

DÉTERMINATION DES DIRECTIONS D'ÉCOULEMENT SOUTERRAIN SUR LE BASSIN DE LA RIVIÈRE NOIRE (QUÉBEC, CANADA)

Larocque, M., Dép. Sci. de la Terre et de l'Atmosphère, Univ. du Québec à Montréal, Montréal, Québec
Pharand, M.C., Dép. Sci. de la Terre et de l'Atmosphère, Univ. du Québec à Montréal, Montréal, Québec

ABSTRACT

The Noire River is a sub-basin of the Yamaska River, located between the St-Lawrence Low Lands and the Appalachians. The Noire River lies over a fractured rock aquifer where quaternary deposits are thin and discontinuous. This rural region is intensively exploited by farming activities and has a high potential of contamination by agricultural practices. The objective of this work is to test two approaches for the delineation of sub-aquifers in the Noire River watershed. A piezometric map was drawn for the basin, using field measurements and information from data bases, to identify local and regional scale flow directions as they are influenced by geology, topography and hydrology. Water samples were collected and analyzed for electrical conductivity, nitrate concentrations and stable isotopes (O^{18} and deuterium). Analysis of the geochemical data were useful to identify regional scale flow directions.

RÉSUMÉ

La rivière Noire est un sous-bassin de la rivière Yamaska, situé à la limite des Basses-Terres du Saint-Laurent et des Appalaches. Le bassin de la rivière Noire est situé sur un socle rocheux fracturé où les dépôts meubles sont discontinus et de faible épaisseur. Cette région fortement exploitée par l'agriculture et l'élevage présente un risque de contamination de la nappe par des sources agricoles. L'objectif de ce travail est de tester deux approches pour délimiter les sous-aquifères sur le bassin de la rivière Noire. Le tracé de la carte piézométrique a permis d'identifier les directions d'écoulement souterrain selon la géologie, la topographie et l'hydrologie, à l'échelle locale et régionale. Des échantillons d'eau souterraine ont été recueillis et analysés pour leur conductivité électrique, leur concentration en nitrates et leur teneurs en ^{18}O et deutérium. Les résultats de l'analyse géochimique ont permis de mettre en évidence la direction régionale de l'écoulement souterrain.

1. INTRODUCTION

Des études récentes montrent que la rivière Yamaska est parmi les affluents du Saint-Laurent les plus contaminés par les activités agricoles (BAPE, 2000). L'intensification de la production de maïs et de l'élevage porcin impose des pressions importantes sur les ressources en eau de la région. Dans les Basses-Terres du Saint-Laurent, l'aquifère ne connaît pas de réelles limites physiques et s'étend des Appalaches jusqu'au Saint-Laurent. Les directions locales d'écoulement sont influencées par la géologie, la topographie et l'hydrologie, et sont souvent très variables dans l'espace. Pour protéger la nappe dans ce contexte, il est nécessaire de connaître la vulnérabilité de l'aquifère, celle-ci pouvant varier considérablement, selon les vitesses et les trajectoires de l'eau souterraine. Les méthodes actuelles d'évaluation de la vulnérabilité de l'eau souterraine ne prennent généralement pas en compte les composantes locales et régionales de l'écoulement.

L'objectif de ce travail est de vérifier si des approches de l'hydrogéologie classique, comme l'étude piézométrique et l'analyse géochimique, permettent d'identifier les directions d'écoulement souterrain et les sous-bassins aquifères sur la rivière Noire. La piézométrie régionale et locale est d'abord étudiée à l'aide de mesures ponctuelles sur le terrain et d'informations disponibles dans les bases de données. Les propriétés géochimiques de l'eau souterraines sont ensuite analysées à la lumière des

résultats d'une campagne d'échantillonnage réalisée à l'été 2003.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 Description de la zone d'étude

Le bassin versant de la rivière Noire se situe en amont sur le bassin de la rivière Yamaska et couvre une superficie de 1579 km² (figure 1). La topographie varie de 450 m en amont du bassin à 45 m dans le secteur aval (figure 3). La zone d'étude est principalement agricole, avec une culture intensive de maïs principalement dans le secteur aval du bassin. La partie amont du bassin de la rivière Noire est surtout occupée par des boisés, pâturages et prairies. L'élevage intensif est aussi largement répandu sur l'ensemble de la zone d'étude. Les sources de contamination sont donc à la fois diffuses (épandages excessifs de fertilisants et de pesticides) et ponctuelles (fosses à fumier et à lisier, champs d'épuration).

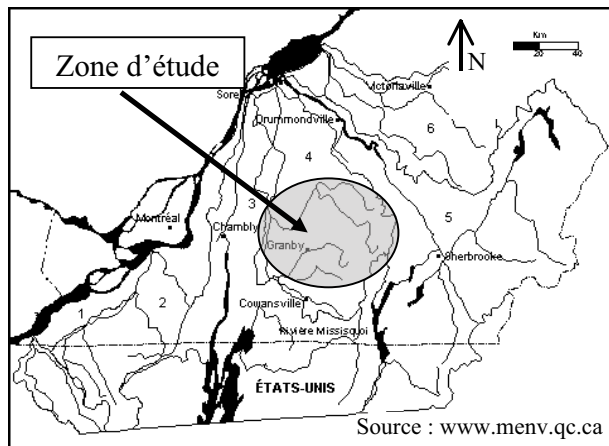


Figure 1. Localisation de la zone d'étude

La géologie du secteur correspond à une zone de transition entre les Basses-Terres du Saint-Laurent et les Appalaches. Les roches du substratum correspondent à trois unités tectonostratigraphiques du piedmont appalachien déversées vers l'ouest-nord-ouest et le nord-ouest (Doiron, 1981). Premièrement, la Formation de Bourret (BO), mise en place à l'Ordovicien moyen et supérieur, occupe le nord-ouest de la zone d'étude et est composée d'ardoises, de calcaires argileux, de grès et de conglomérats. Deuxièmement, une bande de roches traversant l'ouest de la zone du nord au sud correspond à l'Olistostrome de Drummondville (OD) composé de schistes à blocs, datant de l'Ordovicien moyen et supérieur. Troisièmement, la majorité de la surface restante est représentée par le Groupe de Shefford (SH), déposé durant le Cambrien inférieur et moyen. Il est composé de grès feldspathique et d'ardoises.

La couverture de dépôts meubles est généralement discontinue, formée de till silto-sableux, de sable et graviers fluvio-glaciaires ainsi que de sable et silt argileux marins. Les dépôts fins de silt et d'argile se retrouvent principalement dans le secteur aval de la rivière Noire où ils atteignent une épaisseur d'une dizaine de mètres. Les dépôts de till sont présents sur l'ensemble du domaine, mais dépassent rarement une épaisseur de cinq mètres (Bolduc *et al.*, 2003). L'aquifère se situe dans le roc fracturé, il est généralement libre et vulnérable. La recharge de l'aquifère est également distribuée sur tout le domaine d'étude, à l'exception des zones où les dépôts de silt et d'argile ont été identifiés.

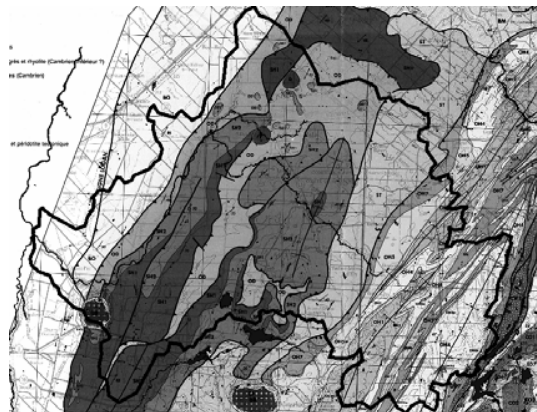


Figure 2. Géologie de la zone d'étude (Ministère des Ressources Naturelles-Québec, 1985)

2.3 Niveaux piézométriques

La réalisation d'une carte piézométrique est la première étape de toute étude hydrogéologique (Sanders, 1998). La carte piézométrique permet d'identifier les directions locales et régionales d'écoulement, tout en mettant en évidence les liens possibles entre les eaux de surface et les eaux souterraines. En mai 2003, les niveaux piézométriques ont été relevés sur le terrain dans 41 puits de particuliers, dont 36 puits profonds et 5 puits de surface (figure 3). Ces données ont été complétées par des informations provenant de la base de données du Système d'Informations Hydrodologiques (SIH) (Ministère de l'Environnement du Québec, 2004). En raison de la répartition des mesures de charges sur plusieurs décennies dans la base de données du SIH, d'imprécisions sur la localisation exacte des forages, et de variations dues à la présence de fractures plus ou moins bien connectées, l'erreur cumulée sur les charges est estimée à deux ou trois mètres.

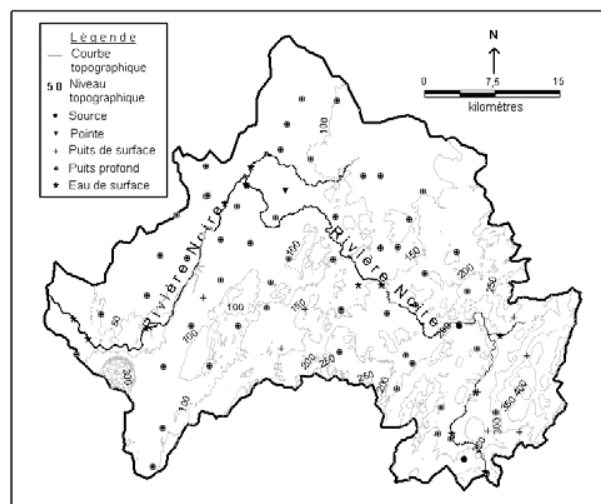


Figure 3. Topographie et localisation des stations de mesure

2.4 Échantillonnage d'eau

Une campagne d'échantillonnage a été réalisée en mai 2003, par le prélèvement d'eau souterraine à 71 puits de particuliers et à 13 stations de mesure en rivières (figure 4). L'eau de la rivière Noire a été analysée en quatre stations, tandis que les tributaires de la rivière Noire ont été échantillonnés en neuf points. La plupart des puits profonds dans cette région sont à paroi nue dans le roc fracturé. L'eau prélevée dans ces puits correspond donc à un échantillon en vrac d'eau provenant de différentes profondeurs.

Sur le terrain, l'eau souterraine a été prélevée en amont de tout système de traitement, après stabilisation des paramètres physico-chimiques. À chaque station, la température, le pH et la conductivité électrique de l'eau ont été mesurés à l'aide d'une sonde multi-paramètres WTW (seule la conductivité électrique est traitée ici). À 68 stations, un échantillon de 4 ml est ensuite prélevé pour l'analyse des NO_3 dans des bouteilles de verre préalablement stérilisées, et ensuite filtré sur un filtre à $0.45 \mu\text{m}$. À 41 stations, un échantillon de 30 ml a été prélevé pour l'analyse des isotopes stables dans des bouteilles de HDPE. Les échantillons ont été conservés à 4°C jusqu'à l'arrivée au laboratoire. Les contenus en nitrates (NO_3) ont été analysés par colorimétrie au laboratoire GEOTOP de l'UQAM. Les contenus en ^{18}O et deutérium ont aussi été analysés au GEOTOP, par spectrographie de masse.

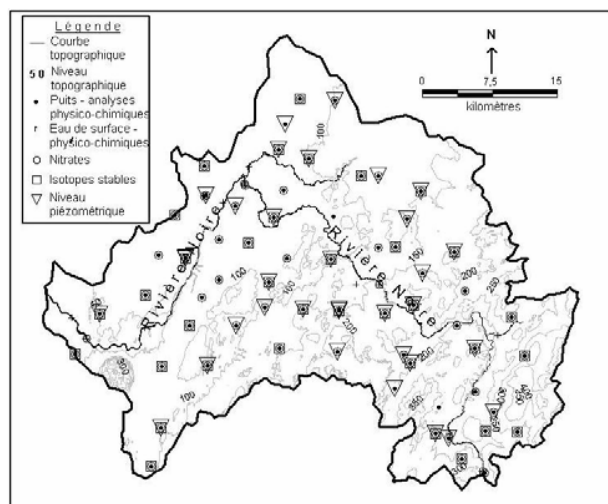


Figure 4. Types de données récoltées aux stations de prélèvement

3. RÉSULTATS

3.1 Directions d'écoulement

Une carte piézométrique de l'aquifère (figure 5) a été tracée à l'aide de toutes les données disponibles. Cette

carte piézométrique montre clairement que l'écoulement régional se fait du sud-est vers le nord-ouest. La rivière Noire influence l'écoulement souterrain presque partout, drainant la nappe dans la partie supérieure du roc. Cette influence de la rivière modifie localement les directions d'écoulement (figure 5). Les limites des sous-bassins hydrologiques montrent que l'écoulement souterrain suit sensiblement les mêmes directions que l'écoulement de surface. Les niveaux piézométriques se situent entre trois et cinq mètres sous la surface du sol, même dans le secteur aval où la nappe est captive. Les gradients hydrauliques sont beaucoup plus importants dans le secteur amont du bassin versant (0.01) que dans le secteur aval du bassin (0.001), principalement en raison de la topographie plus accidentée en amont. Des zones de recharge locales sont visibles sur la carte piézométrique. De manière générale, ces zones n'ont pas de lien direct avec la nature des dépôts de surface, mais montrent à nouveau clairement l'influence de la topographie (figure 3).

La carte piézométrique confirme que les limites de la zone d'étude, qui sont celles du bassin versant hydrologique, ne correspondent pas aux limites hydrodynamiques de l'aquifère. Malgré l'imprécision sur les données piézométriques, les sous-bassins hydrologiques de la rivière Noire définissent cependant relativement bien les directions locales d'écoulement souterrain (figure 5), sans doute en raison de l'influence marquée de la topographie sur la piézométrie. La carte piézométrique permet donc d'identifier à la fois les directions régionales et locales d'écoulement souterrain.

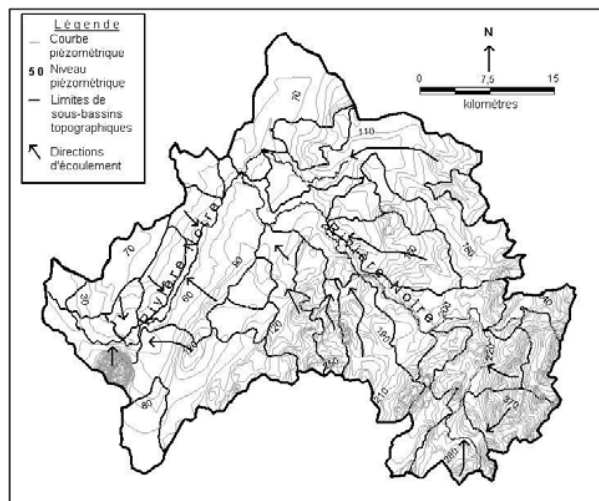


Figure 5. Carte piézométrique en relation avec les sous-bassins topographiques.

Des travaux de géophysique électrique (Djineng Njomo, 2002) réalisés dans le secteur aval du bassin ont mis en évidence la présence d'une couche de roc plus conductrice d'épaisseur 10 à 20 m dans laquelle l'eau souterraine circule plus rapidement qu'en profondeur. La figure 6 illustre une schématisation des directions d'écoulement dans ce secteur. On y distingue la zone

superficielle de roc plus conducteur, ainsi que la variation des directions d'écoulement selon la profondeur. Il est probable qu'une telle variabilité verticale se retrouve ailleurs sur le bassin. Cependant, en raison de la nature à paroi nue des puits étudiés, les données disponibles représentent une charge moyenne et ne permettent pas d'identifier les variations verticales de directions d'écoulement.

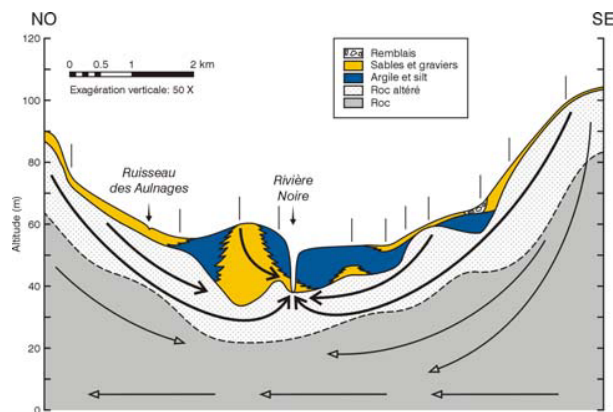
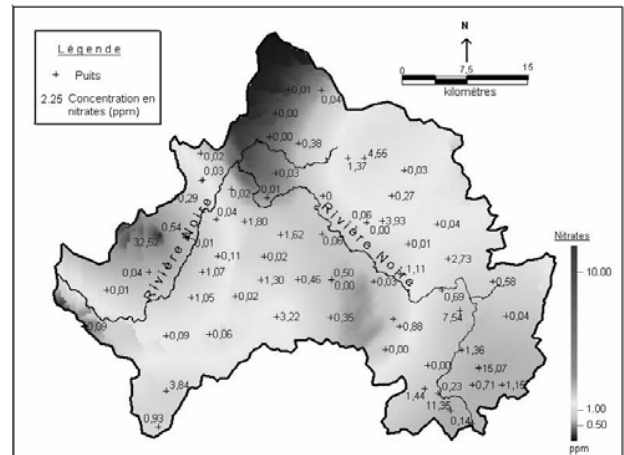


Figure 6. Vue en coupe des directions d'écoulement

3.2 Géochimie de l'eau

La figure 7 montre que des concentrations en NO_3 excédant la norme de 10 mg $\text{N-NO}_3/\text{l}$ pour l'eau potable (Ministère de l'Environnement du Québec, 2003) ont été observées dans trois puits seulement, soit un puits profond situé dans le secteur aval et deux puits de surface situés dans le secteur amont du bassin. Des concentrations comprises entre deux et 10 mg $\text{N-NO}_3/\text{l}$ ont été observées à six autres stations, mais ne présentent pas de tendance spatiale évidente. L'aquifère ne présente donc pas un problème régionalisé de contamination diffuse par les NO_3 . Cependant, les cas de contamination observés sont probablement d'origine anthropique et pourraient être associés localement à un mauvais entreposage des déjections animales, à des fertilisations localement excessives ou à une mauvaise conception des puits (Madjoud *et al.*, 2004). Au moment de l'échantillonnage, en mai 2003, les concentrations en nitrates dans la rivière étaient toutes inférieures à 2 mg $\text{N-NO}_3/\text{l}$. Bolduc *et al.* (2003) ont cependant montré que des petits affluents de la rivière Noire peuvent avoir des concentrations en nitrates excédant 10 mg $\text{N-NO}_3/\text{l}$ au printemps.



Les figures 9 et 10 montrent qu'au moment de l'échantillonnage en mai 2003, l'eau souterraine et de surface du secteur amont sont appauvries en ^{18}O et en deutérium. Ces résultats reflètent sans doute la signature des précipitations hivernales et printanières qui auraient rechargé la nappe, mais séjourné peu de temps dans l'aquifère avant d'être captées par les puits. Les données de la station GNIP (Global Network Isotopes in Precipitation) d'Ottawa (AIEA, 2003) montrent que les précipitations hivernales sont appauvries en ^{18}O et en deutérium. Les contenus en isotopes stables mesurés en aval sur le bassin sont similaires aux contenus moyens des précipitations. Ce qui s'explique par le fait que plus l'eau souterraine circule longtemps dans l'aquifère, plus elle est diluée et plus son contenu en isotopes stables se rapproche du contenu moyen des précipitations (Clark et Fritz, 1997). L'enrichissement en isotopes stables du sud-est vers le nord-ouest confirme l'écoulement régional observé précédemment à l'aide de la piézométrie et de la conductivité électrique.

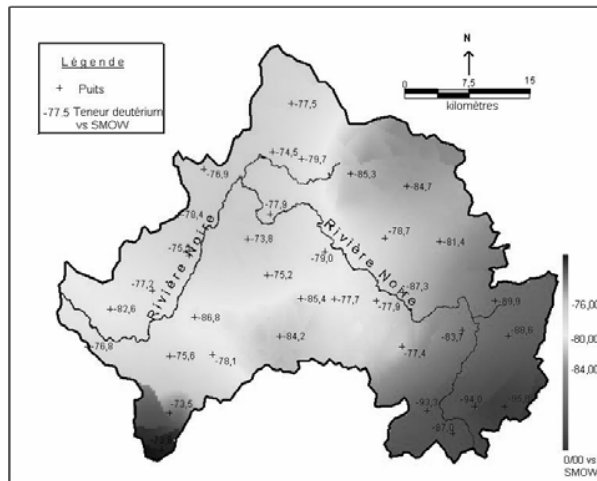


Figure 9. Contenus en deutérium de l'eau souterraine

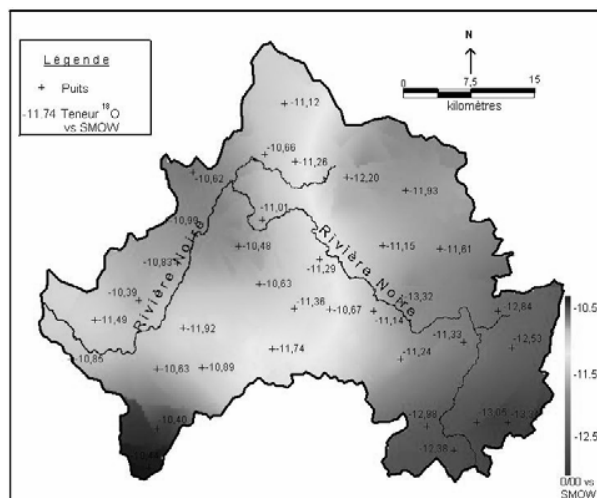


Figure 10. Contenus en ^{18}O de l'eau souterraine

La figure 11 montre que la majorité des contenus en isotopes stables appauvris du secteur amont proviennent de puits de surface et donc probablement d'écoulements peu profonds, ayant séjourné peu de temps dans l'aquifère. Les contenus en isotopes stables dans la rivière Noire reflètent celui des précipitations printanières et se situent au centre de la distribution mesurée dans l'eau souterraine. Dans le secteur aval du bassin, Bolduc *et al.* (2003) ont montré que les contenus en ^{18}O de la rivière Noire suivent l'évolution temporelle des précipitations.

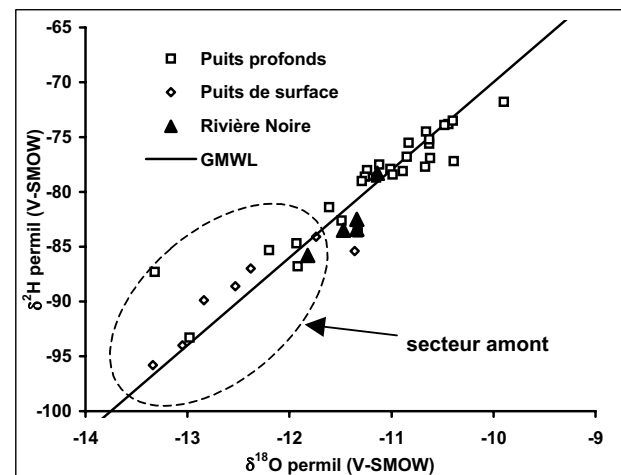


Figure 11. Contenus en isotopes stables sur le domaine d'étude

La figure 12 illustre la relation entre le contenu en deutérium et la conductivité électrique de l'eau souterraine et de surface. Ce graphique montre que plus la conductivité électrique est faible, plus l'eau est appauvrie en deutérium. Ces deux indicateurs évoluent donc de manière similaire sur le bassin, dans le même sens que le temps de séjour de l'eau souterraine. L'information fournie par les indicateurs géochimiques est généralement reconnue pour tracer les écoulements souterrains (Walker *et al.*, 2003). Dans le contexte étudié, elle permet d'identifier les directions régionales d'écoulement, mais la variabilité spatiale des résultats ne permet pas d'apporter de précisions sur les directions locales d'écoulement.

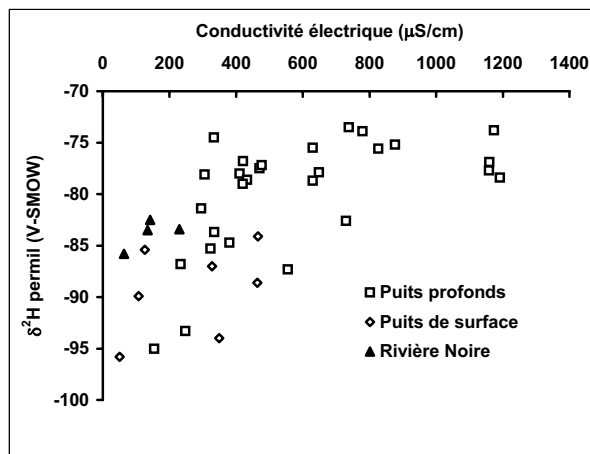


Figure 12. Relation entre le contenu en deutérium et la conductivité électrique de l'eau

4. CONCLUSION

Ce travail a permis de confirmer la pertinence de la piézométrie et de la géochimie pour déterminer les directions d'écoulement. L'étude piézométrique fournit des informations à caractère régional et local, tandis que l'analyse géochimique apporte des précisions régionales sur les directions d'écoulement souterrain. Les résultats ont mis en évidence une augmentation des temps de séjour de l'amont vers l'aval de l'aquifère, en relation avec la géologie et la topographie. L'hydrologie du bassin versant influence principalement les directions locales d'écoulement souterrain.

Dans une prochaine étape, la modélisation hydrogéologique sera utilisée et combinée aux résultats piézométriques et géochimiques afin de raffiner la compréhension régionale de l'aquifère (Pint *et al.*, 2003). La simulation effectuée à l'aide du logiciel Modflow permettra de confirmer les directions d'écoulement locales et régionale, ainsi que de vérifier l'effet de paramètres tels que la recharge, les variations latérales et verticales de conductivité hydraulique, ainsi que les liens hydrodynamiques entre les eaux de surface et souterraines.

RÉFÉRENCES

- Agence Internationale de l'Énergie Atomique. Global Network of Isotopes in Precipitation (GNIP) and Isotopes Information System (ISOHIS) (page web). Disponible à isohis.iaea.org, accédée en 2003.
- BAPE. 2000. L'eau, ressource à protéger, à partager et à mettre en valeur. Rapport de la Commission sur la gestion de l'eau au Québec. Bureau des Audiences Publiques sur l'Environnement. Québec, Canada.

- Bolduc, S., M. Larocque et G. Prichonnet. 2003. Groundwater nitrate contamination on the Noire River watershed (Montérégie, Québec). Conférence présentée à la 4ième conférence AIH-Canada, 28 sept.-1 oct. 2003, Winnipeg (Canada).
- Clark, I., et Fritz, P. 1997. Environmental isotopes in hydrogeology. Lewis publishers.
- Djineng Njomo, G.T. 2002. Utilisation des méthodes géophysiques dans l'étude de la contamination des eaux souterraines sur le bassin de la rivière Noire. Rapport de stage de Maîtrise en Sciences de l'Environnement, UQAM. Montréal, Qc.
- Doiron, A. 1981. Les dépôts quaternaires de la région de Granby-Waterloo, Québec : cartographie, sédimentologie et stratigraphie. Mémoire de Maîtrise en Sciences de la Terre et de l'Atmosphère, UQAM. Montréal, Qc.
- Madjoub, R. C. Côté, M. Duchemin. 2004. Mesures préventives et correctives pour la protection des puits en milieu rural. Vecteur Environnement, Vol 37, No 3, pp. 31-34.
- Ministère de l'Énergie et des Ressources. 1985. Carte géologique Estrie-Beauce au 1 :250 000. Carte no 2030 du rapport MM 85-04. Québec, Canada
- Ministère de l'Environnement du Québec. Système d'Informations Hydrogéologiques (page web). Disponible à www.menv.gouv.qc.ca, accédée en 2004.
- Pint, C.D., R.J. Hunt, M.P. Anderson. 2003. Flowpath delineation and ground water age, Allequash Basin, Wisconsin, Ground Water, Vol 41, No 7, pp. 895-902.
- Sanders, L.L. 1998. A manual of field hydrogeology. Prentice Hall.
- Walker, J.F., R.J. Hunt, T.D. Bullen, D.P. Krabbenhoft et C. Kendall. 2003. Variability of isotope and major ion chemistry in the Allequash basin, Wisconsin. Ground Water, Vol 41, No 7, pp. 883-894.