

Isostasie postglaciaire différentielle au lac-Saint-Jean (Québec) et implications sur la qualité de l'eau souterraine / Post glacial differential isostasy in the Lac-Saint-Jean area (Quebec) and implications for the quality of groundwater



Denis W. ROY¹, Guillaume BEAUDOIN¹, Éric LEDUC², Alain ROULEAU¹, Julien WALTER¹, Romain CHESNAUX¹, Pierre COUSINEAU¹.

¹ *Sciences de la Terre, Université du Québec à Chicoutimi, Saguenay, Québec, Canada*

² *Géographie, Université du Québec à Montréal, Montréal, Québec, Canada*

RÉSUMÉ

Cette étude présente d'abord le pourtour complet du maximum marin (mer de Laflamme) au Lac-Saint-Jean (Québec) et la position du premier rivage lacustre développé pendant la remontée isostatique postglaciaire qui se poursuit toujours. Suit une discussion de l'origine possible des eaux salines diluées, localement présentes au Lac-Saint-Jean : eau marine postglaciaire, eaux sous glaciaires et vieilles eaux profondes du Bouclier canadien.

ABSTRACT

This study describes first the complete outline of the highest marine level in the Lac-Saint-Jean area (Québec) as well as the position of the first shoreline of the fresh water lake that replaced the Laflamme sea during the last post glacial uplift (still ongoing). Then, the possible origin of the dilute salty waters found here and there in the Lac-Saint-Jean area is discussed: post glacial sea water, sub-glacial waters and deep Canadian Shield old waters.

1 INTRODUCTION

Les lacs postglaciaires laissent normalement des traces de leur histoire dans les basses terres qui les entourent. Dans le cas du lac Saint-Jean (Figure 1), une phase marine précoce est reconnue depuis longtemps (Laflamme, 1886, cité par Dionne, 1968). La délimitation proposée par LaSalle et Tremblay (1978) de la position du maximum marin dans la cuvette du Saguenay – Lac-Saint-Jean a été précisée et complétée par une bonne mise à jour récente de la carte des dépôts meubles de la région (Daigneault et al., 2011), mais la date et le niveau de la naissance de la phase lacustre actuelle demeurent indéterminés. L'identification de la position du maximum lacustre du lac Saint-Jean est donc le premier objectif de cette communication.

Par ailleurs, la cuvette du Saguenay – Lac-Saint-Jean forme une dépression de 250 km de long, de 50-60 km de large et de 300-900 m de profond au cœur d'un vaste bassin de drainage des eaux de surface (88 000 km², MDDEP, 2011), vraisemblablement partagé avec les eaux souterraines. Un premier inventaire géochimique des eaux souterraines salines au Saguenay – Lac-Saint-Jean montre une grande variété de compositions (Walter, 2010). L'analyse des eaux interstitielles dans l'argile de Saint-Jean-Vianney suite au glissement de 1971 montre qu'elles sont « douces » près de la surface et « salines » à partir de quelques dizaines de mètres de profondeur (Larochelle, 1974), suggérant nettement une origine marine dans ce cas. Les origines possibles des diverses eaux souterraines salines de la région font l'objet de la deuxième partie de cette communication.

2 EFFETS DE L'ISOSTASIE DIFFÉRENTIELLE

L'histoire de la remontée isostatique, la position et l'âge des fossiles marins, ainsi que la distribution des dépôts meubles et des formes de terrain servent de base à l'analyse de la position probable du maximum lacustre au Lac-Saint-Jean. Nous postulons, entre autres, qu'un talus d'érosion (plus ou moins continu) devrait correspondre à l'émergence du seuil qui a séparé le nouveau lac (à l'ouest) de la partie encore marine (à l'est) de la mer de Laflamme.

2.1 Isostasie régionale

Au maximum de l'envahissement marin des basses terres du Saguenay – Lac-Saint-Jean, la mer de Laflamme se divise en un sous-bassin « Est » et un sous-bassin « Ouest » correspondant respectivement aux basses terres du Haut-Saguenay entre les seuils du Cap Éternité et de Kénogami, et à celles du Lac-Saint-Jean à l'ouest du seuil de Kénogami (Figure 1b). Ces deux bassins sont reliés entre eux et avec la mer de Goldthwait essentiellement par des « détroits » profonds qui traversent ces deux seuils et qui sont maintenant occupés par la rivière Saguenay et le fjord du Saguenay. Au Lac-Saint-Jean, le niveau marin maximal se retrouve maintenant aux altitudes 170 m au sud-est du lac Saint-Jean, 200 m au nord-est, 195 m au sud-ouest et 218 m au nord-ouest; avec 48 m de différence d'altitude entre le point le plus élevé et le point le plus bas (distants de 101,5 km); il dessine une surface inclinée vers le sud-est avec une pente d'environ 0,47 m par km (Figure 2).

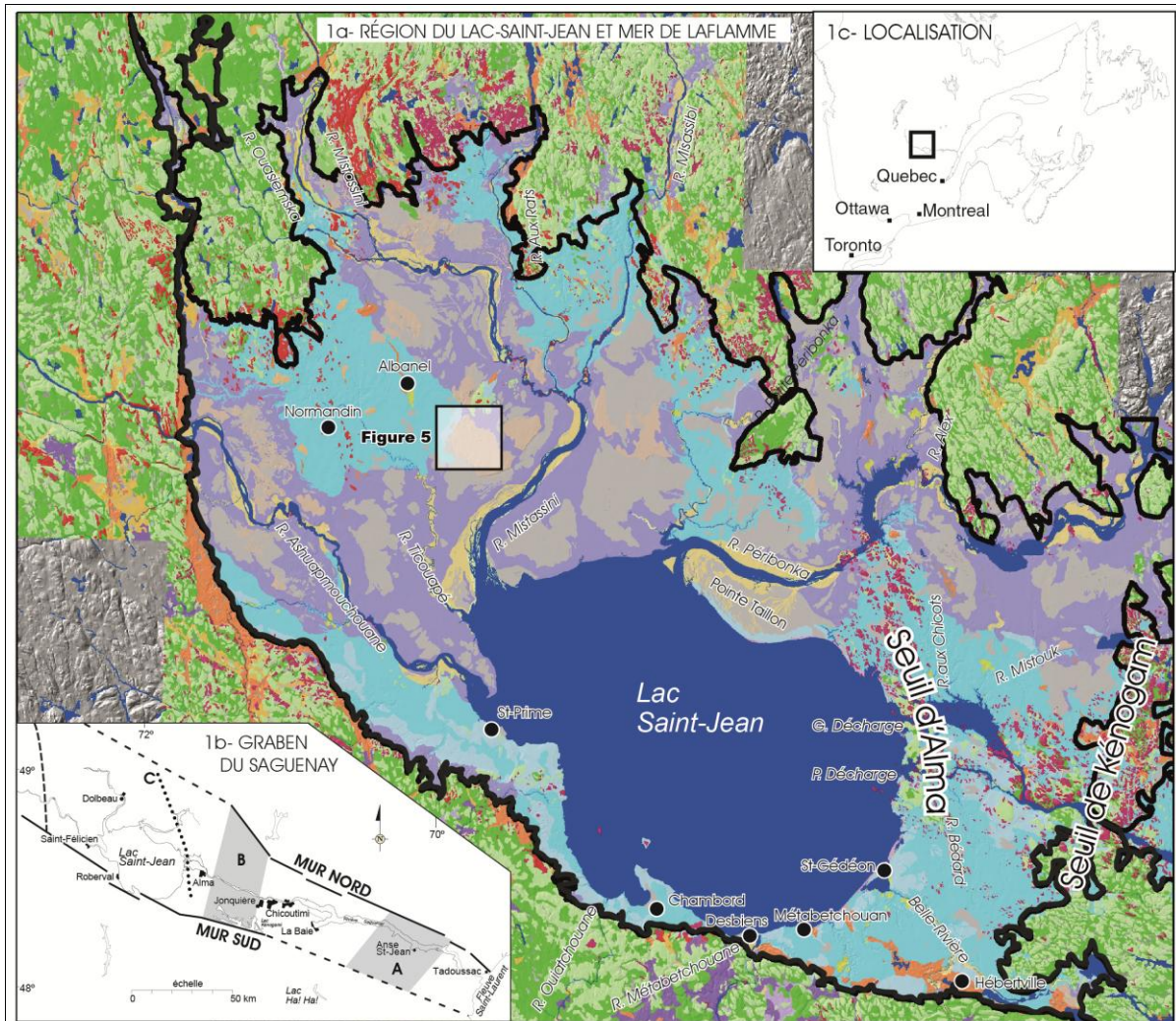


Figure 1- Région du Lac-Saint-Jean et mer de Laflamme. 1a- Ligne noire continue : Positions proposées du maximum marin au Lac-Saint-Jean. Affleurements rocheux (rouge). Tills glaciaires épais (vert moyen) et minces (vert pâle). Dépôts juxta glaciaires (orange) et d'épandage (jaune moyen). Dépôts « glacio-marins » deltaïques (violet), profonds (bleu moyen) et littoraux (bleu clair). Dépôts et formes éoliennes (beige). Dépôts organiques (gris clair). Alluvions récentes (jaune pâle). Tiré de Daigneault et al. (2011). 1b- Graben du Saguenay- A) seuil du Cap Éternité, B) seuil de Kénogami et C) seuil d'Alma au fond du graben du Saguenay.

Le lac Saint-Jean est né lorsque le seuil d'Alma a émergé et l'a séparé de la partie encore marine du bassin du lac Saint-Jean, située entre les seuils d'Alma et de Kénogami (Figure 1). Le seuil d'Alma, à l'est du lac Saint-Jean, se caractérise par une bande de petites collines de roc qui se prolonge vers l'ONO, où la remontée isostatique est plus importante, et qui disparaît progressivement sous les dépôts meubles vers le sud, où la remontée est moins importante (Figures 1 et 2).

Suite à l'émergence du seuil d'Alma, la remontée isostatique différentielle a dégagé davantage de terrain à l'ouest et au nord du lac qu'au sud et à l'est, réduisant d'autant la superficie initiale du lac; ce basculement des terrains a maintenu le débordement du seuil dans le quartier sud-est. La concentration du débordement dans le secteur d'Alma y implique une érosion glaciaire plus forte que dans d'autres parties du seuil, érosion qui y a

provoqué un ensemlement relatif et y a induit une érosion fluviale préférentielle des chenaux de débordement les plus utilisés après l'émergence. Quelques terrasses d'érosion fluviale parallèles aux lits actuels de la Grande-Décharge et de la Petite-Décharge demeurent visibles (Daigneault et al., 2011). Bref, le niveau actuel d'environ 100 m du lac Saint-Jean reflète à la fois l'isostasie différentielle des terrains et l'érosion partielle du seuil d'Alma depuis son émergence

Le taux actuel de remontée isostatique (mesuré par rapport à la ville de Québec) a été déterminé pour les régions de Québec, Charlevoix, et Saguenay – Lac-Saint-Jean suite à une analyse statistique approfondie des écarts constatés entre le nivellement initial des bornes géodésiques (milieu du 19^e siècle) et un nouveau nivellement datant du début des années 1960 (Vanicek et Hamilton, 1972). Les iso-contours des taux actuels de

remontée, généralement orientés NE-SO, dessinent une surface inclinée au sud-est dans la région du Saguenay – Lac-Saint-Jean (Figure 3). Si la différence de 2 mm/a entre les taux de remontée isostatique actuels obtenus

pour Saint-Félicien et Hébertville (distants de 50 km) est extrapolée pour 8 000 ans, la pente de la surface est de 0,32 m/km.

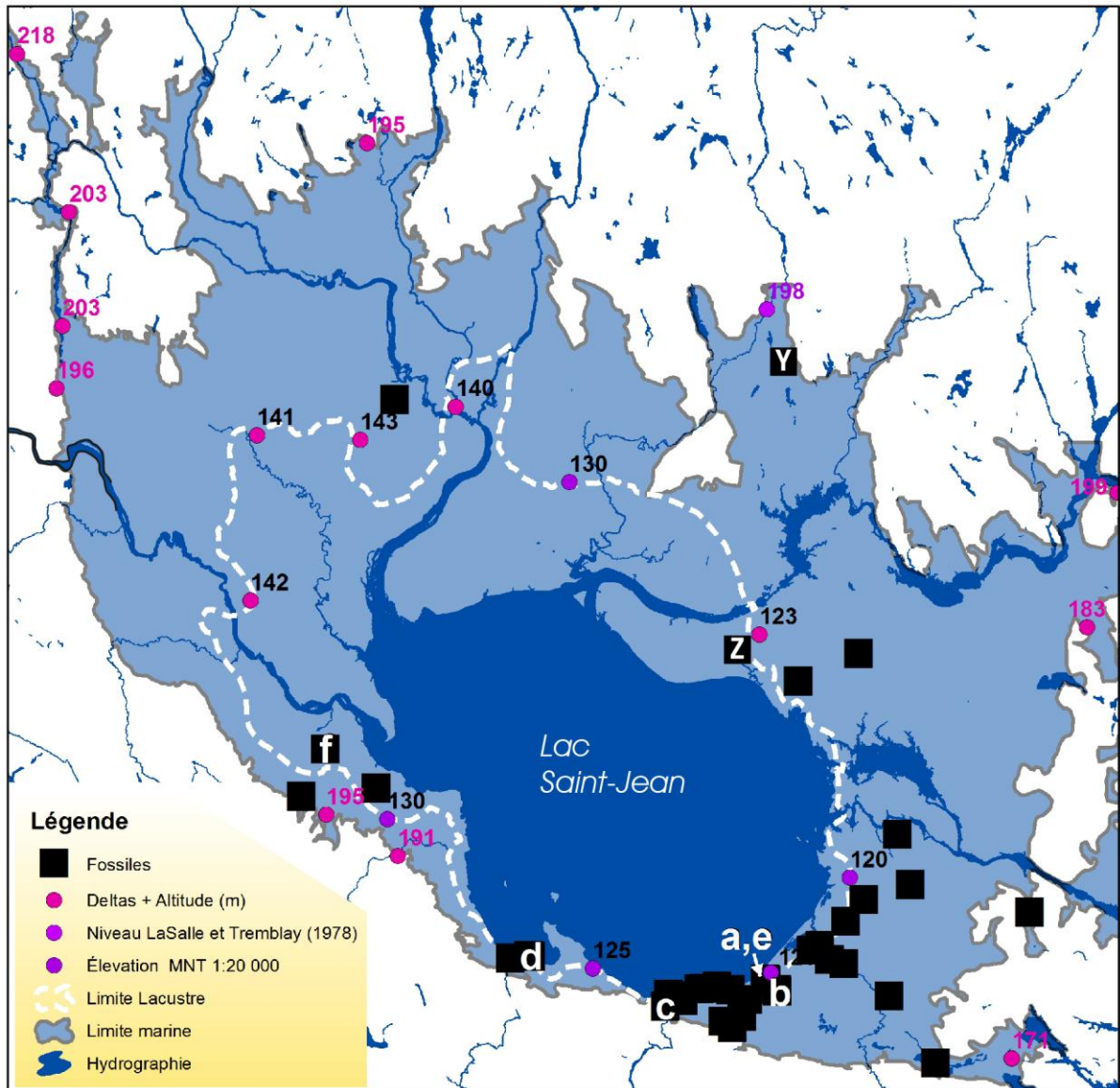


Figure 2- Sites fossilifères et limites marine et lacustre. Limite marine (simplifiée au nord) tracée d'après Daigneault et al. (2011). Limite lacustre (tirets blancs) proposée par le présent article. Sites fossilifères a à f : fossiles marins datés, Y et Z : matière organique à la base de tourbière datée.

Au basculement des terrains et au creusement du seuil d'Alma, correspondent de larges bandes (plusieurs kilomètres en largeur) de dépôts « glacio-marins deltaïques » plus ou moins recouverts de « dépôts éoliens » et/ou « organiques » en bordure des grandes rivières du nord-ouest de la région : Ashuapmouchouane (à l'ouest), Mistassini (au nord-ouest) et Péribonka (au nord-est), (Figure 1). Des « alluvions récentes » ornent souvent les rives de ces rivières. Cependant, les zones de dépôts « glacio-marins profonds », qui séparent les

unes des autres les bandes latérales « deltaïques » de ces rivières, ne s'y drainent pas mais s'écoulent soit directement dans le lac Saint-Jean (rivières Ticouapé, et Petite-Péribonka), soit indirectement via le cours inférieur de la rivière Mistassini en aval de la zone à « glacio-marin profond » de la rivière aux Rats. Les bandes « deltaïques » de part et d'autre de ces grandes rivières peuvent être interprétées comme un dépôt diachronique d'abord marin, puis finalement lacustre, progradant dans le bassin du lac Saint-Jean au fur et à mesure du retrait

marin et de la baisse du niveau lacustre subséquente à l'émergence du seuil d'Alma.

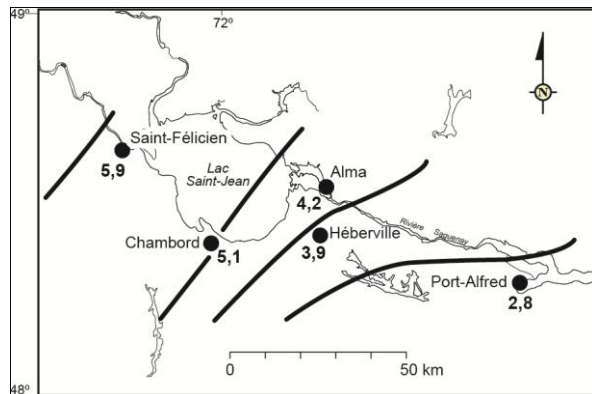


Figure 3- Remontée isostatique actuelle (mm/a). Les isocontours illustrés sont de 3, 4, 5 et 6 mm/an. Modifié de Vanicek et Hamilton, 1972.

2.2 Datations

La région du Lac-Saint-Jean présente 36 sites identifiés de fossiles marins (Figure 2) dont 14 se trouvent dans des dépôts argileux et 22 dans des dépôts sableux confirmant amplement la présence d'une phase marine dans la région. Leur plus forte concentration au sud-est du lac Saint-Jean pourrait être en partie due à une recherche plus systématique au cours de la cartographie des dépôts meubles faite en 1964 (LaSalle, 1966) que pendant les autres campagnes de cartographie, et en partie à l'apport plus important d'eau douce par les grandes rivières au nord-ouest du lac Saint-Jean (Dionne, 1968). Les six sites de fossiles marins datés proviennent tous de dépôts sableux; leurs âges, donnés sans aucune correction « $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ » ni calibration afin qu'ils demeurent comparables entre eux, ne montrent guère de corrélation avec leurs altitudes (Figure 4) suggérant un remaniement postérieur à leur première fossilisation. Cependant, si l'âge le plus vieux (10 250 ans BP) indique l'âge minimal du début de la phase marine au Lac-Saint-Jean, le plus jeune (8 630 ans BP) indiquerait un âge maximal de la fin de cette phase.

La matière organique à la base d'une tourbière indique approximativement l'âge d'isolation de la dépression locale où elle s'est développée. Les âges de la base des tourbières «Y» et «Z» (Figure 2 et tableau 1) indiquent donc la date d'émergence des endroits où elles se trouvent, soit 7 750 et 6 950 ans BP pour les tourbières Y et Z respectivement aux altitudes actuelles 190 m et 122 m. Vieillir ces dates d'environ 400 ans permet de les comparer aux dates ^{14}C sur les fossiles de coquillages marins; i.e. : émergence de Y à 8 150 et de Z à 7 350 ans BP. Les diverses dates et altitudes impliquent un passage de la phase marine à la phase lacustre entre 8 630 (dernier fossile marin) et 7 350 ans BP (premier dépôt émergé postmarin). Bref, une fin de la mer de Laflamme à l'ouest du seuil d'Alma à environ 8 000 ans BP (± 640 ans), soit 2 250 ans après le plus vieux fossile marin

Tableau 1- Âges de fossiles marins et de base de tourbières. a, b, c, d, e et f : dates sur coquilles marines; Y et Z : dates sur matière organique à la base de tourbières. RÉFÉRENCES- a, b et c : LaSalle et Rondot (1967); d : Présente communication; e, Y et Z : LaSalle (1968); f : Dionne (1967).

#	ALTITUDE (m)	ÂGE (an BP)	NUMÉRO du labo
a	113,0	10 250 \pm 350	Gif-424
b	153,0	10 060 \pm 350	Gif-400
c	119,0	9 560 \pm 350	Gif-423
d	126,5	9 440 \pm 50	Beta 275501
e	121,3	9 340 \pm 160	GSC-375
f	105,0	8 630 \pm 160	CGC-14C
Y*	190,5	7 750* \pm 135	I-3144
Z*	121,9	6 950* \pm 135	I-3143

* Dates non affectées par l'enrichissement en ^{12}C

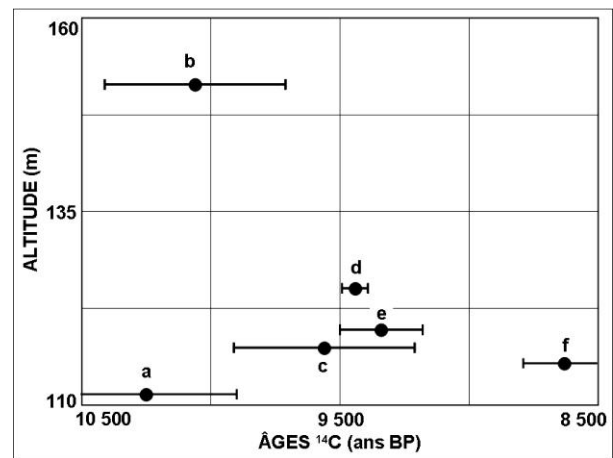


Figure 4- Distribution des âges selon l'altitude. Sites a, b, c, d et e, localisés à la figure 2 et décrits au tableau 1.

Tableau 2- Datation (par Beta Analytic) au site d (Figure 2). Valves isolées de *Macoma baltica* et d'*Hiatella artica* dans du sable de plage à 126 m d'altitude.

MESURE	VALEUR
Measured Age	9050 \pm 50 BP
13C/12C	-1,3 ‰
Conventional Age	9440 \pm 50 BP
Sigma Calibration	Cal BP 10770 to 105701

2.3 Naissance du lac Saint-Jean : discussion

Le ralentissement normal du taux de la remontée isostatique postglaciaire avec le temps dessine une courbe asymptotique qui relie altitude et âge en tout temps pour une région donnée. Donc toute information sur la date de naissance de la phase lacustre au Lac-Saint-Jean implique une altitude (et une localisation sur le terrain) et inversement.

La remontée isostatique postglaciaire d'environ 200 mètres dans la région du Lac-Saint-Jean est comparable à celle documentée par les plages bien datées aux îles Ottawa (Nord de la baie d'Hudson; Andrews et Peltier, 1976) où une élévation de 140 m est atteinte environ 2250 ans après le début de remontée postglaciaire, soit 70 % de la remontée postglaciaire à ce jour.

Cette première balise d'altitude approximative guide la recherche d'un talus d'érosion pouvant correspondre au premier niveau lacustre du lac Saint-Jean. En effet, dans les années et les siècles qui ont immédiatement suivi l'émergence du seuil qui a isolé le lac Saint-Jean de la mer de Laflamme, la faible différence de niveau entre le nouveau lac et la mer a probablement correspondu à une faible érosion du seuil (faute de hauteur de chute) et, en conséquence, à une relative stabilité du niveau local du nouveau lac, lui donnant le temps de tailler un talus de plage significatif. La ligne en tirets aux figures 2 et 5 relie divers talus d'érosion qui pourraient correspondre à ce premier rivage de la phase lacustre.

Le talus qui ceinture la terrasse couverte de dunes au sud-ouest de Dolbeau est présenté à titre d'exemple. Les nombreuses plages développées sur du « glacio marin littoral » surmontant du « glacio marin profond » au pied des côtés ouest et sud-ouest de ce talus indiquent une bonne étendue d'eau libre à l'ouest et au sud dudit talus (Figure 5). Cette disposition, notamment, nous amène à proposer que cette pause dans la remontée des terrains est bien celle qui correspond à la naissance du lac Saint-Jean.

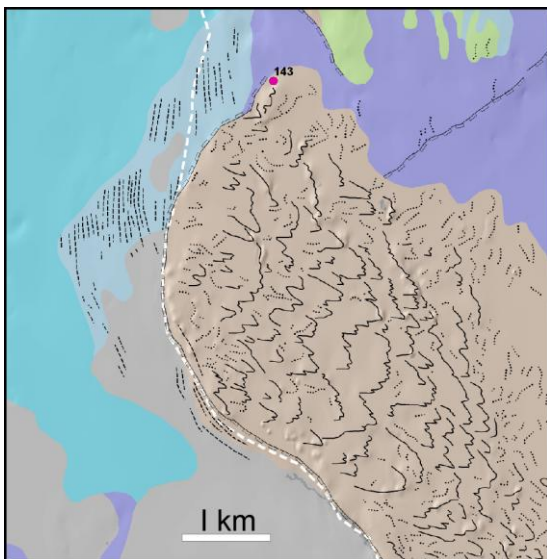


Figure 5- Dunes d'Albanel. Talus d'érosion (fine ligne noire bordée de rectangles). Maximum lacustre proposé (ligne en tirets blancs). Crêtes de plage (lignes parallèles en tirets noirs). Formes éoliennes (traits noirs curvilignes continus et pointillés). Voir figure 1 pour la légende des couleurs. Tiré de Daigneault et al. (2011).

Ainsi donc, le début de la phase lacustre se trouverait au pied de talus qui traversent les bandes « deltaïques » près de l'altitude cible de 140 m. Des formes éoliennes sont généralement abondantes sur la terrasse supérieure

de ces talus et rares sur leurs terrasses inférieures; la stabilité relative des deltas à la naissance du lac y aurait favorisé une accumulation plus grande de sable sur les plaines deltaïques des diverses rivières. Au nord-est du lac (Saint-Augustin) le talus se trouve à 130 m, au sud (Chambord), il se situe autour de 125 m alors qu'au sud-est (Saint-Gédéon) il semble être à 120 m (Figure 2). Le site fossilifère « d » (valves isolées) à l'ouest de Chambord correspond à une plage d'altitude 126 m. En somme, le contour proposé pour la naissance du lac Saint-Jean délimite une surface inclinée vers le sud-est avec une pente moyenne de 0,38 m/km.

Les pentes calculées mesurent le basculement cumulé des terrains résultant de taux de remontée isostatique décroissants de façon asymptotique avec le temps. Les basculements calculés de 0,47 m/km (maximum marin), de 0,38 m/km (maximum lacustre) et de 0,32 m/km (taux actuels extrapolés sur 8 000 ans) décroissent de façon compatible avec le comportement normal de la remontée isostatique postglaciaire.

Il est important de souligner que la fin de la phase marine au lac Saint-Jean y a interrompu la flocculation de l'argile au contact avec l'eau de mer et, conséquemment, a limité fortement l'abondance de dépôts argileux en milieu lacustre. Par contre, le sable et le silt ont continué à s'accumuler. Nous proposons que ces plages, plus abondantes mais pas exclusives à la zone identifiée comme lacustre à la figure 2, de même que les dépôts deltaïques de bas niveau des grosses rivières représentent la sédimentation riveraine du lac Saint-Jean.

3 IMPLICATIONS POUR LES EAUX SOUTERRAINES

Les particularités de la région du Saguenay – Lac-Saint-Jean y favorisent des phénomènes particuliers affectant les eaux souterraines et leur chimie : les différences d'altitude de plusieurs centaines de mètres entre les hautes terres périphériques et les basses terres centrales impliquent des gradients hydrauliques importants; les zones de failles en bordure et à travers le graben du Saguenay ont développé une fracturation complexe et vraisemblablement profonde dans les massifs rocheux; les deux sous-bassins couverts de dépôts meubles et le seuil rocheux qui les sépare sur le plancher du graben permettent la comparaison de trois contextes hydrogéologiques. Dans cette présentation, nous nous limitons à des inférences hydrogéologiques pour un seul de ces sous-bassins, soit celui du lac Saint-Jean qui se distingue par une phase lacustre postglaciaire.

3.1 Formations aquifères

Les formations aquifères potentielles les plus récentes de la région du Lac-Saint-Jean se trouvent dans les dépôts quaternaires et les plus anciennes dans le socle rocheux. Les premières présentent, dans les basses terres de la région, la succession suivante d'unités hydrogéologiques : aquifère supérieur à nappe libre (dépôts sableux et granulaires tels que dépôts éoliens, alluvions récentes, dépôts littoraux marins et lacustres, deltas progradants, dépôts fluvioglaciers et juxta-glaciaires),

aquitard intermédiaire (argiles marines de la mer de Laflamme), aquifère inférieur à nappe captive (dépôts fluvioglaciers et juxta-glaciaires généralement graveleux et souvent discontinus) et, lorsque présent, aquitard profond (till de fond). Dans les hautes terres (altitudes supérieures au maximum marin), seuls l'aquifère supérieur (alluvions récentes, dépôts glaciolacustres, dépôts fluvioglaciers et juxta-glaciaires) et l'aquitard profond (till de fond) sont présents.

Les aquifères du socle rocheux précambrien sont tous de type fracturé et ceux des roches sédimentaires carbonatées de la couverture ordovicienne sont aussi généralement fracturés (à paraclases et diaclases) avec un développement mineur d'ouvertures karstiques. Les propriétés hydrauliques du socle précambrien du bassin versant du lac Saint-Jean sont probablement comparables à celles déterminées pour le socle du seuil de Kénogami, à savoir une conductivité hydraulique de l'ordre de 10^{-5} m/s et un taux de recharge équivalent à 8% du volume annuel de précipitation (Chesnaux, 2011)

3.2 Nappes phréatiques

La région du Lac-Saint-Jean, où une phase lacustre a succédé à la phase marine, présente donc généralement des eaux douces dans ses aquifères non confinés, et des eaux salines, souvent fortement diluées, dans les aquifères plus profonds. La diversité des compositions observées indique des mélanges variables d'eaux d'origine différentes (Walter, 2010). Les résultats préliminaires de la première année (été et automne 2010) d'une campagne d'échantillonnage systématique dans l'ensemble de la région du Saguenay – Lac-Saint-Jean, amorcée dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur l'eau souterraine (PACES) du ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) du Québec, donne les résultats résumés au tableau 3 (Walter et al, 2011; présenté à la présente conférence).

Tableau 3 Analyse d'échantillons d'eau souterraine.

Aquifère en milieu:	Nombre	Avec TDS > 0,5 g/l	Proportion (%)	Moyenne des analyses avec TDS > 0,5 g/l
Granulaire	92	15	16 %	0,942 g/l
Fracturé	87	25	32%	0,849 g/l

3.2.1 Eaux douces

L'eau du lac Saint-Jean se renouvelle 4 à 5 fois par année, étant donné son volume d'eau moyen ($11,6 \text{ km}^3$) et le débit de ses exutoires, la Grande-Décharge et la Petite-Décharge (Tableau 4). L'aquifère inférieur discontinu (eskers, moraines d'ablation, ...), présent sous les dépôts marins argileux, apparaît ici et là en surface en périphérie de la limite marine (Figure 2) assurant l'alimentation des nappes captives, permettant le contact d'eaux douces avec les eaux du socle, y maintenant une charge hydraulique significative qui favorise une lente

remontée d'eaux diluées à travers l'aquitard constitué par le massif argileux sus-jacent.

Tableau 4. Hydrologie sommaire du lac Saint-Jean.

ÉLÉMENT	GRANDEUR	RÉFÉRENCE
Aire d'alimentation ^a	73°800 km ²	Rio Tinto Alcan, 2011
Superficie	1003 km ²	Environnement Canada, 1973)
Profondeur moyenne	11,6 m	MENVIQ,1980)
Volume	11,6 km ³	
DÉBIT	Grande-Décharge	1460 m ³ /s
	Petite-Décharge	68 m ³ /s

a) Soit 84 % de l'ensemble des bassins versants du Saguenay – Lac-Saint-Jean

3.2.2. Eaux salines

Les principaux réservoirs d'EAU MARINE QUATERNAIRE au lac-Saint-Jean sont le massif d'argile marine ainsi que l'eau marine infiltrée dans le biseau périphérique et au fond de la mer de Laflamme. Le volume initial d'argile marine peut être estimé à 61 km^3 (Tableau 5) à partir du répertoire de forages du PACES (2060 forages contenant de l'argile au Lac-Saint-Jean). La médiane de la distribution est utilisée comme épaisseur type car la distribution des épaisseurs dessine une courbe asymptotique entre 0,1 m (le plus fréquent) et 116,64 m (le moins fréquent). Une porosité de l'argile marine de 30 à 40 % implique un volume initial d'eau marine piégée dans le massif de 18 à 25 km^3 ou 1,5 à 2 fois le volume actuel d'eau dans le lac Saint-Jean. Les volumes d'eau marine infiltrés dans le biseau périphérique et le fond marin n'ont pu être estimés. Dans ces calculs, nous avons pris pour acquis que toute l'argile présente au Lac-Saint-Jean est d'origine marine car l'argile floccule normalement autour d'ions contenus dans l'eau marine.

Tableau 5. Massif d'argile au Lac-Saint-Jean.

ÉLÉMENT	GRANDEUR
Épaisseur maximale	116,64 m
Épaisseur médiane	12,2 m
Aire du sous-bassin ouest ^a	~ 5000 km ²
Volume d'argile	61 km ³
Porosité de l'argile	30 – 40 %

a) Mesuré sur la figure 2

L'EAU SOUS GLACIAIRE provient de la « drainage » d'un glacier tempéré (glacier dont la température baisse avec la pression (profondeur) lorsque les phases glace et eau coexistent ne fusse que par de fines gouttelettes aux coins des cristaux). Le flux thermique vers le bas ainsi

induit se conjugue avec le flux géothermique pour maintenir de l'eau sous forme liquide à la base du glacier. Cette eau sert à la fois de lubrifiant au glissement du glacier et à la comminution des fragments de roche arrachés au substratum rocheux, et de réactif avec les particules de roches fraîchement broyées incorporées au till de fond. L'ensemble de ces fines particules représente une énorme surface de réaction (Fliedert, 2011). La fraction « argile » des tills au Lac-Saint-Jean comporte 5 à 10% de minéraux argileux témoignant de réactions d'hydrolyse des silicates en plus des particules minérales provenant directement des roches silicatées du socle grenvillien (granitoïdes, anorthosites, gneiss et migmatites).

L'épaisseur de la glace peut augmenter la charge hydraulique jusqu'à quelques 3000 m favorisant l'infiltration de l'eau sous-glaciaire dans le substratum rocheux jusqu'à des profondeurs de 1,5 km (Lemieux et al., 2008a), et même jusqu'à 3 km lorsque la perméabilité des roches du socle, la rareté de saumures denses (difficiles à déplacer) et la disponibilité d'ouvertures profondes (fractures et de failles) le permet (Lemieux et Sudicki, 2009). L'infiltration se fait pendant l'avance glaciaire et l'exfiltration commence au début de la fonte de l'inlandsis et se poursuit quelques dizaines de milliers d'années après sa disparition (Lemieux et al., 2008b). L'eau sous glaciaire infiltrée dans le substratum rocheux présente donc une composition initiale qui reflète ses réactions avec la poussière de roche des tills de fond. De même, l'exfiltration différée d'eaux sous-glaciaires, contenant du carbone dissout provenant des calcaires ordoviciens et emmagasinées dans le socle rocheux pendant la glaciation, viendrait enrichir l'eau de la mer de Laflamme en ^{12}C et serait ainsi responsable du vieillissement des âges ^{14}C des coquillages marins (Occhietti et al., 2001).

Trois types d'EAUX SOUTERRAINES DES MASSIFS FRACTURÉS se superposent dans le batholithe du Lac du Bonnet dans le Bouclier canadien au Manitoba (Gascoyne, 2004) :

- Dans le niveau superficiel (moins d'environ 200 m de profondeur), on observe des eaux généralement diluées (TDS < 0,3 g/l), de type Ca-Na-HCO₃. Leurs teneurs en ^3H et ^{14}C et leurs rapports $^2\text{H}/^{18}\text{O}$ indiquent un climat relativement chaud, impliquant une circulation active avec des temps de résidence mesurés en dizaines ou en centaines d'années.
- Le niveau intermédiaire (200 – 400 m) est caractérisé par des eaux, plus alcalines (Na-Ca-HCO₃) dans les zones de recharge, qui évoluent vers des compositions de type Na-Ca-HCO₃-Cl-SO₄ avec la distance parcourue le long de la trajectoire de circulation. Les données isotopiques indiquent la présence de composantes d'eaux sous-glaciaires impliquant des durées de résidence mesurées en 10^3 à 10^5 ans. Elles représentent une transition entre le régime de circulation advective plus superficielle et l'eau plus profonde largement stagnante dans un roc peu fracturé.
- Au niveau profond (>500 m), se distinguent deux groupes d'eaux, d'abord (a) celles de la matrice

rocheuse de type Na-Ca-Cl-SO₄, plus concentrées (50 g/l) avec localement des compositions de type Ca-Na-Cl, et dont les caractéristiques isotopiques indiquent des climats chauds pré glaciaires et des temps de résidence supérieurs à 1 Ma.

- Encore dans le niveau profond (>500 m), on observe (b) les eaux des fractures les plus profondes montrant des rapports Br/Cl faibles et des valeurs du $\delta^{34}\text{S}$ du SO₄ dissout suggérant une source marine datant du Paléozoïque inférieur.

La même typologie pourrait bien se trouver aussi au lac Saint-Jean.

4 CONCLUSION

Le lac Saint-Jean est né lorsque la remontée isostatique postglaciaire du seuil rocheux d'Alma l'a isolé du reste de la mer de Laflamme plus à l'est. Aujourd'hui, le maximum marin se trouve entre 218 m et 170 m d'altitude, le maximum lacustre entre 141 m et 120 m, le lac actuel à 100 m, et le taux actuel de soulèvement isostatique de 5,9 mm/a à l'ouest du lac à 3,9 mm/a au sud-est. Ce basculement isostatique différentiel et l'érosion du seuil d'Alma ont entraîné l'émergence progressive du fonds marin et des deltas progradants des grandes rivières (Ashuapmouchouane, Mistassini et Péribonka) alimentant le lac Saint-Jean

L'invasion marine a probablement commencé peu avant 10 250 ans BP (âge du plus vieux fossile marin). La naissance du lac Saint-Jean se place entre 8 630 ans BP (âge du plus jeune fossile marin) et 7 350 ans BP (plus jeune tourbière datée et postérieure au dernier fossile marin), soit à environ 8 000 ans BP (\pm ~640 ans). Ces dates sont (ou ont été transformées) en âges BP non corrigés.

Ce modèle de l'évolution du lac Saint-Jean, combiné aux modèles proposés par d'autres auteurs de l'évolution des eaux souterraines avant et durant la dernière glaciation, permet d'avancer des hypothèses de travail valables pour des études hydrogéochimiques des eaux souterraines du territoire. La recharge actuelle dans les hautes terres de du vaste bassin versant du lac Saint-Jean diluerait les eaux sous-glaciaires plus ou moins mêlées d'eaux saumurées profondes du Bouclier canadien avant de venir en contact avec les réservoirs d'eau marine plus récente que sont le biseau périphérique et le fond marin de la mer de Laflamme d'une part, et le massif d'argile marine d'autre part. Le seuil de Kénogami pourrait constituer une barrière hydraulique à la circulation de l'eau souterraine vers l'est sauf à proximité immédiate de l'entaille utilisée par le lit du Saguenay.

REMERCIEMENTS

D'abord des mentions particulières à Mélanie Lambert et Claude Dallaire pour leur support en infographie, et à Marie-France Beaulieu, Cynthia Vigneault, Annie Moisan, Françoise Lange et Claudine Simard pour leur assistance dans la préparation de cette étude. Enfin, un grand merci pour leur support financier aux ministères du Développement durable, de l'Environnement et des

Parcs, et des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, et à la Fondation de l'Université du Québec à Chicoutimi.

REFERENCES

- Andrews, J. T.; Peltier, W. R., 1976. Collapse of the Hudson Bay ice center and glacio-isostatic rebound. *Geology*, 4 : 73-75
- Chesnaux, R. 2011. A regional analytical approach for assessing hydraulic properties and recharge in fractures rock aquifers – illustration and applications with the crystalline bedrock located in the Canadian shield. *Hydrogeology journal*, (soumis pour publication)
- Comité ZIP (Zone d'intervention prioritaire) Alma-Jonquière, 2000. *Plan d'action et de développement pour l'aménagement de la rivière Petite-Décharge à Alma (Québec)*. Document IC-844, 87 p.
- Daigneault, R.-A., Cousineau, P., Leduc, E., Beaudoin, G., Milette, S., Horth, N., Roy, D.W., Lamothe, M. et Allard, G., 2011. *Rapport final sur les travaux de cartographie des formations superficielles réalisés dans le territoire municipalisé du Saguenay-Lac-Saint-Jean (Québec) entre 2009 et 2011*. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec.
- Dionne, J.-C., 1968. Fossiles marins pléistocènes dans la partie nord du Lac Saint-Jean. *Naturaliste canadien*, 95 :1401-1406
- Environnement Canada, 1973. *Inventaire des lacs du Canada*. Canada. GRH Direction des ressources hydrauliques
- Fliedrt, Tina van de, 2011. Continental weathering through the onset of Antarctic glaciation. *Geology*, 39 (4): 415-416.
- Gascoyne, M., 2004. Hydrogeochemistry, groundwater ages and sources of salts in a granitic batholith on the Canadian Shield, southeastern Manitoba. *Applied geochemistry*, 19: 519-560.
- Gleeson, T. et Novakowski, K., 2009. Identifying watershed-scale barriers to groundwater flow : Lineaments in the Canadian Shield. *Geological Society America Bulletin*, 121 (3/4): 333-347.
- Laflamme, J.C.K., 1886. Le Saguenay, essai de géographie physique. *Bulletin Société Géographie Physique*, Québec. 1 : 47-65.
- Larochelle, P., 1974. *Rapport de synthèse des études de la coulée d'argile de Saint-Jean-Vianney*. Ministère des Richesses naturelles, Québec, Rapport S-151, 75 p.
- LaSalle, P., 1965. Radio-carbon date from the Lake St-John Area. *Science*, 149 (3686): 860-862.
- LaSalle, P., 1966. *Géologie de la région d'Hébertville (dépôts meubles) comtés de Lac Saint-Jean, Jonquière-Kénogami et Roberval*. Ministère des Richesses naturelles, Québec, rapport préliminaire 546.
- LaSalle, P., 1968. *Excursion géologique du Quaternaire, Saguenay - Lac-Saint-Jean*. Ministère des Richesses naturelles, Québec; Excursion ACFAS, 30 p.
- LaSalle, P. et Rondot, J., 1967. New 14C dates from the Lac Saint-Jean area, Québec. *Journal canadien des sciences de la Terre*, 4(3): 568-571.
- LaSalle, P., et Tremblay, G., 1978. *Dépôts meubles, Saguenay - Lac-Saint-Jean*. Ministère des Richesses naturelles. Rapport géologique 191, 61 p., 7 cartes au 1/50 000.
- Lemieux, J.-M., Sudicky, E.A., Peltier, W.R. et Tarasov, L., 2008a. Simulating the impact of glaciations on continental groundwater flow systems: 2. Model application to the Wisconsinian glaciation over the Canadian landscape. *Journal of Geophysical Research*, 113, F03018, doi:10.1029/2007JF000929.
- _____, 2008b. Dynamics of groundwater recharge and seepage over the Canadian landscape during the Wisconsinian glaciation. *Journal of Geophysical Research*, 113, F01011, doi:10.1029/2007JF000838.
- Lemieux, J.-M. et Sudicky, E.A., 2009. Simulation of groundwater age evolution during the Wisconsinian glaciation over the Canadian landscape. *Environment Fluid Mechanics*, Doi 10.1007/s10652-009-9142-7.
- MENVIQ, 1980. *Bassin hydrographique Saguenay-Lac-Jean*. Service de protection hydrographique, ministère de l'Environnement, Services de publication du Québec.
- MDDEP, 2011. *Liste des bassins versants*. Consulté 27 mai 2011 <<http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/bassinversant/bassins/index.htm>>
- Occhietti, S., Parent, M., Shilts, W. W., Dionne, J.-C., Govare, E., and Harmand, D. 2001. Late Wisconsinian glacial dynamics, deglaciation, and marine invasion in southern Québec. in Weddle, T. K., and Retelle, M. J., *editors*, Deglacial history and relative Sea-level changes, Northern New-England and Adjacent Canada. *Geological Society America, Special Paper*, 351: 243-270.
- Rio Tinto Alcan, *Site d'énergie électrique, une division de Rio-Tinto-Alcan*. Consulté mai 2011. <http://www.energie.riotinto.com/>
- Vanicek, Petr , et Hamilton, Angus C., 1972. Further Analysis of Vertical Crustal Movement. Observations in the Lac Saint Jean Area, Quebec. *Canadian Journal of Earth Sciences* 9 (9): 1139-1147.
- Walter, 2010. Julien WALTER, *Les eaux souterraines à salinité élevée autour du lac Saint-Jean, Québec : origines et incidences*. Université du Québec à Chicoutimi, Mémoire de Maîtrise en Sciences de la Terre, 177 p.
- Walter et al, 2011. Hydrogéochimie des eaux souterraines de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean : résultats préliminaires. *GéoHydro2011, Québec, Qc*.