

Acquisition de connaissances sur les aquifères granulaires de l'Abitibi : l'apport du géoradar



Pierre-Luc Dallaire¹, Vincent Cloutier¹, Simon Nadeau¹ et Jean Veillette¹

¹ Groupe de recherche sur l'eau souterraine, Département des sciences appliquées, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Campus d'Amos, Amos, Québec, Canada



ABSTRACT

The Abitibian eskers and moraines, partially buried underneath the glaciolacustrine clay, contain the most productive aquifers of the region. The morphology of these granular aquifers results from the bedrock topography and fluvio-glacial, glaciolacustrine and postglacial processes. The internal structures and the morphology of the bedrock are generally unknown. However, this information is essential to adequately define the hydrogeological contexts, to delineate the recharge areas and to produce the hydrogeological models. The use of the Ground Penetrating Radar allows correlation between subsurface control points and provides valuable information on the internal structure of eskers and their hydrogeological conditions. This knowledge is required for a rational management of the groundwater resources of Abitibi-Témiscamingue.

RÉSUMÉ

Les dépôts granulaires des eskers et des moraines abitibiens, partiellement enfouis sous les argiles, renferment les aquifères les plus productifs de la région. La morphologie de ces aquifères granulaires résulte de la topographie du socle rocheux et de processus fluvio-glaciaires, glaciolacustres et postglaciaires. La structure interne des eskers et leur lien avec les dépôts encaissants sont généralement mal connus. Ces connaissances sont pourtant essentielles afin de définir les paramètres hydrogéologiques, délimiter les zones de recharge et concevoir des modèles hydrogéologiques. L'utilisation du géoradar permet de compléter l'échantillonnage ponctuel, tout en offrant une compréhension accrue de la structure interne des eskers et des contextes hydrogéologiques nécessaires à une saine gestion de la ressource en eau souterraine de l'Abitibi-Témiscamingue.

1 INTRODUCTION

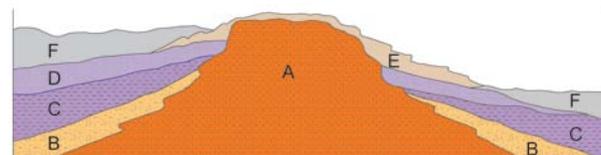
Le contexte de mise en place des eskers abitibiens est bien documenté (Veillette *et al.*, 2004; Nadeau, 2011; Nadeau *et al.*, 2011). Leur potentiel aquifère a été identifié sur le territoire de l'Abitibi-Témiscamingue selon leurs caractéristiques géomorphologiques observables à la surface (Nadeau, 2011). Le modèle conceptuel qui découle de ces travaux suggère que le noyau central composé de sédiments juxtaglaciaires est flanqué de sables d'épandage subaquatique, sur lequel des sédiments à grains fins d'eau profonde se sont accumulés lors de la submersion glaciolacustre Barlow-Ojibway (Figure 1). L'exondation graduelle des terres, par l'action des vagues, a remanié les crêtes d'eskers émergentes; elles ont été aplanies et redistribuées sur les flancs en sables sublittoraux et sédiments de plage. Sur les pentes douces, dans les milieux mal drainés et généralement sur le flanc des eskers, des tourbières, principalement alimentées par l'émergence diffuse d'eau provenant de l'esker, se sont développées (Nadeau, 2011).

Plusieurs publications relatent de l'efficacité du géoradar afin d'investiguer les structures internes des eskers (Väisänen, 1997; Bakker et van der Meer, 2003; Fiore, Pugin et Beres, 2002; Burke 2008; Burke *et al.*, 2008; Pellicer, 2010), ou pour réaliser des études hydrogéologiques (Beres et Haeni, 1991; van Overmeeren, 1998; Sharpe *et al.*, 2002; Slater et Comas, 2009).

Dans le cadre du projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines de l'Abitibi-

Témiscamingue (PACES-AT) (Cloutier *et al.*, 2011), le géoradar est utilisé dans le but de localement redéfinir le modèle conceptuel de base, déterminer les épaisseurs des couches stratigraphiques, évaluer la profondeur de la nappe phréatique et offrir des profils continus entre des points de forages conventionnels. L'exercice devrait permettre de raffiner la compréhension des contextes hydrogéologiques, délimiter les zones de recharges et contribuer à la réalisation de modèles hydrogéologiques.

Dans le cadre du PACES-AT, plusieurs kilomètres (45 km au total) ont été acquis sur les segments d'eskers des secteurs d'intérêt (secteurs 1 à 7 sur la Figure 2). Pour cet article, l'apport du géoradar est démontré à l'aide d'une étude de cas sur l'esker Saint-Mathieu-Berry (secteur 5 de la Figure 2). Une étude détaillée d'un segment de l'esker Saint-Mathieu Berry a été réalisée par Riverin (2006) afin de définir les contextes hydrogéologiques et d'arriver à une compréhension



A = Noyau central : sédiments juxtaglaciaires (eskiers) D = Sables sublittoraux et sédiments de plage
B = Sables d'épandage subaquatique E = Sédiments éoliens (dunes)
C = Sédiments à grains fins d'eau profonde F = Tourbières

Figure 1. Modèle conceptuel en coupe transversale de l'esker abitibien formé en milieu glaciolacustre (modifiée de Veillette *et al.*, 2004)

quantitative de la dynamique d'écoulement dans le

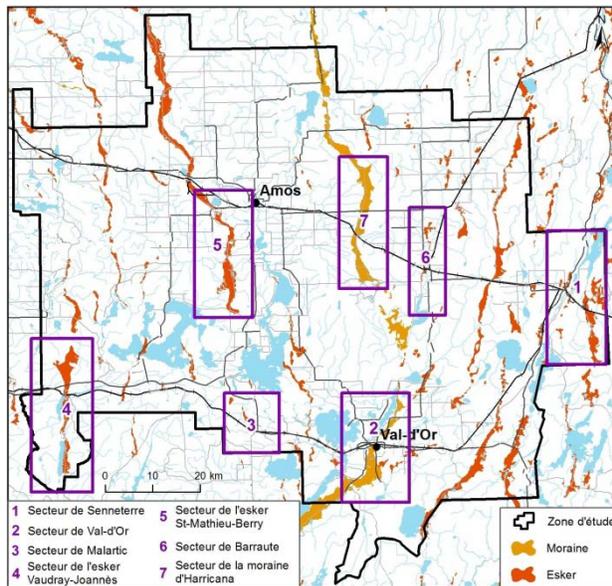


Figure 2. Territoire étudié dans le cadre du PACES-AT et secteurs d'intérêt où des travaux de géoradar ont été réalisés. Cartes de dépôt meubles Veillette (2004), Paradis (2007).

système aquifère de l'esker. Les résultats de Riverin (2006) ont permis d'identifier des secteurs manquant de données et nécessitant des travaux de caractérisation supplémentaires. Un profil géoradar a donc été réalisé dans un des secteurs clés identifiés par Riverin (2006) pour mieux comprendre le système aquifère et son potentiel d'exploitation.

2 LOCALISATION DU SITE

L'esker Saint-Mathieu-Berry se localise dans la MRC d'Abitibi au sein de la région administrative de l'Abitibi-Témiscamingue, positionnée dans la portion sud-ouest de la province québécoise (figure 3). L'esker est issu du dernier retrait glaciaire et a été mis en place par les eaux de fonte de l'Inlandsis laurentidien. Il est constitué de sédiments à granulométrie variable, allant de limon à blocs, avec une prédominance de sables et graviers. La portion apparente en surface de l'esker varie entre 0,3 et 3 km de largeur, alors que sous les dépôts glaciolacustres la largeur peut atteindre 5 km (Riverin, 2006). La hauteur apparente de la crête varie entre 10 et 25 m (Nadeau, 2011) tandis que l'épaisseur total de dépôts granulaires fluctue entre 25 et 50 m (Bolduc *et al.*, 2004).

La composition granulométrique de l'esker lui confère une grande perméabilité permettant un potentiel aquifère important. La recharge du système aquifère de l'esker est assurée uniquement par les précipitations. L'eau souterraine maintenue dans l'esker Saint-Mathieu-Berry a été honorée pour sa qualité par le «Berkeley Springs International Water Tasting Awards» en 2001. La ville d'Amos et la compagnie Eaux Vives Water, qui embouteille la ressource à des fins commerciales, s'approvisionnent en eau potable à même cet esker.

Le site d'étude est localisé dans la partie nord de l'esker, à l'ouest de la ville d'Amos (rectangle rouge sur la Figure 3). Ce secteur a été identifié par Riverin (2006) comme une ligne de partage des eaux souterraines sur la base de niveaux d'eau mesurés (Figure 4). Toutefois, les données sont insuffisantes pour confirmer la nature de cette limite. Riverin (2006) a recommandé de réaliser des travaux supplémentaires afin de valider si ce secteur constitue une limite imperméable fixe avec une remontée du socle rocheux ou une ligne de partage des eaux. Étant donné la présence des puits d'approvisionnement de la ville d'Amos au sud du secteur, la confirmation de la nature de cette limite hydrogéologique est essentielle pour déterminer s'il y a un apport d'eau provenant de la partie nord de l'esker.

C'est pour mieux définir les contextes géologiques et hydrogéologiques de ce secteur que des travaux de géoradar ont été réalisés. Le profil géoradar a été acquis sur un sentier de VTT menant à une sablière abandonnée. Le point culminant de la sablière, où le profil débute, est à une hauteur de 337,52 m tandis que le plancher est à 320,95 m (figures 3 et 5).

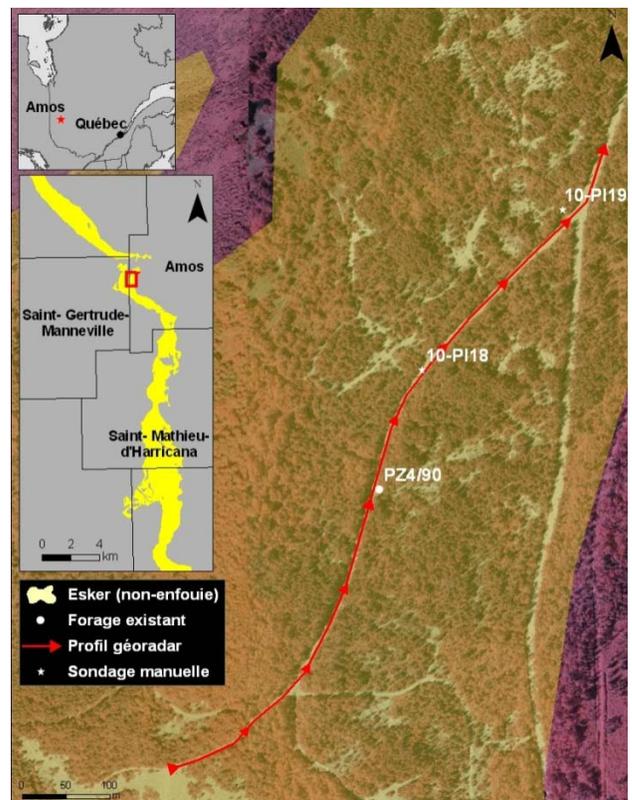


Figure 3. Localisation du site, de l'esker Saint-Mathieu-Berry et des données récoltées

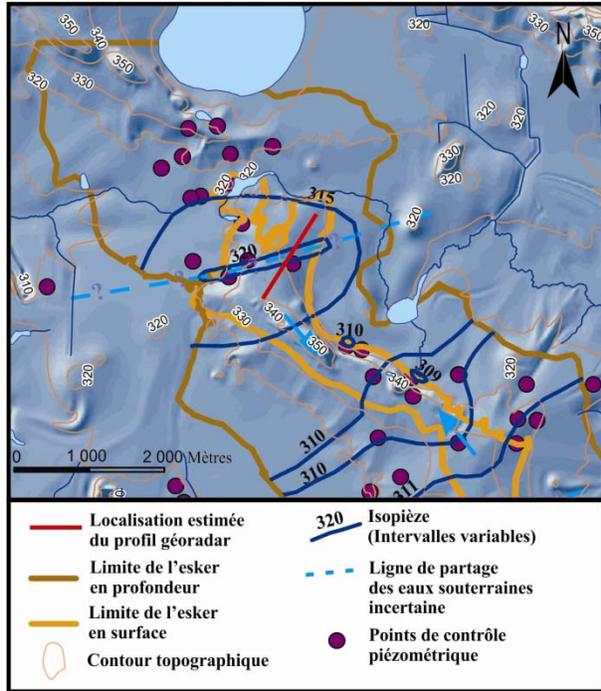


Figure 4. Carte piézométrique du secteur nord de l'esker Saint- Mathieu- Berry et localisation du profil géoradar (modifiée de Riverin, 2006)

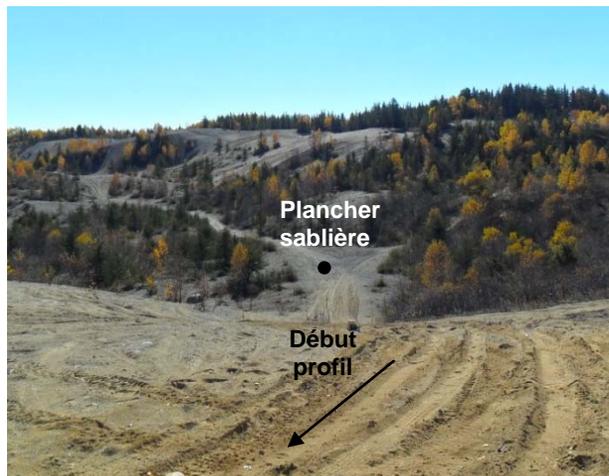


Figure 5. Sablière sur l'esker Saint-Mathieu-Berry où le profil géoradar débute.

3 MÉTHODOLOGIE

3.1 Données géoradar

L'acquisition des données géoradar a été effectuée à l'aide du modèle PulseEKKO Pro de Sensors & Softwares. Des antennes d'une fréquence nominale de 50 MHz ont été utilisées afin d'obtenir une pénétration d'investigation optimale. Le pas d'échantillonnage et l'espacement entre les antennes ont été fixés à 1 m. La motricité de l'appareil, ainsi que l'homogénéité de la

collecte des données ont été assurées par l'emploi d'un chariot construit à cette fin (figure 6). Les positions des relevées et l'altitude des profils ont été obtenues en employant un système de positionnement global différentiel (DGPS) R8 de Trimble à un intervalle de 1 m.

Le traitement des données a été effectué en employant le logiciel Reflex W version 5.6 (Sandmeier, 2005). Ainsi, le ratio signal/bruit a été accru en appliquant les traitements de base :

- Le bruit de basses fréquences («wow») a été soustrait en employant le filtre «subtract-mean dewow» avec une fenêtre de 16,6 ns;
- le filtre «bandpass frequency» avec une configuration de 15MHz-30MHz-72MHz-144MHz a été utilisé pour éliminer les bruits extrêmes;
- les hyperboles et les angles ont été repositionnées en utilisant une migration de type «FK migration» avec une vitesse moyenne de $0,087 \text{ m ns}^{-1}$;
- des bandes parallèles à la surface peuvent être apparentes en profondeur, celles-ci ont été soustraites en employant le filtre «background removal» débutant à 60 ns;
- un gain («AGC gain») et une fenêtre de 25 ns a été appliqué pour rehausser l'amplitude des signaux plus en profondeur.

La correction topographique des profils a été effectuée avec les données d'altitude du DGPS. Le choix et la séquence des traitements est basé sur les travaux de Burke (2008) et Woodward *et al.*, (2003). La détermination des paramètres des traitements a été basée sur l'histogramme de fréquence des fréquences (MHz).

La vitesse moyenne a été estimée à $0,087 \text{ m ns}^{-1} \pm 0,02$. Cette valeur est basée sur 18 analyses de «common mid-point (CMP)» réalisées à partir du module «velocity processing» de Reflex W. Les différentes données CMP récoltés sont issues des secteurs du projet PACES-AT couverts par des profils géoradar.

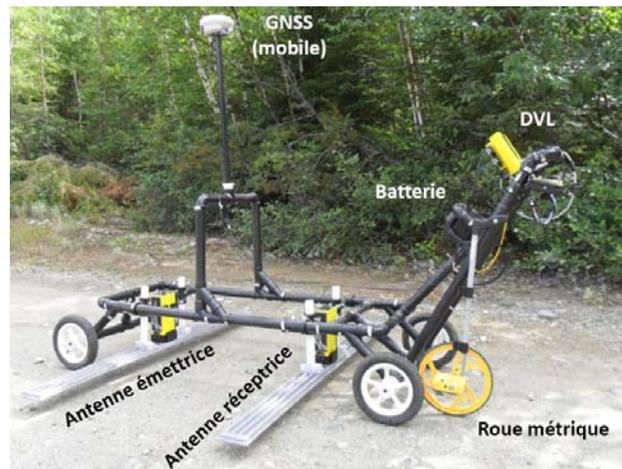


Figure 6. Le chariot équipé du géoradar Pulse EKKoPro et du GNSS R8.

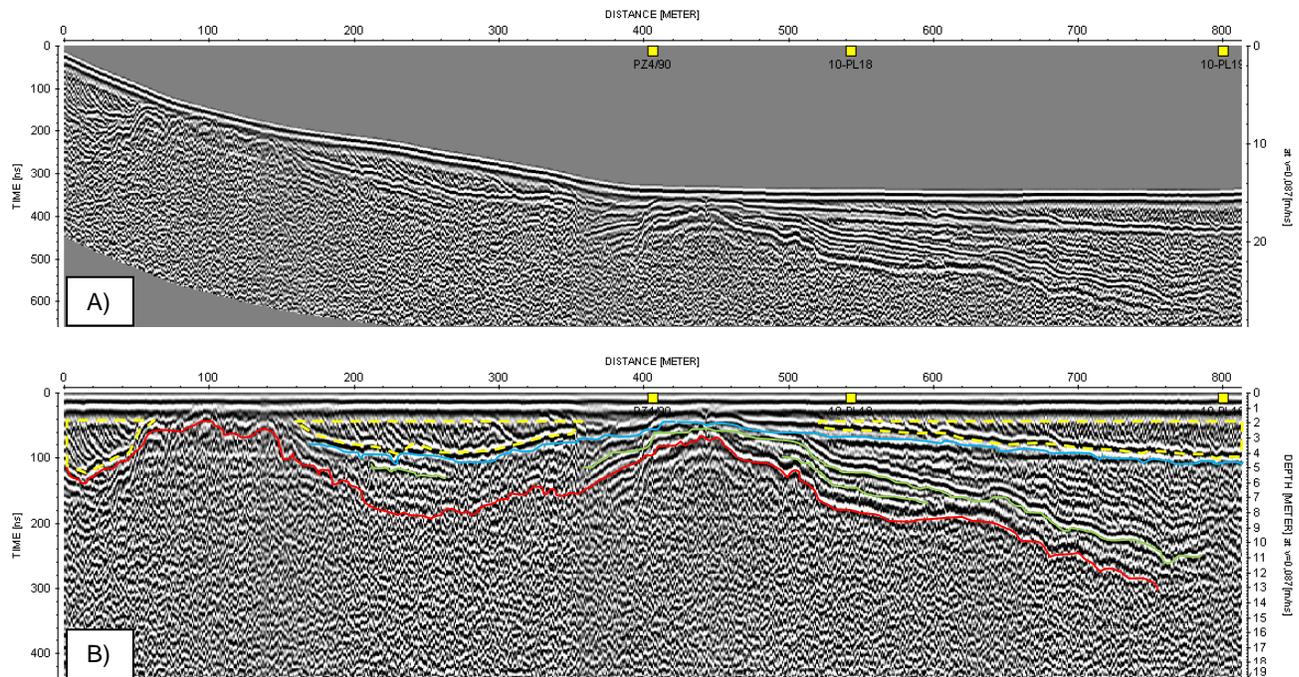


Figure 7. Profil géoradar; A) avec correction topographique; B) avec interprétations des réflecteurs

3.2 Données de validation

Dans le but de valider l'interprétation du profil géoradar, des sondages manuels ont été réalisés en employant une sonde de 4 m de marque AMS (voir la localisation sur la figure 3). La description stratigraphique du forage PZ4/90, réalisé pour le compte de la municipalité d'Amos, a également été utilisée. La position de la nappe phréatique a été mesurée lors de la collecte des données géoradar à l'aide de la sonde à niveau d'eau Solinst, Model 101.

4 RÉSULTATS

4.1 Données géoradar

Le profil géoradar (figure 7) permet de visualiser quatre réflecteurs distincts. Le premier correspond à plusieurs courts réflecteurs parallèles, inclinés à $\sim 45^\circ$, et n'atteignant pas plus de 4 m sous la surface. Ces petits réflecteurs sont présents sur trois sections du profil (polygones pointillés jaune, figure 7B). Le second réflecteur apparaît à ~ 180 m et s'observe en continu jusqu'à la fin du profil (ligne bleue, figure 7B). Il oscille directement sous deux des trois zones formées par le premier réflecteur. Ce réflecteur affleure quasiment à la surface autour de 440 m, précisément entre les deux zones. Le troisième réflecteur, surligné en rouge (figure 7B), est présent sur la quasi-totalité du profil et fluctue entre 1 et 13 m de profondeur sous la surface. Il présente des remontés à 100 m et à 440 m. Aucun autre réflecteur n'est visible, sous ce dernier. Le quatrième réflecteur (lignes vertes, figure 7B), est discontinu et débute à 220 m, il semble suivre la configuration du réflecteur

précédent situé à ~ 2 m en-dessous. À ~ 540 m il se duplique et devient de multiples réflecteurs superposés.

4.2 Données de validation

La description stratigraphique du forage PZ4/90, les mesures de la position de la nappe phréatique et les observations de terrain effectuées le long du profil sont regroupées dans le tableau 1.

Tableau 1. Description stratigraphique du forage et observations terrain

Forage PZ4/90	
0 à 3 m	Sable fin à moyen
3 à 24,4 m	Argile
24,4 à 26 m	Limon
26 à 29 m	Sable fin limoneux
29 à 34 m	Sable et gravier
34 m	Roc
10,9m	Position nappe phréatique
Sondage 10-PL18	
0 à 2 m	Gravier fin
2 à 2,8 m	Sable fin / moyen
2,7 m	Position nappe phréatique
Sondage 10-PL19	
0 à 4 m	Sable moyen / grossier

5 DISCUSSION

5.1 Interprétations des réflecteurs

Les sondages 10-PL18 et 10-PL19 supposent que le premier réflecteur (pointillé jaune) serait généré par la

présence de sédiments granulaires fins non-saturés. L'inclinaison de ~ 45° s'expliquerait par la sédimentation successive de sables sublittoraux. Également, la figure 7B permet de visualiser la présence de sables fins à moyens au commencement du profil, où la première zone de ce réflecteur est identifiée (figure 7B).

Le second réflecteur (bleu) serait associé à la position de la nappe phréatique. Le sondage 10-PL18 révèle la position de la nappe phréatique à la même profondeur que ce réflecteur. Tout indique que le troisième réflecteur (rouge) est généré par la transition granulaire-argile. L'absence totale de réflecteur sous ce dernier et la présence d'argile identifiée au forage PZ4/90 permet de formuler cette hypothèse. L'altitude de ce réflecteur coïncide avec l'altitude maximale atteinte par les sédiments à grain fin dans la région (320 m).

Pour l'instant, la nature du dernier réflecteur (vert) reste incertaine, il serait plausible qu'il soit causé par une sédimentation intermédiaire entre l'argile et les sables fins à moyens retrouvés en surface.

5.2 Contexte hydrogéologique

L'interprétation des réflecteurs et des données de terrain permet d'émettre quelques hypothèses quant au contexte hydrogéologique de ce secteur. Deux aquifères seraient séparés par la couche imperméable d'argile. Une nappe confinée serait présente à l'intérieur des dépôts granulaires entre le roc et l'argile (*i.e.* entre 26 et 34 m sous la surface au puits, PZ4/90). Ces résultats confirment que le système aquifère de l'esker est en condition confinée dans ce secteur, tel qu'identifié par Riverin (2006). Les résultats du géoradar et du sondage 10-PL18 indiquent quant à eux la présence d'une nappe superficielle au-dessus de la couche aquitard d'argile. Donc, le niveau d'eau mesuré dans le puits PZ4/90 représente la condition piézométrique du système aquifère de l'esker sous l'argile, alors que la nappe phréatique identifiée par le second réflecteur (bleu) représente celui d'une nappe superficielle qui repose sur l'argile.

5.3 Vitesse moyenne utilisée

La collecte des données en mode «common mid-point» doit être effectuée sur des terrains le plus horizontaux que possible (Neal, 2004). Afin de répondre à cette exigence, les données ont été récoltées soit sur les flancs ou encore sur les crêtes d'esker. Ainsi, deux sous-groupes composent les valeurs des analyses ayant servi à estimer la vitesse moyenne. Le premier se situe autour de 0,05 m ns⁻¹, correspondant aux matériaux granulaires saturés situés sur les flancs, alors que le second avoisine 0,1 m ns⁻¹ caractéristique aux sédiments granulaire non-saturé des crêtes (Neal, 2004). La moyenne calculée à 0,087 m ns⁻¹ offre donc une estimation globale de la région d'étude, et quelques imprécisions peuvent survenir quant à la profondeur et l'épaisseur des unités sur le profil.

6 CONCLUSION

L'analyse du profil permet de confirmer que le système aquifère de l'esker est en condition confinée dans ce secteur. L'intégration du profil avec les niveaux d'eau dans le puits et le sondage permet d'identifier la présence d'une nappe superficielle au-dessus de l'argile, dont le niveau d'eau est plus élevé que celui dans l'esker confiné et mesuré dans le PZ4/90. La présence de cette nappe superficielle devra être prise en compte dans l'interprétation des données de niveaux d'eau de ce secteur, afin d'identifier si les niveaux d'eau mesurés sont bien représentatifs du système aquifère de l'esker ou de la nappe superficielle.

Il est planifié que d'autres travaux de géophysique (*i.e.* utilisation du résistivimètre et du TEM) et de forages seront réalisés sur ce même site. L'ajout de ces données permettra de connaître la topographie du socle rocheux; l'unité d'argile ne permettant pas d'identifier la surface du roc avec le géoradar.

Ces nouvelles données, ainsi que les nouveaux forages planifiés pour ce secteur, vont permettre de préciser si ce secteur correspond à une remontée du socle rocheux ou à une ligne de partage des eaux. Ces nouvelles informations sont essentielles pour définir plus précisément le potentiel d'exploitation des puits de la ville d'Amos et les aires d'alimentation des puits, deux éléments importants pour assurer une saine gestion du système aquifère.

REMERCIEMENTS

Les auteurs désirent souligner la contribution financière du Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) et des partenaires régionaux du PACES-AT, incluant la Conférence régionale des élus de l'Abitibi-Témiscamingue, les MRC (MRC d'Abitibi, MRC de la Vallée-de-l'Or, Ville de Rouyn-Noranda, MRC d'Abitibi-Ouest, MRC du Témiscamingue), et les organismes de bassin versant Abitibi-Jamésie (OBVAJ) et Témiscamingue (OBVT). Nous remercions également les partenaires régionaux pour leur collaboration et leur intérêt dans le projet. Enfin, un merci tout spécial à Gérémy Robert pour l'aide lors de la construction du GPL et à Matthieu Chevillard pour les travaux terrain.

RÉFÉRENCES

- Bakker, M. A.J. et Van der Meer, J. J.M. 2003. Structure of a Pleistocene push moraine revealed by GPR : the eastern Veluwe Ridge, The Netherlands. *Geological Society of London*, Special Publication 211 : 143- 151.
- Beres, M. Jr. et Haeni, F.P. 1991. Application of Ground-Penetrating-Radar Methods in Hydrogeologic Studies. *Ground Water*, 29(3) : 375- 386.

- Bolduc, A. M., Riverin, M.-N., Lefebvre, R., Paradis, S. J., Fallara, F. 2004. Modélisation de l'architecture 3D du segment sud de l'esker Saint-Mathieu - Berry reliée à la circulation de l'eau souterraine, région d'Amos, Abitibi. 57 ième Congrès Canadien de Géotechnique 5ième Congrès Conjoint SCG/AIH - CGG: Québec, 8 p.
- Burke, M. J. 2008. «GPR Investigations of the Sedimentary Architecture of Jökulhlaup Eskers : Skeioararjökull, Iceland and Bering Glacier, Alaska». Thèse de Doctorat, University of Northumbria, Newcastle, U.K., 313 pages.
- Burke, M. J., Woodward, J., Russell, A. J., Fleisher P. J. et Bailey, P. K. 2008. Controls on the sedimentary architecture of a single event englacial esker : Skeioararjökull, Iceland. *Quaternary Science Reviews*, 27(19-20) : 1829-1847.
- Cloutier, V., Aubert, T., Audet-Gagnon, F., Blanchette, D., Castelli, C., Dallaire, P.-L., Fallara, F., Godbout, G., Nadeau, S., Pitre, O., Rey, N., Roy, M., Veillette, J. 2011. *Géohydro 2011*, Québec, Qc
- Fiore, J., Pugin, A. et Beres, M. 2002. Sedimentological and GPR Studies of Subglacial Deposits in the Joux Valley (Vaud, Switzerland) : Backset accretion in an Esker Followed by an Erosive Jökulhlaup. *Géographie Physique et Quaternaire*, 56(1) : 19-32.
- Nadeau, S. 2011. « Estimation de la ressource granulaire et du potentiel aquifère des eskers de l'Abitibi-Témiscamingue et du sud de la Baie-James (Québec) ». Thèse de maîtrise, Département de géographie, UQAM, 145 pages.
- Nadeau, S., Cloutier, V., Daigneault, R.-A., Veillette, J. 2011. Volume estimate of granular deposits and groundwater reserves of the Abitibi-Témiscamingue eskers, Québec, *Géohydro 2011*, Québec, Qc
- Neal, A. 2004. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology : principles, problems and progress. *Earth-Science Reviews*, 66(3-4) : 261-330.
- Paradis, S. J. 2007. Géologie des formations en surface et histoire glaciaire, Lac Blouin, Québec. Commission géologique du Canada. Carte 2017A, scale 1 : 100 000.
- Pellicer, X. M. 2010. «Geophysical Characterisation and Evolutionary Model of the Quaternary sediments in the North Offaly region of Central Ireland». Thèse de Doctorat, Département de Géographie, National University of Ireland, Maynooth, 470 p.
- Riverin, M.-N. 2006. «Caractérisation et modélisation de la dynamique d'écoulement dans le système aquifère de l'esker Saint-Mathieu/Berry, Abitibi, Québec». Mémoire de maîtrise, Université du Québec, INRS-Eau, Terre et Environnement, Québec, 165 p.
- Sandmeier, K.J. 2005. Reflexw 3.5.7 Manual, Sandmeier Software, Karlsruhe, Germany.
- Sharpe D.R., Pugin, A., Pullan S. E. et Gorrell, G. 2002. Application of seismic stratigraphy and sedimentology to regional hydrogeological investigations : an example from Oak Ridges Moraine, southern Ontario, Canada. *Canadian Geotechnical Journal*, 40 : 711-730.
- Slater, L. et Comas, X. 2009. The Contribution of Ground Penetrating Radar to Water Resource Research. In *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*, Harry M. Jol, p. 524. Amsterdam: Elsevier.
- Väisänen U. 1997. Groundwater resources at risk in the glaciofluvial formation of Jokkavaara in Rovaniemi area, Northern Finland. *Environmental Geochemistry and Health*, 19 : 127-131.
- van Overmeeren, R.A. 1998. Radar facies of unconsolidated sediments in The Netherlands : A radar stratigraphy interpretation method for hydrogeology. *Journal of Applied Geophysics*, 40(1) : 1-18.
- Veillette, J., Maqsoud, A., de Corta, H. and Bois, D. 2004. Hydrogéologie des eskers de la MRC d'Abitibi, Québec. Proceedings, 5th Joint CGS/IAH-CNC Groundwater Conference, Quebec, 6-13.
- Veillette, J. J. 2004. Géologie des formations en surface et histoire glaciaire, Cadillac, Québec. Commission géologique du Canada, Carte 2019A, scale 1 : 100 000.
- Woodward, J., Ashworth, P. J., Best, J. L., Sambrook Smith, G. H. et Simpson, C. J. 2003. The use and application of GPR in sandy fluvial environments : methodological considerations. *Geological Society of London*, Special Publication 211 : 143- 151.