

Échanges nappe-rivière dans la zone de recharge du mont Covey-Hill (Québec, Canada)



Gagné, S.

Centre de recherche pour l'Étude et la Simulation du Climat à l'Échelle Régionale, Département des sciences de la Terre et de l'atmosphère, Université du Québec à Montréal, Québec, Canada

Larocque, M.¹ and Pellerin, S.²

¹ UQAM, Montréal, QC

² IRBV, Jardin botanique de Montréal, Montréal, QC

RÉSUMÉ

Une étude a été réalisée sur le mont Covey Hill (Québec, Canada) afin de quantifier les échanges nappe/rivières. La quantification du débit de base par un filtre digital et la méthode du 90^e percentile montre une différence de 50% entre les deux méthodes. Les analyses géochimiques confirment que les deux rivières sont alimentées par l'aquifère. L'alimentation en eau souterraine se produit surtout dans la zone amont de la rivière Allen et dans la section aval de la rivière Outardes. L'analyse corrélatoire croisée des séries temporelles révèle que l'effet d'un événement hydrologique est très fortement atténué après dix jours sur les deux rivières.

ABSTRACT

The study was performed on Covey Hill (Québec, Canada). The objective was to quantify aquifer-river exchanges. Baseflow quantification by a digital filter and the 90th percentile method show difference up to 50% between both methods. Geochemical analyses confirm that both rivers receive water from the aquifer. This contribution comes mostly from the uphill portion of the Allen River while the Outardes River is fed by the aquifer in its downhill portion. Cross-correlation analyses of time series show that the effect of a hydrological event is highly attenuated after ten days for both rivers.

1. INTRODUCTION

L'étude des échanges nappe-rivière est devenue une composante essentielle de la caractérisation hydrogéologique des bassins versants (Hayashi et Rosenberry, 2002). La recherche dans ce domaine porte le plus souvent sur le rôle de la zone riparienne ou de l'écoulement hyporhéique dans des milieux poreux (Hayashi et Rosenberry, 2002). La compréhension des interactions entre les eaux souterraines et de surface en milieu fracturé demeure quant à elle incomplète. La difficulté d'appliquer dans les milieux fracturés les équations des milieux continus est en partie responsable de cette lacune.

La différence de charge entre l'aquifère et le cours d'eau est habituellement utilisée pour quantifier les flux échangés entre un aquifère et la surface, selon l'équation de Darcy (Rushton et Tomlinson, 1979). Cette technique suppose que le milieu soit homogène et poreux, des conditions souvent non rencontrées dans la pratique. La séparation d'hydrogrammes par les méthodes géochimiques est une autre méthode pour quantifier la contribution de sources souterraines et hypodermiques à un cours d'eau. La représentativité des résultats obtenus par ces méthodes demeure cependant contestée. Les travaux de Jones et al. (2006) et de Rice et Hornberger (1998) ont montrés la nécessité de coupler les mesures géochimiques aux mesure hydrogéologiques et

hydrologiques. L'analyse des séries temporelles est souvent utilisée pour étudier les échanges nappe-rivière en milieu karstique (Larocque et al. 1998; Bailly-Compte et al. 2008) mais peu de travaux ont utilisées cette méthode en milieu fracturé.

L'objectif de cette étude est de déterminer la contribution de l'aquifère à deux cours d'eau ainsi que la localisation des zones de décharge dans le Laboratoire naturel du mont Covey Hill, un site expérimental instrumenté pour le suivi hydrologique à long terme et situé sur le bassin de la rivière Châteauguay dans le sud-ouest du Québec. La séparation de l'hydrogramme, la géochimie de l'eau (ions majeurs et ²²²Ra) et l'analyse des séries temporelles sont mises en œuvre pour mieux comprendre ces échanges.

2. SITE D'ÉTUDE

Depuis quelques années, plusieurs travaux de recherche ont été réalisés sur le bassin de la rivière Châteauguay et au Laboratoire naturel du Mont Covey Hill (Figure 1) (Larocque et al. 2006) À titre d'exemple, la recharge a été calculée par Croteau (2006), l'hydrogéologie du roc fracturé par Nastev et al. (2008), le rôle hydrologique de la tourbière du mont Covey Hill été défini par Fournier (2008), et une datation des dépôt organique de la tourbière à été réalisée par Pellerin et al. (2009). Le mont Covey Hill couvre une superficie approximative de

2. Les barres d'erreur représentent une erreur théorique de 15% basée sur les travaux de Carter et Anderson (1963). Aucune mesure n'a pu être faite pour des valeurs de débit supérieures à 5m³/s et 2,5m³/s pour les rivières Allen et Outardes respectivement. Les valeurs élevées des corrélations pour les deux régressions diminuent grandement l'incertitude sur les valeurs extrêmes. De plus les deux stations sont situées sous un pont. La section où les mesures de débits et de niveaux sont prises est rectangulaire ce qui diminue les possibilités de non-linéarité de la relation H/Q.

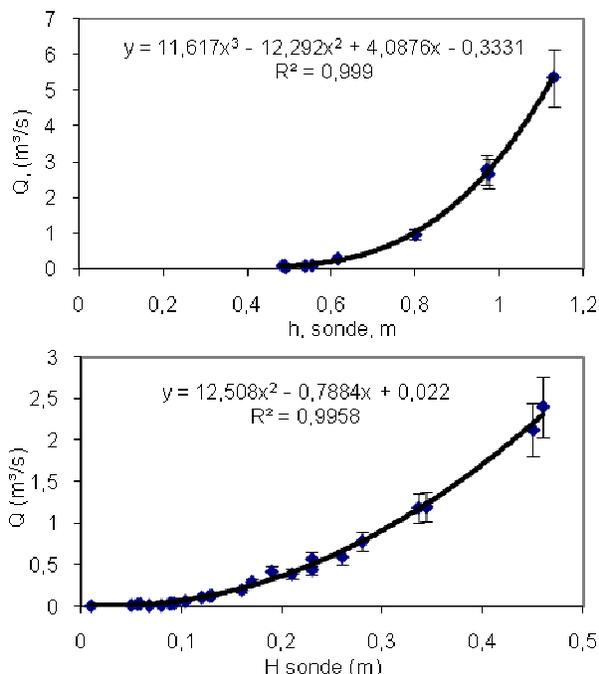


Figure 2 : Courbe de tarage pour les stations exutoire AI7 (haut) et Out4 (bas).

Les séries temporelles de débits ont été calculées à partir des équations de régression de la figure 2.

La figure 3 montre une réaction typique des deux bassins versant étudiés à une précipitation en période d'été (6 août 2008). Sur la rivière Outardes, la réaction du cours d'eau est rapide avec des débits de pointe jusqu'à cinq fois supérieurs à ceux de la rivière Allen. La différence de superficie (4km²) entre les bassins versant est trop faible pour expliquer cette différence. Le comportement hydrologique de la rivière Allen est plutôt caractérisé par une forte infiltration. De plus, seulement une faible partie du volume d'eau infiltré retourne au cours d'eau. En effet, pour un même volume de précipitations, les débits durant la période de décrue sont très inférieurs à ceux de la rivière Outardes.

Durant la période d'étude, le ratio débit total/précipitation est en moyenne de 27% et 51% pour les rivières Allen et Outardes respectivement, ce qui confirme l'importance de l'infiltration sur le bassin versant Allen.

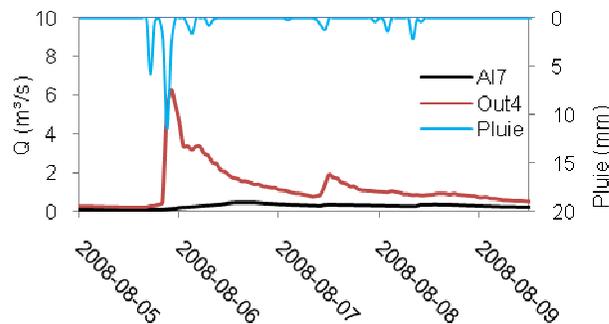


Figure3 : Comparaison des débits et des précipitations horaires pour les stations AI7 et Out2 lors d'un événement pluvieux.

Les résultats indiquent une contribution plus importante du débit de base sur la rivière Outardes pour les deux méthodes de calcul (Figure 4).

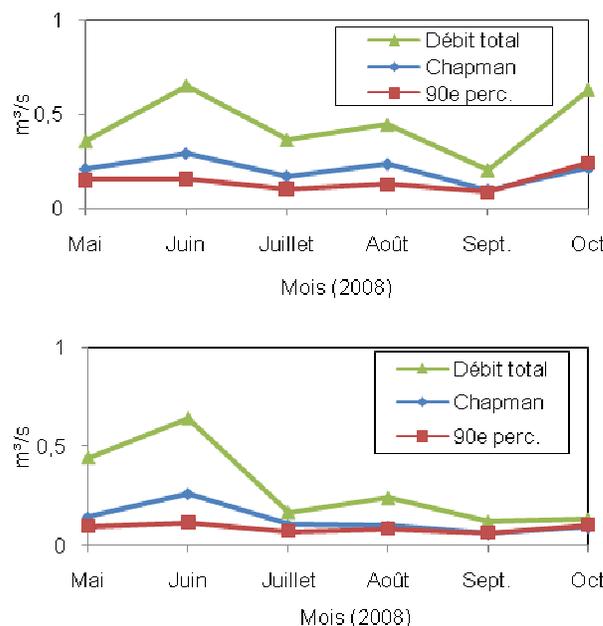


Figure 4 : Débit moyen mensuel débit de base mensuel calculé par le filtre de Chapman et la valeur mensuelle du 90^e percentile.

Le mois de juillet ayant été particulièrement sec, la méthode du Q90 tant à surestimer le débit de base. Le débit de base moyen pour les rivières Outardes et Allen est plus élevée (0,210m³/s et 0,121m³/s) pour la méthode Chapman que pour la méthode Q90 (0,144m³/s et 0,088m³/s).

Malgré cette exception, les débits de base calculés par le filtre de Chapman sont en moyenne 50% supérieure à la méthode des Q90. Cette différence s'explique par le fait que le débit de base estimé par la méthode de Chapman pendant l'événement pluvieux intègre à la fois l'écoulement hypodermique et la contribution de l'aquifère tandis que le Q90 représente la contribution strictement souterraine aux débits en rivière.

La mesure de débit dans l'axe amont-aval des cours d'eau a permis d'identifier les zones de contribution de l'aquifère aux cours d'eau. En période d'étiage (29 août 2009, 10 jours consécutifs sans pluie), l'évolution longitudinale du débit est très contrastée entre les deux rivières (Figure 3.)

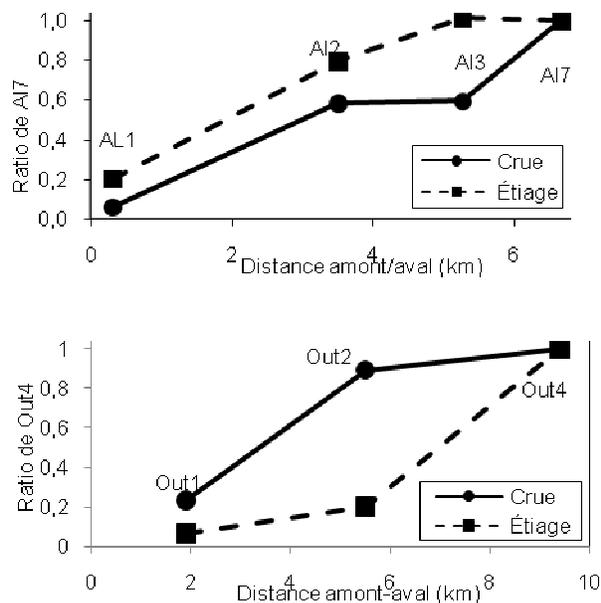


Figure 5: Évolution amont-aval des débits de la rivière Allen (haut) et Outardes (bas).

Sur la rivière Allen la majorité du volume d'eau s'accumule en amont de la station AI3 tandis que sur la rivière Outardes, cette zone est plutôt située en dans la section aval du bassin-versant (Figure 4). En période de crue (4 juin 2008, 12h après une précipitation), l'augmentation du débit se fait de façon presque linéaire sur la rivière Allen. Le plateau entre les stations AI2 et AI3 est lié à la difficulté d'estimer le débit du deuxième cours d'eau qui se jette dans le lac Enchanté situé entre les stations AI2 et AI3 (Figure 1). Les valeurs de débits manquantes proviennent des travaux de Barrington (1997). Ces dernières sont sommaires et ne permettent pas de fixer des valeurs précises au débit entrant dans le lac. Le ruissellement sur la rivière Outardes est plutôt localisé en amont du bassin-versant là où la majorité des cours d'eau non permanents sont situés.

4.2 Géochimie.

Le pH de l'eau souterraine varie de 4,5 à 7,5 tandis que celui des cours d'eau se situe entre 5,7 et 8. La conductivité électrique de l'eau souterraine varie de 38 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 369 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et celle des cours d'eau entre 45 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 148 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Le calcium (Ca^{2+}) est le principal cation et le principal anion est l'ion carbonate (HCO_3^-) à la fois pour l'eau souterraine et l'eau de surface. Cette composition est caractéristique de la zone de recharge du bassin versant de la rivière Châteauguay (Nastev et al. 2008). En général, les concentrations en ions augmentent du sommet vers la base du mont Covey Hill et les puits

forés dans les sédiments présentent des concentrations plus élevées que ceux forés dans le grès (Tableau 1).

Tableau 1 : Solide totaux dissout (STD) (valeurs moyennes pour les puits et valeurs mesurés lors de l'échantillonnage du ^{222}Ra) ^{222}Ra et profondeur pour différents puits et cours d'eau du site d'études.

Type	Station	STD ($\mu\text{Mol}/\text{L}$)	^{222}Ra (Bcq/L)	Pofondeur (m)
Forages sédiments	P5S	2691	12,400	10
	P10S	2301	8,400	4
Forages roc	P1R	204	29,400	8
	P7R	657	40,000	15
	P9R	1138	66,800	90
	P10R	912	57,900	90
	CNC_s	142	21,800	5
Résurgence	R1	476	9,300	0
Cours d'eau	Out1	70	0,096	0
	Out2	113	0,247	0
	Out4	160	0,123	0
	AI1	183	0,421	0
	AI2	328	0,332	0
	AI3	458	0,090	0
	AI7	511	0,089	0

La composition chimique de l'eau de l'aquifère fracturé est principalement influencée par la présence de calcite et de dolomite dans le grès qui composent moins de 2% de la minéralogie (Globensky, 1986). Les concentrations plus élevées dans l'aquifère sédimentaire sont dues à l'altération des dépôts Quaternaires (till et sédiments littoraux) qui sont typiquement carbonatés dans cette régions (Tremblay, 2008). Les concentrations en ^{222}Ra sont inverses aux STD. La source du ^{222}Ra étant le socle pré-cambrien sous-jacent, l'aquifère de surface s'appauvrit rapidement par dégazage du gaz radioactif.

Sur les rivières Outardes et Allen les concentrations suivent une augmentation linéaire avec la distance vers l'aval. Les valeurs maximales sont mesurées en période d'étiage tandis qu'en période de crue les concentrations en ions diminuent substantiellement sous l'effet de la dilution par l'eau de pluie. Les concentrations atteignent des valeurs maximales plus élevées sur la rivière Outardes et l'effet de dilution y est aussi plus marqué. Le pic observé à la station Out2 en période de ruissellement est causé par une augmentation en sodium (Na^+) accumulé durant les périodes sèches dans un étang situé juste en amont de la station.

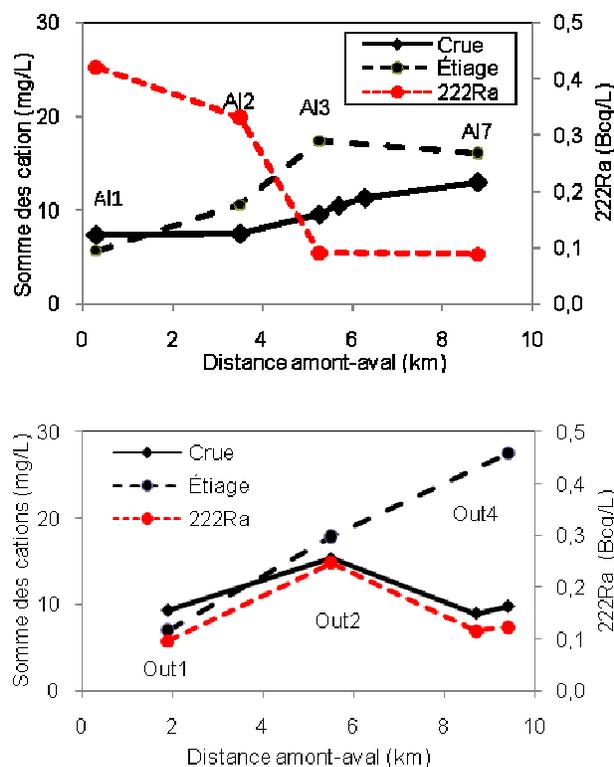


Figure 6. Concentrations en cations en période d'étiage et de crue (ordonnée de droite) et concentration en ^{222}Ra (ordonnée de gauche) des rivières Allen (haut) et Outardes (bas).

Le temps de résidence du ^{222}Ra dans l'eau de surface est court car le dégazage est important surtout lorsque le cours d'eau comporte plusieurs rapides et est peu profond, ce qui est le cas pour les deux cours d'eau étudiés. Cette propriété du ^{222}Ra permet d'utiliser ce traceur pour identifier des zones précises de décharges de l'aquifère dans un cours d'eau (Cook et al. 2006). L'échantillonnage du ^{222}Ra a été réalisé en période de haut débit (trois jours après une précipitation de 95 mm) ce qui limite la représentativité des résultats en ce qui attrait aux débits de base. Des valeurs inférieures à 0,2 Bq/L représentent le bruit de fond.

Sur la rivière Outardes, les concentrations en ^{222}Ra , bien que faibles, suivent les teneurs en cations (Figure 5). Les concentrations ne dépassant pas 0,2 BCq/L, il est impossible de déterminer si, durant les périodes de crue, l'aquifère contribue au débit. Sur la rivière Allen, des valeurs significatives sont observées dans la portion amont du cours d'eau et suivent une tendance inverse aux teneurs en cations. Ces résultats montrent que la rivière est alimentée par différentes sources de l'amont vers l'aval. En amont, il semble que l'aquifère du roc contribue au débit (haute teneur en ^{222}Ra , faible concentration en cations). Vers l'aval, il s'agit plutôt une source appauvrit en ^{222}Ra et enrichie en cations

La comparaison des ratios molaires Ca/Na et de l'eau de l'aquifère et l'eau des cours d'eau permet d'identifier l'origine de la composition chimique de l'eau de surface. La Figure 6 montre la comparaison entre les ratios Ca/Na

mesurés dans l'eau souterraine et dans les cours d'eau (il est important de noter la différence d'échelle sur les ordonnées des deux figures).

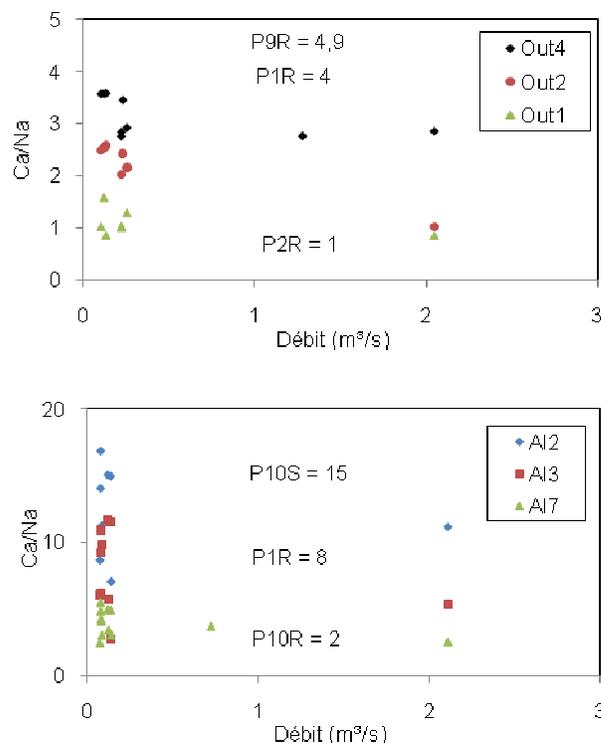


Figure 7: Ratio molaires Ca/Na de l'eau des rivières Outardes (haut) et Allen (bas) en fonction du débit. Les ratios Ca/Na moyens observés dans l'eau souterraine sont indiqués au centre de chaque figure.

Pour chaque station, le groupe de points ayant des ratios plus faibles correspond aux échantillons récoltés en période de crue ou de récession et les ratios plus élevés en périodes d'étiages. Sur la rivière Outardes, les ratios observés ne varient pas de façon significative selon le régime hydrique ce qui indique qu'il n'y a pas plusieurs sources qui alimentent le cours d'eau. Les ratios mesurés s'orientent sur une droite entre la composition du roc fracturé (P9R) et celle des précipitations (Ca/Na : 1,5, NATCHEM 2007). La valeur du puits P9R n'est pas atteinte car l'eau qui arrive de l'amont à un effet de dilution sur la composition de l'eau provenant de l'aquifère. En effet, l'eau qui provient de l'exutoire de la tourbière à un ratio Ca/Na de 1,3, ce qui entraîne aussi un effet de dilution semblable à celui de la pluie en période d'étiage. L'eau de la rivière Outarde acquiert graduellement, le long de son parcours, la signature de l'eau du roc fracturé.

Sur la rivière Allen, les ratios couvrent une plus grande gamme de valeurs indiquant une variabilité des sources d'eau souterraine sur ce cours d'eau. En amont, les ratios indiquent une origine carbonatée indiquant l'influence de l'eau s'écoulant à travers les sédiments. Vers l'aval, l'eau acquiert une composition plus silicatée. Le ratio Ca/Na

diminue mais seulement par l'augmentation des concentrations en Na plus importante que celles en Ca. Des valeurs plus faibles sont observées en période de crues printanière mais elles sont dues à la dilution par l'eau arrivant des zones amont. La signature de l'eau à la station AI2 correspond à l'eau contenue dans les sédiments. Les observations faites sur le terrain confirment que plusieurs résurgences s'écoulent à travers le till de surfaces. La composition chimique de cette eau est donc un mélange entre l'eau du roc et celle des sédiments. Entre les stations AI3 et AI7, l'eau de surface est influencée par les faibles ratios de l'aquifère du roc. Il y a donc un certain apport d'eau souterraine dans cette section du cours d'eau.

4.3 Corrélations croisées.

Dans cette étude, l'aspect dynamique du système hydrologique et des échanges nappe-rivière a aussi été considéré. L'analyse par corrélation croisée permet d'obtenir de l'information sur l'effet d'un événement pluvieux sur le système étudié.

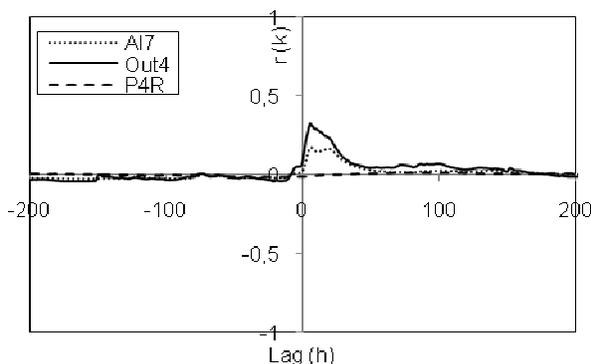


Figure 8 : Corrélogramme croisée entre la pluie, les stations exutoires AI7 et Out4 et le puits P4R. L'abscisse représente le coefficient de corrélation.

Les résultats de l'analyse par corrélation croisée entre la pluie horaire et le niveau piézométrique du puits P4R ainsi que des débits aux stations AI7 et Out4 sont montrés à la figure 8. Les temps de réaction des deux rivières sont semblables (Allen = 5 h, Outardes = 6 h). La principale différence se situe au niveau de l'intensité de la réaction. La valeur maximale de corrélation est de 0,32 pour la rivière Outardes et de 0,18 pour la rivière Allen. La durée d'un événement est égale pour les deux cours d'eau bien que sur la rivière Outardes, l'atténuation du signal s'arrête pour se stabiliser deux jours après la précipitation. Ce phénomène est attribué à la contribution de l'aquifère à la rivière Outardes. Pour les cours d'eau, l'effet d'un événement est fortement atténué après dix jours (200 h), i.e le système est très dynamique et réagit rapidement aux événements. L'aquifère ne réagit que très faiblement aux précipitations. Bien que cette réaction soit faible, le bris de pente de la réaction des cours d'eau correspond à la réaction maximale de la nappe phréatique. Il n'y a donc pas d'augmentation rapide et marquée des niveaux de la nappe pendant un événement

pluvieux. Cette observation est une indication que les débits de base plus importants obtenus par le filtre de Chapman au cours des événements pluvieux ne proviennent pas d'une augmentation rapide de la contribution de l'aquifère fracturé.

5. CONCLUSION

La combinaison d'analyses géochimiques et hydrologiques a permis de déterminer la contribution de l'aquifère aux cours d'eau du site d'étude. Le filtre de Chapman et la méthode du 90^e percentile donnent des résultats du même ordre de grandeur. En général, la rivière Outardes est plus alimentée par l'aquifère que la rivière Allen. Durant les périodes d'étiage, la zone de décharge est principalement située dans la section amont du bassin versant de la rivière Allen tandis que sur la rivière Outardes, elle est plutôt localisée dans la section aval. L'analyse géochimique confirme les résultats des analyses hydrologiques. Les deux rivières sont alimentées par l'aquifère du roc fracturé. L'aquifère présente dans les sédiments de surface à la base des deux bassins versants ne semble pas influencer la composition chimique des deux cours d'eau.

D'un point de vue géochimique, la différence spatiale de la contribution de la nappe est aussi identifiable. Pour les deux cours d'eau, la présence de lac et de tourbière en amont des bassins versants limite les possibilités d'assèchement des sections amont des cours d'eau. La dynamique hydrologique des deux cours d'eau est similaire. Le ruissellement de surface est par contre plus important sur la rivière Outardes. Le lien entre les précipitations et l'aquifère est faible mais l'analyse de ces résultats doit être poussé plus loin car il n'est pas clair si des valeurs de corrélation aussi faible sont significatifs.

Afin d'approfondir les connaissances sur ce site d'étude, une modélisation des écoulements souterrains en régime transitoire est présentement en cours. Les résultats permettront de mieux identifier la distribution spatiale des zones d'échange nappe-rivière et de simuler différentes perturbation naturelles et anthropiques.

REMERCIEMENTS

Cette recherche a été financée par le FQRNT et le CRSNG. Les auteurs désirent remercier Conservation de la nature Canada ainsi que tous les résidents du mont Covey Hill pour avoir autorisé l'accès à leurs propriétés.

RÉFÉRENCES

- Anderson, T.W. 1971. *The Statistical Analysis of Time Series*, New York: John Wiley and Sons.
- Bailly-Compte, V. Jourde, H. Roesch, A. Pistre, S. Bathiot-Guilhe, C. 2008. *Journal of hydrology*. 349 : 98-114.
- Barrington, S.B. 1992. An evaluation of the water reserve potentials: The ecological region of the Covey-Hill

- 'Gulf'. Rapport présenté à: Conservation de la Nature Canada. 43p.
- Carter, R.W. Anderson, I.E. 1963. Accuracy of current meter measurements. *J. Hydraulics Division, Proc ASCE* 4(1):105-115.
- Chapman T. 1999. A comparison of algorithms for stream flow recession and base flow separation, *Hydrological Processes*, 13: 701-714.
- Croteau, A. 2006. Détermination de la distribution spatiale et temporelle de la recharge à l'aquifère régionale transfrontalier du bassin versant de la rivière Châteauguay Québec et États-Unis. *Mémoire de Maîtrise présenté à l'INRS Eau Terre et Environnement*. 311p.
- Cook, P.G. Lamontagne, D. Berthane, D. Clark J.F. 2006. Quantifying groundwater discharge to Cockburn River, southeastern Australia, using dissolved gas tracers ²²²Ra and SF⁶. *Water Resources Research*. 42: W10411.
- Fournier V. 2007. Hydrologie de la tourbière du mont Covey-Hill et implications pour la conservation. *Mémoire de Maîtrise présenté à l'UQAM*. 93p.
- Globensky, Y. 1986. Géologie de la région de Saint-Chrysostome et de Lachine (sud). *Ministère de l'énergie et des ressources*. 166 p.
- Hayashi, M. Rosenberry, D.O. 2002. Effect of groundwater exchange on the hydrology and ecology of surface water. *Ground Water*. 40-3: 309-316.
- Jones, J.P. Sudicky, E.A. Brookfield, A.E. Park, Y.-J. 2006. An assessment of the tracer-based approach to quantifying groundwater contribution to streamflow. *Water Resources Research*. 42: W02407.
- Larocque M., Leroux G., Madramootoo C., Lapointe F.J., Pellerin S., Bonin J. (2006) Mise en place d'un laboratoire naturel sur le mont Covey Hill (Québec, Canada). *VertigO* 7(1):1-11.
- Larocque M., Mangin A., Razack M. Banton, O. (1998) Contribution of correlation and spectral analyses to the regional study of a large karst aquifer (Charente, France). *Journal of Hydrology* 205:217-231.
- Leany F. W. Andrew L. Herczeg A.L. 2006. A rapid field extraction method for determination of radon-222 in natural waters by liquid scintillation counting. *Limnology and Oceanography, Methods* 4 : 254-259.
- NATCHEM (National Atmospheric Chemical Database) 2007. www.on.ec.gc.ca/NatChem/
- Nastev, M. Morin, R. Godin, R. Rouleau, A. 2008. Developing conceptual hydrogeological model for Potsdam sandstones in southwestern Quebec, Canada. *Hydrogeology Journal*. 16: 373-388.
- Pellerin, S., Lagneau, L.A., Lavoie M., Larocque M. (2009) Environmental factors explaining vegetation patterns in a temperate peatland. *C.R. Acad. Sci. Biologie*. Sous presse.
- Rice, K.C. Hornberger, G.M. 1998. Comparison of hydrochemical tracers to estimate source contribution to peak flow in small, forested, headwater catchment. *Water Resources Research*. 34-7: 1755-1766.
- Rushton, K.R. Tomlinson, L.M. 1979. Possible mechanisms for leakage between aquifer and rivers. *Journal of Hydrology*. 40: 40-49.
- Tremblay, T. (2008) Hydrostratigraphie et géologie du quaternaire dans le bassin-versant de la rivière Châteauguay, Québec. *Mémoire de Maîtrise présenté à l'UQAM*.