

HYDROCHIMIE DE L'ESKER SAINT-MATHIEU-BERRY, ABITIBI, QUÉBEC

Abdelkabar Maqsoud, Unité de recherche et de service en technologie minérale, Université du Québec en Abitibi-, Rouyn-Noranda, Québec, Canada

Jean Veillette, Unité de recherche et de service en technologie minérale, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Rouyn-Noranda, Québec, Canada

Michel Bakalowicz, CNRS, Université de Montpellier II, France

ABSTRACT

A sampling program was carried out during summer 2003 aiming at the identification of board chemical classes of the water contained and associated with the Saint-Mathieu-Berry esker. Two methods were used: frequency distribution of water conductivity and principal components analysis. So, three classes of groundwater were identified by means of both methods and using the association between the various mineral. As for waters of kettles lakes, also three classes of water were individualized so allowing to identify the origin of their water.

RESUME

Une campagne d'échantillonnage, visant à établir une première identification des différentes familles chimiques de l'eau, a été menée durant l'été 2003 le long de l'esker Saint-Mathieu-Berry. Deux outils ont été utilisés, il s'agit de la distribution de fréquence de la conductivité et de l'analyse en composante principale. Ainsi, trois familles d'eau souterraines ont été individualisées à l'aide des deux outils et en se basant sur l'association entre les différentes espèces minérales. Quant aux eaux des lacs de kettles, également trois familles ont été individualisées permettant ainsi d'identifier l'origine de leur alimentation en eau.

1. INTRODUCTION

L'Abitibi-Témiscamingue est une vaste région située au nord du 46^e parallèle, et qui constitue l'une des plus grandes réserves en ressources naturelles au Québec. En langue algonquienne, Abitibi signifie «eaux du milieu» en référence à la position géographique de la région. Celle-ci correspond à la jonction de deux grands bassins hydrographiques : bassin de Saint-Laurent et bassin de la Baie James–Baie d'Hudson (Boileau et Dumond 1979).

Le paysage de l'Abitibi a été façonné par le dernier glacier continental. Ce dernier a également aplani le socle. Ce glacier, appelé Laurentidien, a recouvert une partie de l'Amérique du nord au cours des 70 000 dernières années; la fonte définitive de celui-ci dans la région de l'Abitibi remonte à environ 10 000 ans, et il a laissé d'importants dépôts (Veillette *et al.* 2004). Parmi les plus importants dépôts, mentionnons l'esker Saint-Mathieu–Berry, qui débute à 8 km au nord ouest de La Motte pour se perdre à 150 km plus au nord, en passant par le lac Berry (voir figure 1). Cet esker est constitué par des accumulations de dépôts très fins à très grossiers dont l'épaisseur est variable, et il forme des chaînes de petites collines dominant la plaine abitibienne (Rondot, 1982). Il est constitué par un ensemble de dépôts fluvio-lacustres, fluvio-glaciaires, lacustres et éoliens. Ces dépôts granulaires peuvent constituer d'importants aquifères. L'esker St-Mathieu–Berry a pris une grande importance depuis l'installation d'une usine d'embouteillage d'eau et, également, depuis que l'eau de la ville d'Amos a été désignée comme la meilleure de toutes les eaux municipales en compétition pour l'année 2001 (sur 61 eaux municipales).

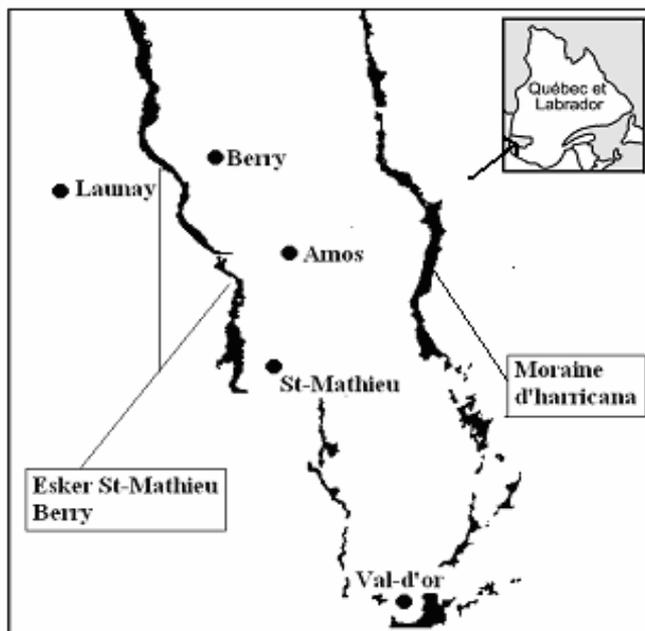


Figure 1. Localisation de l'esker Saint-Mathieu–Berry

Dans le but d'identifier l'ensemble des aquifères qui constituent cet esker, de connaître leur fonctionnement ainsi que d'apporter les éléments nécessaires pour une gestion durable de ceux-ci, une étude hydrogéologique a été entreprise (Veillette *et al.* 2004). Dans ce contexte, une première campagne d'échantillonnage d'eau a été réalisée durant l'été 2003. Les prélèvements ont inclus les sources, les lacs de kettles ainsi que les forages et les piézomètres. Cette campagne d'échantillonnage avait pour but

l'identification des différentes familles hydrochimiques. Sur le terrain, les mesures de température, de pH et de la conductivité électrique de l'eau ont été prises. Ensuite, au laboratoire, l'ensemble des cations et anions majeurs ainsi que certains métaux ont été dosés.

Dans cet article, nous présenterons une brève description des formations quaternaires qui constituent l'esker Saint-Mathieu-Berry, ainsi qu'une identification des différents aquifères fondée sur l'interprétation des analyses hydrochimiques à l'aide de la distribution de fréquences de la conductivité de l'eau et de l'analyse en composante principale. Enfin, nous concluons cet article.

2. FORMATIONS SUPERFICIELLES

Les formations géologiques qui constituent le socle et les dépôts meubles ont été longuement étudiées et cartographiées (Hocq 1989; Labbé 1999; Veillette *et al.* 2003). Une description des différents terrains est présentée dans un autre papier publié dans ce même volume (Veillette *et al.*, 2004); pour cette raison, nous ne présenterons qu'une description assez sommaire de la nature des terrains. Pour plus de détails, nous renvoyons le lecteur au travail de Veillette *et al.* (2004).

Dans le secteur d'étude, de nombreux sondages ont été réalisés et notamment autour de la ville d'Amos. Ces sondages ont été complétés par de la diagraphie électrique, afin de mieux connaître la nature lithologique des formations qui constituent l'esker Saint-Mathieu-Berry ainsi que leur configuration (Jolicoeur 1991; 1977, 1979; Moreau 1999, 2000). Ainsi, les terrains sont essentiellement constitués par des sables et graviers : sable fin, sable fin silteux et argile. Le contact entre le socle rocheux et ses formations meubles peut se faire directement ou il peut être assuré par une formation de *till* compact. La nature variable des couches de sable et de gravier dans l'esker est attribuable au mode de sédimentation chaotique des eskers. Ainsi d'importantes différences ont été constatées. Elles peuvent être résumées aux points suivants :

- La non-uniformité des successions des terrains;
- L'épaisseur des terrains argileux est variable, et elle peut atteindre plus d'une vingtaine de mètres;
- La profondeur du roc est variable; ainsi, dans certains secteurs, l'écart est pratiquement d'une vingtaine de mètres malgré une différence d'altitude de 1 m, ce qui nous permet de suggérer la présence d'autres accidents tectoniques non cartographiés.

Globalement et en se basant sur la nature lithologique des terrains, deux types d'aquifères peuvent être identifiés. Il s'agit de l'aquifère libre, situé dans les horizons superficiels, qui est constitué essentiellement de sable à granulométrie variable, et de l'aquifère captif situé sous une formation imperméable constituée par des argiles. La puissance de ces aquifères est assez variable et, dans les conditions optimales (uniformité des dépôts de nature sableuse et absence de couche imperméable), ils peuvent atteindre une quarantaine de mètres.

C'est dans le but d'identifier chimiquement ces aquifères que cette étude a été entreprise. Dans ce qui suit, nous présenterons les méthodes d'études ainsi que les résultats obtenus.

3. MÉTHODES D'ÉTUDE

En raison du nombre important des échantillons prélevés et afin de mieux synthétiser l'ensemble des informations pour une meilleure connaissance de l'hydrochimie de l'esker Saint-Mathieu - Berry, deux approches ont été utilisées. Il s'agit, d'une part, de l'étude de la distribution des fréquences de la conductivité de l'eau et, d'autre part, de l'analyse en composantes principales des données hydrochimiques issues des sources, des lacs de kettles, des forages et des piézomètres. Dans la partie qui suit, nous présenterons brièvement ces deux méthodes d'étude.

3.1 Distribution des fréquences de la conductivité

De nombreux travaux ont montré (Bakalowicz, 1979) que la minéralisation totale de l'eau est fortement corrélée à la conductivité électrique de l'eau ($r = 0,968$). Également, il a été démontré qu'il existe une relation entre la forme de la distribution de fréquences de la conductivité électrique de l'eau d'une source et le développement du réseau de drainage fonctionnel de l'aquifère (Bakalowicz, 1977, 1978, 1979, 1994). Ainsi, une forme unimodale de la distribution de la conductivité de l'eau, obtenue à partir d'un suivi dans le temps, indique l'absence d'organisation de drainage au sein de l'aquifère (cas des aquifères poreux), alors que des courbes plurimodales indiquent une organisation du réseau système de drainage (cas des aquifères karstiques).

Cette méthode peut être également utilisée dans l'identification des aquifères en utilisant des échantillons prélevés dans un espace bien défini. C'est pour cette raison qu'on la présente dans ce travail. Ainsi, l'étude des échantillons prélevés dans un espace bien défini et lors d'une période de temps bien précise permet d'identifier les différentes familles d'eau et, par conséquent, les différents aquifères.

Les systèmes étudiés sont alimentés uniquement par des précipitations; aucune perte de cours d'eau n'a été localisée, et le réservoir est relativement homogène. De ce fait, les hétérogénéités géochimiques des eaux sont essentiellement induites par la nature des aquifères.

3.2 Analyses en composantes principales

L'analyse en composantes principales (ACP) est une technique d'analyse statistique, portant sur au moins deux variables, permettant une représentation graphique des liens entre variables n et des positions des individus par rapport aux vecteurs de ces variables. Les graphiques sont construits à partir de la matrice des corrélations, et l'ACP représente graphiquement les liens entre les différentes variables et les facteurs choisis. Ces graphiques sont

projetés dans un cercle de rayon 1. Plus la coordonnée de la variable est forte (proche de 1 ou -1) sur un facteur, plus la variable a de liens avec ce facteur. La position des variables est donc déterminée par leurs coordonnées selon les facteurs. Plus deux variables sont proches, plus leur lien est sensé être fort. Cette méthode a été adoptée dans de nombreuses études hydrogéochimiques (Blavoux et Mudry 1985; Lasne 1992; Muet 1985, Maqsoud 1996). Son efficacité est supérieure à d'autres méthodes telles que les diagrammes en barres de Collins, en camembert de Stiff, de Schoeller et de Piper (Güler *et al.* 2002).

4. RÉSULTATS

Sur l'ensemble des échantillons prélevés au niveau des sources, des lacs de kettles et des forages, et en plus des mesures de pH de la conductivité et de la température réalisée sur le terrain, des analyses chimiques ont été réalisées au laboratoire. Ces analyses ont inclus l'ensemble des cations et anions majeurs : il s'agit du calcium (Ca), magnésium (Mg), sodium (Na), potassium (K), chlorure (Cl), sulfates (SO₄), nitrates (NO₃) et les bicarbonates (HCO₃). En plus, le fer (Fe) et la silice (SiO₂) ont été dosés. La localisation des points d'échantillonnage est indiquée à la figure 2. Dans la partie suivante nous présenterons les résultats obtenus à l'aide des deux méthodes d'analyse.

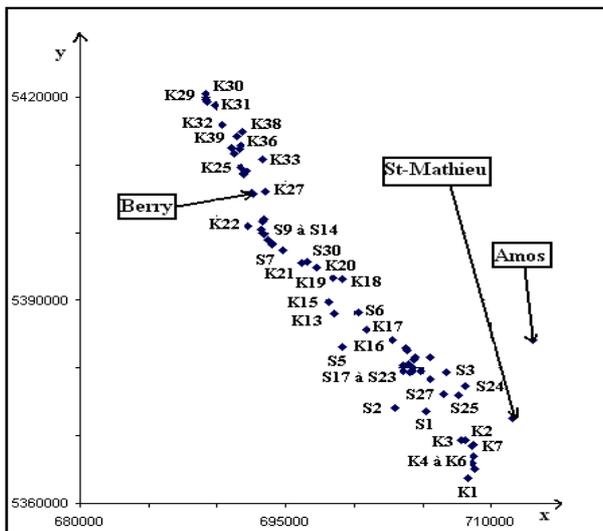


Figure 2. Localisation des points d'échantillonnage

4.1 Distribution de fréquences de la conductivité des eaux

Les courbes de distribution de fréquences sont établies à partir des valeurs de conductivité électrique de l'eau. Pour dresser ces courbes de distribution de fréquences, le choix de l'intervalle de classes est très important et doit être fait en prenant en considération principalement trois critères, qui sont les suivants : i) Le nombre de classes doit être de l'ordre de la dizaine, ii) la fréquence relative maximale doit

être supérieure à 10 %, iii) la largeur de l'intervalle de classe doit être supérieure à l'incertitude de mesure.

Le conductimètre utilisé sur le terrain, dont le calibrage a été effectué quotidiennement, a une incertitude de mesure de l'ordre de 5 µS/cm. Quant à l'intervalle de classe utilisé pour l'établissement des courbes, il est de 20 µS/cm, ce qui a permis d'obtenir un nombre de classes supérieur à 10 et une fréquence maximale supérieure à 10 %. De ce fait, les critères de validité de la méthode ont été satisfaits, ce qui nous permettra d'interpréter les résultats de cette analyse.

Les résultats des distributions de fréquences de la conductivité électrique de l'eau sont indiqués à figure 3. Cette figure montre que les eaux souterraines prélevées au niveau des sources et dans les piézomètres ainsi que dans les forages se répartissent essentiellement en trois familles. La première famille est axée autour d'une conductivité de 25 µS/cm, avec une fréquence maximale de l'ordre de 25 %; la deuxième famille, autour de 85 µS/cm, avec une fréquence maximale de l'ordre de 18 %; et une troisième famille, axée autour de 165 µS/cm et ayant une fréquence maximale de l'ordre de 7 %. Il est important de signaler que certains échantillons dont la conductivité électrique était élevée (300 µS/cm) ont été supprimés de même qu'un autre avec une conductivité de 2730 µS/cm.

En raison de la faible conductivité électrique de l'eau et, par conséquent, de sa faible minéralisation et du fait que ces échantillons correspondent à des sources à faible débit, la première famille d'eau peut être attribuée à l'aquifère superficiel des sables éoliens, voire à des eaux d'écoulement hypodermique où le temps de séjour est relativement court. La deuxième famille, qui est axée autour de 85 µS/cm, peut être attribuée à l'aquifère libre des formations granulaires qui constituent l'esker. Quant à la troisième famille, qui est axée autour de 165 µS/cm, elle peut être attribuée à l'aquifère captif contenu dans les formations granulaires qui constituent l'esker. Cette interprétation attribuée aux différentes classes, notamment pour la troisième famille, concorde pleinement avec la nature des terrains rencontrés lors du forage des piézomètres, où plusieurs mètres d'argile ou de silt argileux recouvrent les sables et graviers.

Quant à la distribution de fréquences de la conductivité des eaux des kettles, trois classes peuvent également être individualisées. La première classe, la plus importante, avec une fréquence maximale de 65 %, est axée autour de la valeur de 25 µS/cm. La deuxième classe est axée autour de 125 µS/cm, avec une fréquence maximale de l'ordre de 8 % et, enfin, une troisième famille axée autour de 185 µS/cm et ayant une amplitude maximale de 8 %. Au-delà de 200 µS/cm, aucune valeur n'a été mesurée. La première classe, qui est axée autour de 25 µS/cm, représente la majorité des kettles du secteur d'étude. En raison de la faible conductivité de l'eau de pluies (3 µS/cm), ces kettles peuvent être alimentés essentiellement par les précipitations. Quant aux autres classes, l'identification de leur origine ne peut pas être faite en raison de l'absence de toute étude mettant en jeu l'interaction entre les eaux de kettles et celles des différents aquifères. Nous allons tout de

même essayer d'apporter des éléments de réponse en étudiant les analyses en composantes principales.

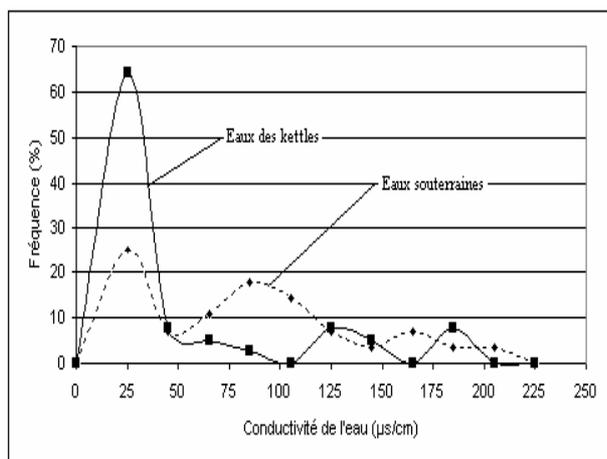


Figure 4. Distribution de fréquence de la conductivité électrique de l'eau des sources

4.2 Analyse en composante principale

Une analyse en composante principale a été réalisée en utilisant les données hydrochimiques des eaux des sources ainsi que celles des eaux des forages et, par conséquent, elle sera réalisée sur les eaux souterraines. En plus des paramètres déjà présentés plus haut, la pCO₂ a été calculée ainsi que la variation du pH par rapport au pH d'équilibre à l'aide du logiciel Soluteq dérivé de Watespec (Wigley, 1977). En plus des balances ioniques qui ont été calculées, afin de tester la fiabilité des analyses chimiques, un autre paramètre qui correspond à l'indice d'échange des cations a été calculé. Seuls quelques échantillons ont un indice d'échange positif, alors que la globalité présente un indice négatif montrant ainsi l'absence d'échange des cations au sein des différents aquifères. C'est pour cette raison que le paramètre n'a pas été pris en considération dans cette ACP.

4.2.1 Eaux souterraines

Le calcul a été arrêté à trois axes, à savoir les axes F1, F2 et F3. Ainsi, le facteur F1 exprime 44,1 % de la variance, le facteur F2, 19,4 %, et le facteur F3, 9,0 %. Ces trois facteurs expriment donc 72,5 % de la variance totale.

Le facteur F1 est corrélé (voir Tableau 1) positivement au Ca, Mg, Na, K, HCO₃, Cl, dpH et négativement à la pCO₂. Le facteur F2 est corrélé négativement au SO₄ et au SiO₂. Quant au facteur F3, il est corrélé positivement au NO₃.

La matrice des coefficients de corrélation montre que : le Ca est fortement corrélé au Mg, HCO₃, Cl, SO₄ et dpH; le Mg est corrélé au HCO₃, au Cl, et dpH; le Na est corrélé au K; le K au HCO₃ et au dpH; les HCO₃ sont corrélés au Cl et au dpH ; le SO₄ est relativement corrélé au SiO₂.

Tableau 1: Corrélations entre les axes et les variables

	Axe 1	Axe 2	Axe 3
Ca	0,91	-0,38	-0,096
Mg	0,91	-0,26	-0,02
Na	0,56	0,45	0,11
K	0,63	0,39	-0,11
HCO ₃	0,95	-0,06	-0,13
Cl	0,71	-0,32	0,14
SO ₄	0,45	-0,72	-0,10
NO ₃	0,02	0,19	0,93
SiO ₂	0,10	-0,78	0,32
Fe	-0,42	-0,29	0,07
PCO ₂	-0,62	-0,51	-0,05
dpH	0,83	0,38	-0,16

Le sodium et le potassium sont associés et opposés au chlorure (Voir Figure 4). Également, le sodium et la silice sont complètement dissociés, d'où une origine différente. En effet, le sodium et le potassium peuvent être apportés par les précipitations ou bien encore par le salage des routes. Le fait que ces deux derniers sont opposés aux chlorures par rapport à l'axe F2 suggère qu'une partie de ces ions provient de minéraux silicatés présents dans le sol alors que le SiO₂ peut provenir de la mise en solution de la silice à l'intérieur de l'aquifère. Cette mise en solution de la silice est très lente et suggère un temps élevé.

Les sulfates ne sont pas associés aux nitrates ; cela permet de supposer des origines différentes. L'ion sulfate peut provenir des précipitations atmosphériques ou par oxydation des minéraux sulfurés. L'origine atmosphérique suppose que les sulfates et les chlorures auraient une évolution similaire, c'est-à-dire que ces deux ions doivent évoluer ensemble. Par conséquent, une augmentation en chlorures est accompagnée d'une augmentation en sulfates. Dans notre cas, la majorité des échantillons ne présentent pas cette relation, c'est-à-dire que l'augmentation en sulfate n'est pas accompagnée d'une augmentation en chlorures et, de ce fait, l'origine externe des sulfates est exclue de même que l'effet de l'activité biologique en été, qui a tendance à immobiliser le soufre dans la matière vivante (Gieseking, 1975 ; Bakalowicz, 1980). Par conséquent, les sulfates proviennent de l'oxydation des minéraux sulfureux.

Quant aux nitrates, ils sont généralement concentrés dans la biomasse. Ils ont une origine essentiellement anthropique quand ils sont introduits dans le système soit par lessivage des engrais épandus, soit par le rejet des eaux usées. En raison de la dissociation entre les sulfates et les nitrates, l'origine anthropique est exclue et, par conséquent, toutes pollutions. Ainsi, les nitrates sont essentiellement attribués à la dégradation de la matière organique.

Tableau 2: Matrice des coefficients de corrélation entre les paramètres chimiques des eaux des kettles

	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	Cl	SO ₄	NO ₃	SiO ₂	Fe	PCO ₂	dpH
Ca	1,00											
Mg	0,93	1,00										
Na	0,31	0,37	1,00									
K	0,42	0,44	0,57	1,00								
HCO ₃	0,91	0,89	0,30	0,56	1,00							
Cl	0,77	0,77	0,04	0,30	0,59	1,00						
SO ₄	0,68	0,52	0,15	0,04	0,47	0,38	1,00					
NO ₃	-0,03	0,01	-0,18	0,15	-0,09	-0,01	-0,13	1,00				
SiO ₂	0,34	0,24	-0,33	-0,18	0,12	0,27	0,49	-0,06	1,00			
Fe	-0,26	-0,24	-0,46	-0,33	-0,34	-0,17	0,07	-0,03	0,09	1,00		
PCO ₂	-0,36	-0,40	-0,42	-0,46	-0,52	-0,20	-0,004	-0,19	0,25	0,38	1,00	
dpH	0,62	0,65	0,52	0,60	0,84	0,30	0,15	0,003	-0,24	-0,39	-0,79	1,00

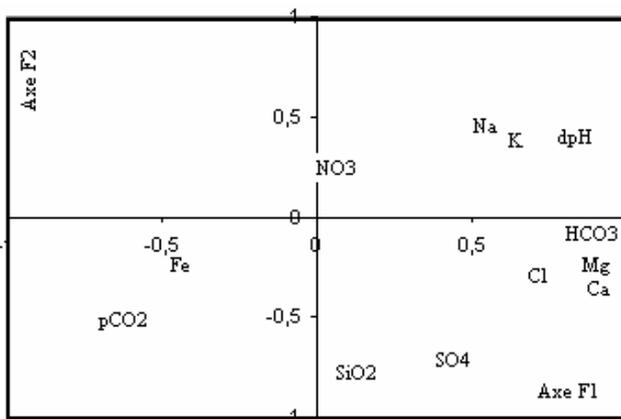


Figure 4. ACP des eaux souterraines de l'esker Saint-Mathieu-Berry : espace des variable F1-F2

Le fait que le facteur F1 présente un pôle (voir Figure 4) où la majorité des ions est concentré, à savoir Ca, Mg, HCO₃, peut être interprété comme axe de minéralisation. En effet, en analysant la répartition des échantillons, il apparaît que l'échantillon 6 (qui tire beaucoup sur l'axe), ayant une conductivité de 364 $\mu\text{S}/\text{cm}$, est opposé aux échantillons 8 à 14 (voir Figure 5) et qu'il a une conductivité électrique faible et comprise entre 17 et 22 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Du fait que l'échantillon 6 tire beaucoup sur l'axe, une nouvelle ACP a été réalisée, afin de vérifier la structure du système et également de vérifier que cette structure n'est pas induite par une erreur dans le dosage des différentes espèces minérales. La nouvelle ACP (non présentée ici) montre une structure similaire avec les mêmes facteurs que ceux de la première analyse. Dans l'espace des échantillons, on retrouve la même opposition (échantillons 23 et 24 ayant une conductivité comprise entre 160 et 190 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et opposée aux mêmes échantillons 8 à 13). De ce fait, nous avons conservé la première ACP. Par conséquent, le facteur F1 oppose des échantillons fortement minéralisés et ayant probablement un temps de séjour élevé (en raison des concentrations en Mg, qui nécessitent un temps de séjour important au sein de l'aquifère) aux échantillons faiblement minéralisés et ayant un faible temps de séjour dans l'aquifère.

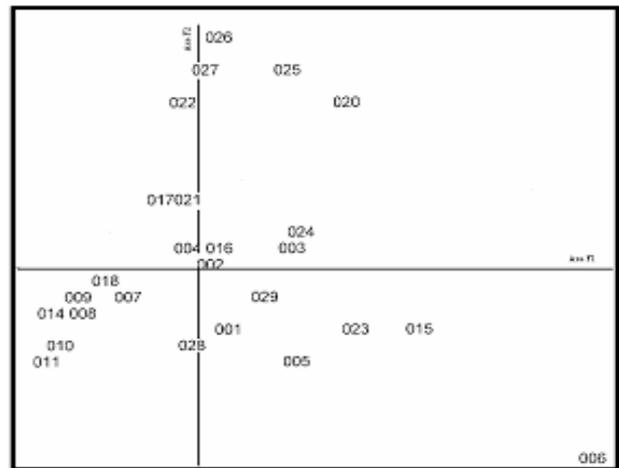


Figure 5. ACP des eaux souterraines de l'esker Saint-Mathieu-Berry : espace des échantillons F1-F2

L'axe F2, dans sa partie négative, oppose la silice et les sulfates au sodium et potassium et, également, les nitrates en moindre importance (voir figure 4). Nous avons conclu, plus haut, que les ions potassium et sodium proviennent des minéraux silicatés retrouvés dans le sol, alors que l'origine de la silice et des sulfates est attribuée à l'aquifère lui-même. La mise en solution de la silice ainsi que celle des sulfates en provenance des minéraux sulfureux nécessite un temps de séjour important au sein de l'aquifère. Ainsi, cet axe oppose des échantillons ayant acquis une minéralisation en surface aux échantillons ayant séjourné longtemps dans l'aquifère. Par conséquent, cet axe peut être interprété comme temps de séjour, voire même permettre une identification des aquifères libres et captifs.

Dans l'espace des échantillons (voir Figure 5), le facteur F2 oppose les échantillons 25 à 27 ayant des faibles teneurs en sulfates (0,66, 0,81 et 0,86 mg/l) et en silice (0,14, 0,09 et 0,02 mg/l) aux échantillons 1, 5 et 28, où les teneurs en sulfates peuvent dépasser 9,5 mg/l, et la teneur de la silice dépasse 14,5 mg/l.

Quant à l'axe F3, il n'est corrélé qu'aux nitrates (voir Figure 6) dont l'origine provient de la biomasse. En raison du faible

pourcentage exprimé par ce facteur (<10 %), il ne peut être expliqué.

ainsi que le dpH n'ont pas été pris en considération dans cette analyse.

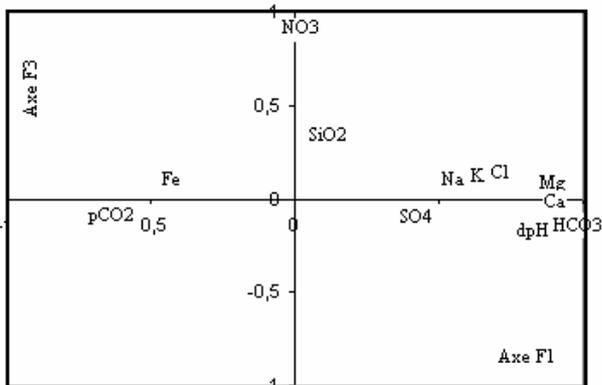


Figure 6. ACP des eaux souterraines de l'esker Saint-Mathieu-Berry : espace des variable F1-F3

La deuxième ACP montre que le facteur F1 exprime 56,2 % de la variance, le facteur F2, 16,5 % et, enfin, le facteur F3, 9,7 %. Ainsi, ces trois facteurs expriment 82,4 % de la variance.

Le facteur F1 est corrélé (voir Tableau 3) positivement au Ca, Mg, Na, HCO₃, Cl, SO₄, SiO₂, alors que dans la partie négative de cet axe, aucun élément n'est présent (voir Figure 7). Le facteur F2 est corrélé positivement au Fe et au NO₃. Quant au facteur F3, il est corrélé positivement et uniquement au K.

La matrice de corrélation (voir Tableau 4) montre que : le Ca est fortement corrélé au Mg, Na, HCO₃, SO₄, SiO₂ et dpH; le Mg est corrélé au HCO₃, Na, SO₄, SiO₂ et au dpH; le Na est corrélé au HCO₃, Cl, SO₄, SiO₂, dpH; le K est corrélé au NO₃; le HCO₃ est corrélé au SiO₂ et au dpH ; le SO₄ est corrélé au SiO₂, alors que le Fe ne semble être corrélé à aucun de ces éléments.

4.2.2 Eaux des kettles

Comme pour les eaux des sources, le calcul a été arrêté à trois axes, à savoir les axes F1, F2 et F3. Ainsi, le facteur F1 exprime 55,4 % de la variance, le facteur F2, 16,4 % et le facteur F3, 12,5 %. Ces trois facteurs expriment donc 84,3 % de la variance totale et, par conséquent, on peut considérer que la structure présentée par ces facteurs est assez forte. Dans l'espace des échantillons, il apparaît qu'un échantillon tire beaucoup sur l'axe F2, qui est caractérisé par des teneurs en sulfates et en nitrates. Cela suppose que cet échantillon est contaminé par les engrais utilisés dans une pépinière située à proximité du point d'échantillonnage, et qui reçoit l'excédent de l'eau non utilisée par cette pépinière. C'est pour cette raison que cet échantillon a été éliminé et qu'une nouvelle ACP a été réalisée. En outre, la pression de CO₂ calculée montre des valeurs anormalement élevées et, de ce fait, ce paramètre

Tableau 3: Corrélations entre les axes et les variables

	Axe 1	Axe 2	Axe 3
Ca	0,95	-0,18	-0,15
Mg	0,96	-0,13	-0,12
Na	0,96	0,11	0,09
K	0,34	-0,06	0,87
HCO ₃	0,93	-0,23	-0,14
Cl	0,61	0,46	0,25
SO ₄	0,85	-0,08	0,09
NO ₃	0,08	0,74	-0,001
SiO ₂	0,89	0,06	-0,24
Fe	0,12	0,86	-0,14

Tableau 4: Matrice des coefficients de corrélation entre les paramètres chimiques des eaux des kettles

	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	Cl	SO ₄	NO ₃	SiO ₂	Fe
Ca	1,00									
Mg	0,99	1,00								
Na	0,84	0,87	1,00							
K	0,25	0,26	0,32	1,00						
HCO ₃	0,99	0,99	0,80	0,26	1,00					
Cl	0,42	0,45	0,78	0,22	0,37	1,00				
SO ₄	0,73	0,74	0,83	0,31	0,70	0,50	1,00			
NO ₃	0,005	0,05	0,09	0,023	-0,02	0,20	0,007	1,00		
SiO ₂	0,84	0,84	0,79	0,17	0,82	0,40	0,74	-0,047	1,00	
Fe	-0,027	0,002	0,15	-0,05	-0,07	0,37	-0,009	0,44	0,29	1,00

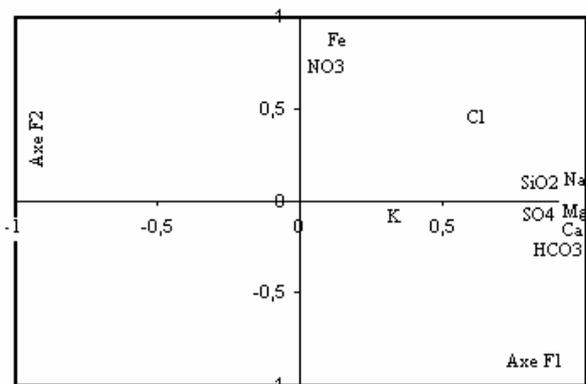


Figure 7. ACP des eaux des kettles de l'esker Saint-Mathieu-Berry : espace des variable F1-F2

Dans l'espace des échantillons (voir figure 8), le facteur F1 oppose des échantillons à minéralisation relativement élevée à des échantillons faiblement minéralisés. Ainsi, ce facteur oppose les échantillons 8 et 10, ayant respectivement une conductivité de 171 et 130 $\mu\text{S}/\text{cm}$, aux échantillons 1, 4, 5, 6, 7, 20, 21 et 22, ayant une conductivité de moins de 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La faible conductivité et la minéralisation de ces derniers échantillons nous amènent à considérer que ces kettles sont alimentés uniquement par les précipitations, alors que les échantillons à forte minéralisation peuvent être considérés comme des lacs ayant au moins une alimentation supplémentaire et provenant de l'aquifère de l'esker. En effet, les visites sur le terrains nous ont permis d'observer que ces kettles sont à la fois sujet d'une alimentation par de nombreuses petites sources et, également, qu'ils disposent d'une sortie d'eau, ce qui n'est pas le cas pour les kettles à faible minéralisation, qui sont fermés, sans alimentation ni déversement. De ce fait, cet axe correspond à la différenciation des kettles du point de vue de leur origine.

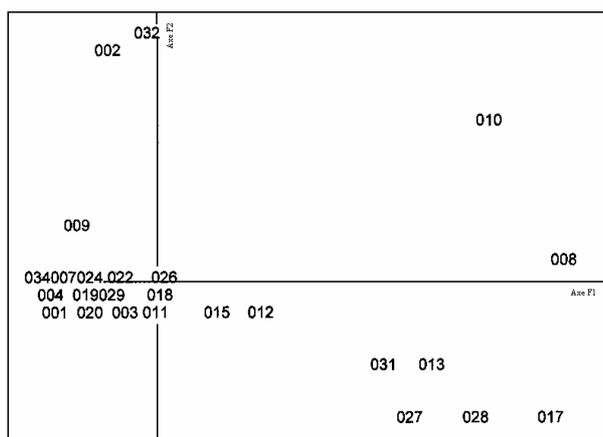


Figure 8. ACP des eaux des kettles de l'esker Saint-Mathieu-Berry : espace des échantillons plan F1-F2

Le facteur F2 est corrélé au fer et aux nitrates. Ces deux ions sont relativement liés (voir matrice de corrélation). Compte tenu du fait que les nitrates proviennent de la dégradation de la matière organique et que le fer peut être complexé à matière organique et mis en solution dans une milieu réducteur (sans oxygène), cette association ne peut être réalisée que dans un milieu confiné (milieu peu perméable ou captif). En raison de la corrélation entre les nitrates et le fer et compte tenu du fait que les pCO_2 ont été très élevées, en raison de l'activité biologique et de la présence des tourbières, cet axe peut être attribué à une alimentation de certains lacs de kettles par les eaux des tourbières.

Quant au facteur F3, il ne peut être interprété en raison du faible pourcentage exprimé par ce facteur.

5. CONCLUSION

La campagne de terrain, réalisée durant l'été 2003, nous a permis de prélever de nombreux échantillons le long de l'esker Saint-Mathieu-Berry. Cette campagne d'échantillonnage avait pour but d'établir une première identification des différentes familles chimiques de l'eau. Les prélèvements ont inclus à la fois les sources, les lacs de kettles ainsi que les forages et les piézomètres. Les mesures sur le terrain ont permis de déceler de nombreuses différences au niveau des valeurs de pH, de température ainsi qu'au niveau de la conductivité. Du fait que ce dernier paramètre est fortement corrélé à la minéralisation totale de l'eau, il a été étudié indépendamment des autres paramètres, en analysant sa courbe de distribution de fréquences. Cet outil facile à utiliser, ainsi que le fait que la conductivité électrique est facilement mesurable sur le terrain, nous permet d'identifier les différentes familles d'eau. Ainsi, concernant les eaux souterraines, trois familles ont été identifiées : la première famille est axée autour d'une conductivité de 25 $\mu\text{S}/\text{cm}$, qui est attribuée à l'aquifère superficiel des sables éoliens, voire à des eaux d'écoulement hypodermique; la seconde famille est axée autour de 85 $\mu\text{S}/\text{cm}$, et elle est attribuée à l'aquifère libre des formations granulaires qui constituent l'esker; quant à la troisième famille, axée autour de 165 $\mu\text{S}/\text{cm}$, elle est attribuée à l'aquifère captif contenu dans les formations granulaires qui constituent l'esker. Quant à la distribution de fréquences de la conductivité des eaux des lacs de kettles, trois classes peuvent également être individualisées. La première classe, qui est axée autour de 25 $\mu\text{S}/\text{cm}$, représente la majorité des lacs de kettles du secteur d'étude. En raison de la faible conductivité de l'eau de pluie (3 $\mu\text{S}/\text{cm}$), ces kettles peuvent être alimentés essentiellement par les précipitations.

L'analyse en composantes principales des eaux souterraines a permis de montrer l'existence de plusieurs familles d'eau. Ainsi, deux grandes familles sont nettement individualisées : il s'agit des eaux fortement minéralisées et des eaux très faiblement minéralisées, qui sont attribuables à des eaux à très court séjour dans l'aquifère. En ce qui concerne les eaux minéralisées, on y distingue deux groupes : l'un correspond à des échantillons à séjour prolongé dans l'aquifère confirmée par les teneurs en

sulfates. Cette distinction est attribuée à la séparation des eaux des aquifères captifs et de l'aquifère libre. Quant aux eaux des lacs des kettles, au moins deux origines peuvent être identifiées avec une composante de drainage à travers les tourbières.

Les deux outils utilisés nous ont permis d'identifier, en partie, les principaux aquifères de l'esker Saint-Mathieu-Berry. Ils nous permettront de cibler les travaux à venir concernant le fonctionnement de ces aquifères et les démarches à entreprendre pour une gestion durable de ces aquifères.

6. REMERCIEMENTS

Ce projet a été financé à l'aide de fonds provenant de Développement économique Canada et, également, de la Fondation de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue. Il est également supporté par la MRC d'Abitibi et la ville d'Amos.

7. RÉFÉRENCES

- Boileau G., et Dumond M., 1979. L'Abitibi-Témiscamingue, Éditeur officiel du Québec, pp 155-206.
- Rondot, J. 1982. L'esker du Lac Berry. Publication du Gouvernement du Québec. Ministère de l'Énergie et des Ressources, direction de la Géologie. ISBN 2-550-02223-8.
- Labbé, J-Y. 1999. Étude géologique dans la région d'Amos (recueil de 4 articles), Publication du gouvernement du Québec, Géologie Québec, ET 98-04, 87 pp.
- Imrech, I., 1982. Sillon de la Motte-Vassan et son avant pays méridional : synthèse volcanologique, lithostratigraphique et gîtologique. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec; MM 82-04.
- Jolicoeur, M. 1991. Rapport d'étude hydrogéologique section sud de l'esker où est situé le puits collecteur, Sogesteau ltée, 33 p., 6 annexes.
- Jolicoeur, M., 1991. Rapport de l'étude hydrogéologique visant à tracer la limite extrême nord de la zone de protection tertiaire assignée au puits d'alimentation en eau potable de la ville d'Amos, Sogesteau ltée, 37 p., 7 annexes.
- Jolicoeur, M., 1977. Étude hydrogéologique pour l'alimentation en eau – Ville d'Amos, Compagnie internationale des eaux (Québec) ltée 1977, réf. 1-1-01-0127-10, 32 p., 9 annexes, 3 cartes.
- Jolicoeur, M. 1979. Localisation du futur site d'implantation d'un collecteur à drain horizontaux (Felhman) à Amos, Compagnie internationale des eaux (Québec) ltée, réf. 1-1-01-0127-20, 11p., 1 annexe.
- Moreau, B. 2000. Implantation de cinq puits d'observation additionnels dans la partie nord de l'esker d'Amos, Technologies DOZ inc., Projet 99-1244, 13 p., 1 annexe, 1 carte.
- Moreau, B. 1999. Opinion sur la zone de protection à définir du puits collecteur de la ville d'Amos partie Sud-, 1999, Technologies DOZ inc. projet 99-1224, 16 p., 2 annexes.
- Maqsoud, A., 1996. Approche hydrologique et hydrochimique du caractère karstique éventuel de la craie du Bassin de Paris, Thèse Univ. Lille I, 324p.
- Güler, C., G-D. Thyne, J-E. McCray, A-K. Turner, 2002. Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data, Hydrogeology Journal, Vol. 10, pp. 455-474.
- Bakalowicz, M. 1980. Un précieux informateur hydrologique : le système chimique CO₂-H₂O-Carbonate. Acte du coll. Cristallisation, Déformation, Dissolution des Carbonates, Bordeaux, pp. 11-23.
- Bakalowicz, M. 1976. Géochimie des eaux karstiques. Une méthode d'étude de l'organisation des écoulements souterrains. Actes du 2^e Coll. d'hydrologie en pays calcaire, Besançon, Ann. Sci., univ. Beasçon, Géologie, 3^e série, fasc. 25, pp. 49-58.
- Bakalowicz, M. 1977. Relation entre la dynamique des eaux du karst et les processus de karstification. Proc. 7th Inter. Spleol. Congress, Sheffield, pp. 10-12.
- Bakalowicz, M. 1979. Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et à la karstification. Thèse Doc. État. Univ Paris VI, 269.
- Bakalowicz, M. 1994. Water geochemistry: water quality and dynamics. Groundwater Ecology, chap. 4, pp.97-127. Academic press.
- Blavoux, B., J. Mudry 1986. Utilisation de l'analyse en composantes principales pour l'étude du fonctionnement hydrocinématique de trois aquifères karstiques de la France. Hydrogéologie, n° 1, pp. 53-59.
- Lasne, E. 1992. Étude de la structure et du fonctionnement hydrodynamique et hydrochimique d'un système hydrologique karstique en milieux crayeux. Conceptualisation et modélisation de ce milieu à triple porosité. Exemple du système des Trois Fontaines, Saint-Loup-de Genois, Loiret, Thèse Univ. Orléans, 1992, p. 437.
- Muet, P., 1985 Structure, fonctionnement et évolution de deux systèmes aquifères karstiques du nord du Causse de Martel (Corrèze). Thèse 3^e cycle, univ. Orléan, 1985, 386 p.
- Veillette, J. Maqsoud, A., de Corta, H., et Bois, D. 2004 Hydrogéologie des eskers de la MRC d'Abitibi, Québec. Proceeding of 57 Canadian Geotechnical Conference - 5th Joint IAH-CNC/CGS
- Veillette, J.J., Paradis, S.J. et Thibaudeau, P. 2003. Les cartes de formations en surface de l'Abitibi. Commission géologique du Canada, Dossier public 1523, 10 cartes, échelle 1 : 100 000.