendre en compte dans les études.

Cette grande variabilité amène une autre question : peut-on utiliser la mécanique des milieux continus pour étudier l'écoulement dans un roc fracturé, et dans quelles conditions ? Cette question est trop vaste pour le présent article. Pour simplifier, disons qu'il faut pouvoir définir un RVE (élément de volume représentatif) pour représenter des valeurs moyennées comme le requiert la mécanique des milieux continus. Selon des analyses théoriques, confirmées par des études numériques, la taille du RVE dépend du problème analysé. Le RVE n'a pas la même taille pour la porosité, la granulométrie et le passage de Navier–Stokes à Darcy. Une analyse préliminaire conclut que la plupart des essais de perméabilité et de pompage dans le roc fracturé ne satisfont pas les conditions pour utiliser les équations de mécanique des milieux continus.

4 DISCUSSION

L'objectif principal de l'article était de montrer que les banques de données fournissent des informations essentielles pour des projets d'excavations temporaires ou permanentes. De plus, l'article a accordé beaucoup d'attention aux conditions d'eau souterraine dans le roc fracturé, afin d'éviter les risques de conditions adverses.

Plusieurs informations sont aisément tirées des banques de données et immédiatement rendues utiles pour les ingénieurs et entrepreneurs. La première information est la position des puits au voisinage de l'excavation projetée. La deuxième information est la valeur des débits Q obtenus par des essais de courte durée, qui dépendent de la longueur forée dans le roc. La troisième information est que dans les zones densément peuplées du Québec, les débits extraits du roc fracturé sont fortement variables, même à l'échelle de quelques mètres.

On trouve que la distribution des valeurs de Q semble suivre une loi lognormale, ou la somme de quelques lois lognormales, avec un seul mode pour un roc aquifère et trois modes pour une municipalité avec trois types de roc. Les données mesurées de Q suivent une équation théorique avec un $R^2 > 0.99$, ce qui est excellent. Les exemples fournis indiquent que la distribution des valeurs de Q ajoute une information majeure à un rapport technique, et fournit une information importante à l'entrepreneur pour des excavations projetées.

On trouve aussi que la méthode de forage influence la valeur obtenue pour Q dans un roc aquifère, ce qui est utile pour un entrepreneur. Cette influence de la méthode de forage dépend du type de roc.

Toute l'information trouvée est importante et utile pour les ingénieurs et les entrepreneurs. L'information obtenue sur la forte variabilité des paramètres hydrauliques dans le roc, même à petite échelle, et leur faible corrélation spatiale, pourrait être aussi un apport utile à la recherche sur les écoulements en milieux fracturés.

5 CONCLUSION

Cet article a examiné comment utiliser les banques de données sur les puits et bonifier les études géotechniques pour tous les projets qui prévoient des travaux d'assèchement dans des excavations temporaires ou permanentes. En général, les études géotechniques n'incluent pas un essai de pompage mais les données des essais de pompage proches du projet sont généralement connues.

L'étude géotechnique d'un site peut être complétée par les données des banques de puits. Les informations de celles-ci sont souvent inutilisées par les ingénieurs et entrepreneurs, en particulier les débits pompés aux puits proches du projet.

Il existe plusieurs méthodes fiables pour prédire la valeur K des sols in situ. Cette prédiction est plus difficile pour le roc fracturé où K peut être très variable localement et où les valeurs constatées par les débits entrant dans les excavations sont fréquemment peu reliées aux valeurs estimées dans les forages d'exploration,

Cet article a donné des exemples de statistiques pour les valeurs du débit pompé Q dans les puits existants, et pour la performance relative des techniques de forage dans le roc, une performance qui dépend du type de roc. Ces exemples montrent que les ingénieurs et entrepreneurs peuvent analyser les données des banques des puits pour en tirer des informations sur les débits anticipés dans des puits forés dans le roc, et mieux examiner les risques d'instabilité. Comme des excavations sèches et stables sont requises pour des projets de construction, il

faut insister sur le besoin d'un ingénieur spécialisé en eaux souterraines, de façon à bien compléter une étude géotechnique, et faire adéquatement les analyses des risques d'instabilité des parois et du fond des excavations.

6 REMERCIEMENTS

Cet article résulte d'une longue expérience pratique des travaux d'excavations, couplée avec une longue activité de recherche personnelle qui n'a reçu ni aide financière ni subvention d'organismes subventionnaires dans les trois domaines, public, privé, et des secteurs à but non lucratif.

7 RÉFÉRENCES

- Berkowitz B. 2002. Characterizing flow and transport in fractured geological media: a review. *Advances in Water Res.* **25**(8-12): PII S0309-1708(02)00042-8.
- Brown RH. 1963. Estimating the transmissivity of an artesian aquifer from the specific capacity of a well. *USGS Water-Supply Paper 1536-I*, pp. 336–338.
- Chapuis RP. 2004. Predicting the saturated hydraulic conductivity of sand and gravel using effective diameter and void ratio. *Can. Geotech. J.* **41**(5): 787–795.
- Chapuis RP. 2012a. Predicting the saturated hydraulic conductivity of soils: a review. *Bull. Eng. Geology and the Environ.* **71**(3): 401–434.
- Chapuis RP. 2012b. Estimating the in situ porosity of sandy soils sampled in boreholes. *Eng. Geology* **141-142**: 57–64.
- Chapuis RP. 2013. Permeability scale effects in sandy aquifers: a few case studies. *Proc. 18th ICSMGE, Paris, 2013*, Vol. 1, pp. 507–510.
- Chapuis RP. 2016a. Proof of multiplicity of solutions for groundwater seepage in recharged heterogeneous unconfined aquifers. *Int. J. Num. Anal. Methods in Geomech.* **40**(14): 1988–2002.
- Chapuis RP. 2016b. *Extracting information from grain size distribution curves*. Geotics Editions, Montréal, Can:
- Chapuis RP. 2019a. Disagreeing evaluations for slug tests in monitoring wells: the importance of standards. *Geotech. Testing J.* **42**(5): 1246–1273.
- Chapuis RP. 2019b. Tracer tests in stratified alluvial aquifers: predictions of effective porosity and longitudinal dispersivity versus field values. *Geotech. Testing J.* **42**(2): 407–432.
- Chapuis RP, Aubertin M. 2003. On the use of the Kozeny–Carman's equation to predict the hydraulic conductivity of a soil. *Can. Geotech. J.* **40**(3): 616–628.
- Chapuis RP, Légaré PP. 1992. A simple method for determining the surface area of fine aggregates and fillers in bituminous mixtures. *ASTM STP 1147*, pp.177–186.
- Chapuis RP, Baass K, Davenne L. 1989. Granular soils in rigid-wall permeameters: method for determining the degree of saturation. *Can. Geotech. J.* **26**(1): 71–79.
- Chapuis RP, Dallaire V, Saucier A. 2014. Getting information from modal decomposition of grain size distribution curves. *Geotech. Testing J.* **37**(2): 282–295.
- Chapuis RP, Keilani A, Cardinal G. 1991. Pumping more than 100 m³/min from excavations in open-air amphitheatres in the city of Quebec. *Can. J. of Civil Eng.* **18**(5): 875-881.
- Chapuis RP, Weber S, Duhaime F. 2015. Permeability tests results with packed spheres and non-plastic soils. *Geotech. Testing J.* **38**(6): 950–964.
- Coli N, Pranzini G, Alfi A, Boerio V. 2008. Evaluation of rock-mass permeability tensor and prediction of tunnel inflows by means of geostructural surveys and finite element seepage analysis. *Eng. Geology* **101** (3-4): 174–184.
- Cooper, HH Jr, Jacob CE. 1946. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history. *Trans. Am. Geophys. Union* **27**(4): 526–534.
- Duhaime F, Benabdallah EM, Chapuis RP. 2013. The Lachenaie clay deposit: some geochemical and geotechnical properties in relation with the salt leaching process. *Can. Geotech. J.* **50**(3): 311–325.
- Environnement Québec. 2019. *Système d'information hydrogéologique*. [Accédé en Août 2019].
- Hazen, A. 1892. Some physical properties of sand and gravel, with special reference to their use in filtration. *Massachusetts State Board of Health, 24th Annual Report*, 539–556. Boston, MA.
- Kayabasi A, Yesiloglu-Gultekin N, Gokceoglu C. 2015. Use of non-linear prediction tools to assess rock mass permeability using various discontinuity parameters. *Eng. Geology* **185**: 1–9.
- Mace RE. 1997. Determination of transmissivity from specific capacity tests in a karst aquifer. *Ground Water* **35**(5): 738–742.
- NAVFAC DM7. 1974. *Design Manual - Soil Mechanics, Foundations, and Earth Structures*. Washington, DC: U.S. Government Printing Office.
- Razack M, et Huntley D. 1991. Assessing transmissivity from specific capacity in a large and heterogeneous alluvial aquifer. *Ground Water* **29**(6): 856–861.
- Schalla, R. 1986. Comparison of the effects of rotary wash and air rotary drilling techniques on pumping test results. No. PNL-SA-13957; CONF-8605159-1, Pacific Northwest Laboratory, Richland WA (USA).
- Shahbazi A, Saeidi A, Chesnaux R. 2020. A review of existing methods used to evaluate the hydraulic conductivity of a fractured rock mass. *Eng. Geology* **265**: 105438.
- Taylor, D.W. 1948. *Fundamentals of Soil Mechanics*. Wiley, New York, NY.
- Theis CV. 1935. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. *Trans. Am. Geophys. Union* **16**(2t): 519–524.
- Theis CV. 1963. Estimating the transmissibility of a water-table aquifer from the specific capacity of a well. *USGS Water-Supply Paper 1536-I*, US Gov. Printing Office, Washington, pp. 332–336.
- Thomasson HJ, Olmstead FH, LeRoux ER. 1960. Geology, water resources, and usable ground water storage capacity of part of Solano County, CA. *USGS Water Supply Paper 1464*, 93 p., Reston, VA.