

Circulation et renouvellement des masses d'eau du fjord du Saguenay

Peter S. Galbraith, Daniel Bourgault and Mélanie Belzile

Volume 142, Number 2, Summer 2018

20^e anniversaire du parc marin du Saguenay–Saint-Laurent :
recherche, conservation et mise en valeur

URI: <https://id.erudit.org/iderudit/1047147ar>

DOI: <https://doi.org/10.7202/1047147ar>

[See table of contents](#)

Publisher(s)

La Société Provancher d'histoire naturelle du Canada

ISSN

0028-0798 (print)

1929-3208 (digital)

[Explore this journal](#)

Cite this article

Galbraith, P. S., Bourgault, D. & Belzile, M. (2018). Circulation et renouvellement des masses d'eau du fjord du Saguenay. *Le Naturaliste canadien*, 142(2), 36–46. <https://doi.org/10.7202/1047147ar>

Article abstract

Data from moored instruments and transects were used to examine water renewal within the 3 basins of the Saguenay Fjord (Québec, Canada). Spring freshet affecting the Saint Lawrence River resulted in a new temperature and salinity signature in the fjord, indicative of a renewal event. The data suggest that a large proportion of the waters within the fjord are replaced within less than 2 months, confirming a short residence time. Data collected just inside the mouth of the fjord showed that these waters were mostly of Saint Lawrence Estuary origin. Measurements at low tide in the first (external) basin of the fjord indicated a mix of the lowest salinity waters observed at the sill during a tidal cycle and Saguenay River surface water. This mixture subsequently forces renewal events of surface and intermediate waters in the inner basin. The range of salinities observed at the sill are similar to those found at a depth of 20 to 70 m, approximately 100 km further northeast in the Saint Lawrence Estuary. The synchronous variation in salinity at the 2 sites suggest the simultaneous vertical movement of waters within the estuary, and that it is this movement that is a determining factor for the type and speed of renewal events within the Saguenay Fjord.

Circulation et renouvellement des masses d'eau du fjord du Saguenay

Peter S. Galbraith, Daniel Bourgault et Mélanie Belzile

Résumé

La circulation de renouvellement des eaux du fjord du Saguenay est examinée à la lumière de nouvelles données océanographiques. Nous avons observé une nouvelle signature de renouvellement en température et salinité occasionnée par la crue printanière, ainsi que le remplacement d'une grande partie des eaux du fjord en moins de 2 mois, confirmant le faible temps de résidence de ces eaux. Un instrument déployé pour mesurer la température et la salinité des eaux à l'entrée du fjord nous a permis de les identifier comme étant principalement des eaux de l'estuaire du Saint-Laurent. Les eaux mesurées dans le premier bassin du fjord à marée basse étaient un mélange des eaux du seuil de salinité parmi les plus faibles observées pendant un cycle de marées, avec des eaux de surface du Saguenay. Ce mélange occasionne ensuite le renouvellement des eaux supérieures et intermédiaires du bassin interne du fjord. La plage de salinité des eaux au seuil correspond assez bien aux eaux qu'on trouve 100 km plus loin dans l'estuaire du Saint-Laurent entre 20 et 70 m. Les variations synchrones de salinité à 100 km et au seuil suggèrent un mouvement vertical simultané des eaux dans tout l'estuaire qui serait déterminant pour le type et la vitesse de renouvellement du fjord du Saguenay.

MOTS CLÉS : courants, fjord du Saguenay, océanographie physique, renouvellements, salinité, température

Abstract

Data from moored instruments and transects were used to examine water renewal within the 3 basins of the Saguenay Fjord (Québec, Canada). Spring freshet affecting the Saint Lawrence River resulted in a new temperature and salinity signature in the fjord, indicative of a renewal event. The data suggest that a large proportion of the waters within the fjord are replaced within less than 2 months, confirming a short residence time. Data collected just inside the mouth of the fjord showed that these waters were mostly of Saint Lawrence Estuary origin. Measurements at low tide in the first (external) basin of the fjord indicated a mix of the lowest salinity waters observed at the sill during a tidal cycle and Saguenay River surface water. This mixture subsequently forces renewal events of surface and intermediate waters in the inner basin. The range of salinities observed at the sill are similar to those found at a depth of 20 to 70 m, approximately 100 km further northeast in the Saint Lawrence Estuary. The synchronous variation in salinity at the 2 sites suggest the simultaneous vertical movement of waters within the estuary, and that it is this movement that is a determining factor for the type and speed of renewal events within the Saguenay Fjord.

KEYWORDS: currents, physical oceanography, renewal events, Saguenay Fjord, salinity, temperature

Introduction

Un fjord est une vallée façonnée par les glaciers, généralement caractérisée par la présence d'un ou de plusieurs seuils (Allen et Simpson, 1998) qui influencent grandement les propriétés physiques, chimiques et biologiques des masses d'eau qui se trouvent de part et d'autre de ceux-ci. Le fjord du Saguenay possède 3 seuils majeurs qui délimitent un grand bassin interne d'une profondeur maximale de 280 m à la tête du fjord, et 2 plus petits bassins plus en aval, que l'on désigne intermédiaire et externe (figure 1). Bien que les 2 seuils les plus en amont aient des profondeurs maximales de 120 et de 60 m, le seuil le plus près de l'embouchure possède une profondeur de seulement 20 m, ce qui limite considérablement les entrées d'eau de l'estuaire du Saint-Laurent dans le fjord. Dans le cas de certains fjords, les seuils limitent les échanges entre les eaux profondes des bassins internes et les eaux extérieures avoisinant l'embouchure du fjord (Allen et Simpson, 1998). Le peu d'énergie de la dynamique profonde qui caractérise certains fjords peut créer des périodes de stagnation des eaux qui induisent des zones hypoxiques

ou même anoxiques (Farmer et Freeland, 1983). Par contre, dans d'autres cas, comme celui du Saguenay, de fortes marées permettent, d'une part, d'entraîner périodiquement des eaux extérieures suffisamment denses et relativement bien oxygénées au-dessus des seuils et, d'autre part, de ventiler davantage les eaux du fjord en générant un écoulement turbulent au-dessus des seuils (Farmer et Freeland, 1983; Inall et Gillibrand, 2010). Lors de ce brassage aux seuils, les températures et salinités des masses

Peter S. Galbraith est chercheur scientifique pour Pêches et Océans Canada à l'Institut Maurice-Lamontagne (Mont-Joli, Québec, Canada).

peter.galbraith@dfo-mpo.gc.ca

Daniel Bourgault est professeur-chercheur à l'Institut des sciences de la mer de Rimouski (Université du Québec à Rimouski, Rimouski, Québec, Canada).

Mélanie Belzile est spécialiste en sciences physiques. Auparavant affiliée à l'Institut des sciences de la mer de Rimouski à l'Institut des sciences de la mer de Rimouski, elle travaille maintenant pour Pêches et Océans Canada à l'Institut Océanographique de Bedford (Dartmouth, Nouvelle-Écosse, Canada).

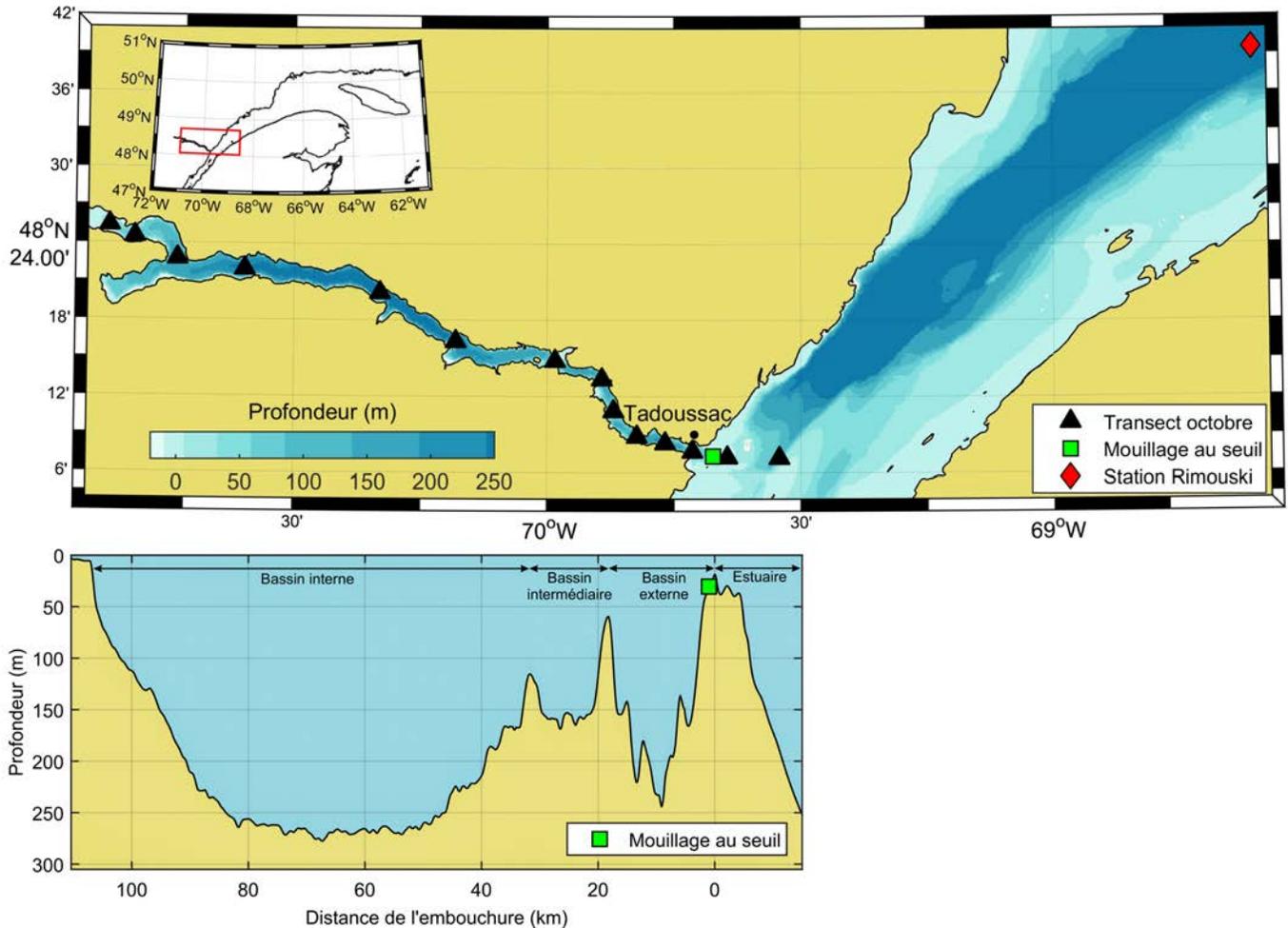


Figure 1. Région d'étude indiquant les stations océanographiques, le mouillage au seuil et la station Rimouski. Le mouillage au premier seuil consiste en un thermosalinographe, un ancrage, un appareil de flottaison ainsi qu'un déclencheur acoustique auquel on peut commander de lâcher prise sur l'ancrage à la récupération. Le schéma sous la carte illustre les variations de profondeur en fonction de la distance de l'embouchure du fjord du Saguenay.

d'eau sont modifiées, et la masse volumique de la nouvelle eau détermine la suite de son parcours (Inall et Gillibrand, 2010). Si la masse volumique des eaux mélangées est plus grande que les eaux de fond des bassins internes, les premières plongeront tout au fond pour s'insérer sous les eaux résidentes tout en déplaçant ces dernières vers le haut. Il s'agira alors d'un épisode de renouvellement d'eau de fond ou d'eau profonde. Si la masse volumique des eaux produites aux seuils n'est pas suffisamment dense pour s'écouler tout au fond, celles-ci pourront s'introduire à une profondeur intermédiaire (celle de leur flottabilité neutre), par-dessus les eaux de fond très denses, mais sous les eaux de surface peu salées et légères. C'est ce qu'on appelle un épisode de renouvellement d'eau intermédiaire. Autrement, si les eaux produites aux seuils lors du flot de marée demeurent plus légères que les eaux profondes et intermédiaires des bassins internes, elles ne pourront pas s'insérer dans le fjord et seront simplement évacuées vers l'extérieur lors du jusant. Comme nous le verrons en détail dans cet article, les intrusions dans le fjord du Saguenay se produisent à différentes profondeurs au fil des saisons.

Puisque le volume d'eau présent dans le fjord est conservé, ces arrivées d'eaux nouvelles doivent nécessairement être accompagnées de sorties de volumes égaux d'eaux qui se trouvaient déjà dans les bassins depuis un certain temps. C'est à cause de cette dynamique de remplacement que ces épisodes s'appellent des renouvellements. Le volume d'eau présent dans le bassin divisé par le taux d'échange détermine le temps de résidence des eaux à l'intérieur du fjord. Un long temps de résidence se traduirait par une réduction de l'oxygène dissous dans le bassin interne due à la respiration du biote, ce qui n'est pas le cas du Saguenay. En général, pour tous les fjords, les renouvellements peuvent être continus ou se produire par événements successifs avec des fréquences qui varient considérablement (Geyer et Cannon, 1982).

Travaux antérieurs

Les apports d'eau douce provenant de la rivière Saguenay (moyenne annuelle de $1200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ pour la période 1944-1993; Bélanger, 2003) induisent un fort gradient vertical

de température et de salinité (thermohalocline) caractérisé par une couche de surface bien distincte, de quelques mètres d'épaisseur, s'écoulant vers l'aval (Drainville, 1968). La circulation profonde est beaucoup plus complexe. Les études ont démontré une structure en plusieurs couches caractérisées par des courants qui vont dans des directions opposées et qui varient au gré des saisons, comme le suggèrent des simulations numériques (Bélanger, 2003; Stacey et Gratton, 2001) et des observations de courant (Belzile et collab., 2016; Bourgault et collab., 2012). Pour faciliter la discussion, nous caractériserons la structure verticale du bassin interne du Saguenay en 4 couches distinctes : 1) les **eaux de surface**, 2) les **eaux supérieures**, 3) les **eaux intermédiaires** et 4) les **eaux profondes**. Les eaux de surface correspondent aux eaux saumâtres ($S < 20$ psu [*practical salinity unit*]), d'une épaisseur de 5 à 10 m environ, qui s'écoulent, en moyenne, vers l'aval. Il est important de noter que lorsqu'il est question du renouvellement des eaux du fjord, on ne parle pas de ces eaux de surface qui sont alimentées principalement par l'amont avec l'apport d'eau douce de la rivière Saguenay. Les renouvellements concernent l'apport d'eau salée et océanique par l'embouchure des fjords. Comme nous l'avons souligné précédemment, les eaux de surface sont séparées par une forte thermohalocline des 3 autres couches d'eau qui se trouvent en dessous. Les eaux supérieures sont celles tout juste sous la thermohalocline et qui ont une épaisseur de l'ordre de 40-50 m. On trouve ensuite les eaux intermédiaires d'une épaisseur de l'ordre de 100 m et finalement les eaux profondes, d'une épaisseur aussi de l'ordre de 100 m. Ces 3 dernières couches, supérieure, intermédiaire et profonde, peuvent être renouvelées.

Le Saguenay a la particularité de se déverser dans un estuaire plutôt que directement dans l'océan. La morphologie en entonnoir de l'estuaire du Saint-Laurent favorise de grandes amplitudes de marée à l'embouchure du fjord (Bélanger, 2003). Celles-ci permettent aux eaux denses de l'estuaire du Saint-Laurent, jusqu'à 100 m de profondeur environ (Lavoie et collab., 2000), d'être entraînées au-dessus du seuil peu profond et d'alimenter les eaux du fjord.

Drainville (1968), pionnier de la recherche sur la dynamique du Saguenay, a été le premier à émettre l'hypothèse des renouvellements approvisionnés par l'estuaire du Saint-Laurent. Cependant, limité par le peu d'informations sur les conditions hivernales, Drainville (1968) a émis une seconde hypothèse selon laquelle le renouvellement des eaux profondes serait causé par de grandes convections hivernales locales. Selon lui, la formation de glace pourrait engendrer un rejet de sel suffisamment grand pour que la salinité de surface augmente et dépasse la salinité des eaux du fond. Loucks et Smith-Sinclair (1975) ont réfuté cette hypothèse en constatant une grande stratification en salinité en avril. De plus, Chassé et Côté (1991) ont observé, à l'hiver 1986, une salinité d'au plus 14 psu en surface. En 2010, lorsque les premiers profils de température et de salinité sous couvert de glace ont été récoltés, Bourgault et collab. (2012) ont observé une stratification en hiver aussi forte, sinon plus, qu'en été. Par contre, au cours des 40 dernières

années, plusieurs études ont appuyé la première hypothèse de Drainville (1968) en démontrant, qu'en période estivale, des renouvellements s'effectuent à partir des eaux denses de l'estuaire du Saint-Laurent lesquelles, avec les courants de marée, passent par-dessus les seuils (Bélanger, 2003; Belzile et collab., 2016; Seibert et collab., 1979; Stacey et Gratton, 2001; Therriault et Lacroix, 1975; Therriault et collab., 1984).

L'étude de Bélanger (2003) a été la première à s'intéresser aux renouvellements des eaux profondes dans le bassin interne du Saguenay. Son auteur a basé ses observations sur des augmentations de masse volumique enregistrées par une sonde de température et de salinité mouillée à 260 m de profondeur dans le bassin interne de juin 1998 à mars 1999. D'après ses résultats, bien que les événements de renouvellement estivaux aient été moins longs et aient présenté des augmentations de densité moins grandes que celles de l'automne et de l'hiver, 39% du bassin interne aurait été renouvelé entre le 5 et le 27 août 1998. Cette valeur a été calculée à partir de données hydrographiques donnant une estimation de la profondeur à laquelle les eaux profondes auraient été déplacées vers le haut par les renouvellements. Selon son interprétation, lorsqu'un renouvellement profond survient, les eaux du fond du fjord sont déplacées et poussées vers le haut par l'intrusion d'eau plus dense.

Bélanger (2003) a également observé, dans ses données hydrographiques, des renouvellements partiels de plus faible masse volumique, de 70 à 110 m de profondeur, qui correspondent à des intrusions. Ces renouvellements intermédiaires ont eu lieu plus tôt dans l'été, avant les renouvellements profonds. Ce type de renouvellement intermédiaire a aussi été observé dans le Saguenay dans plusieurs autres études (Drainville, 1968; Loucks et Smith-Sinclair, 1975; Sundby et Loring, 1978), et présente une grande variabilité en matière d'épaisseur (de 40 à 100 m), de profondeur (centré entre 40 m à 95 m de profondeur) et de température (de 1 à 4 °C) (Bélanger, 2003; Belzile et collab., 2016; Bourgault et collab., 2012; Drainville, 1968; Seibert et collab., 1979; Sundby et Loring, 1978; Taylor, 1975).

Les simulations numériques de Bélanger (2003) ont mené à une meilleure compréhension des modifications de la circulation induites par les renouvellements. Lorsqu'un renouvellement se produit, un courant compensateur sortant est créé. Dans le modèle de Bélanger (2003), ce courant se trouve entre 20 et 70 m de profondeur lors d'un renouvellement profond, et il domine généralement sur la circulation estuarienne des premiers mètres. Dans le cas d'une intrusion à une profondeur intermédiaire, le courant de compensation se trouve au-dessus et en dessous du renouvellement.

L'étude de Bélanger (2003) visait aussi à identifier les facteurs influençant la fréquence de renouvellement. La masse volumique des eaux présentes au seuil et la turbulence dans le fjord sont les 2 facteurs majeurs identifiés qui déterminaient la fréquence des renouvellements. Cependant, selon la saison, des facteurs environnementaux ont également semblé avoir

influencé la fréquence et la durée des renouvellements. L'auteur a alors émis l'hypothèse d'un contrôle par le vent.

Il semble maintenant bien acquis que les renouvellements du bassin interne du Saguenay proviennent du Saint-Laurent et qu'ils subissent un mélange turbulent à proximité des seuils. Des hypothèses ont été émises par plusieurs auteurs sur la composition des eaux profondes se trouvant dans les bassins du Saguenay. En interprétant le diagramme température-salinité de Drainville (1968), Louks et Smith-Sinclair (1975) ont calculé que les eaux des bassins externes étaient constituées à 90 % de la couche intermédiaire froide (CIF) du Saint-Laurent et à 10 % des eaux de surface du Saguenay. Plus récemment, une étude utilisant la matière organique dissoute comme traceur a trouvé une proportion de 94 % de la CIF et 6 % de la rivière Saguenay dans les eaux profondes du bassin interne (Xie et collab., 2012).

Deux études récentes ont affiné nos connaissances concernant le renouvellement des eaux du Saguenay ainsi que la rapidité du processus (Belzile et collab., 2016; Bourgault et collab., 2012). Elles ont montré l'existence de 3 régimes (figure 2), qui dépendent de la salinité (et donc de la masse volumique) des eaux de l'estuaire présentes au premier seuil du Saguenay, ainsi que de la progression temporelle (croissance ou décroissance) de cette salinité. En été, dans le bassin externe à l'entrée du fjord, la couche intermédiaire froide de l'estuaire se mélange aux eaux de surface du Saguenay pour former une couche chaude qui pénètre dans le fjord à mi-profondeur; ce sont les eaux intermédiaires du Saguenay qui ont une température d'environ 4-5 °C (panneau du bas de la figure 2). La salinité des eaux de l'estuaire qui se présentent au premier seuil détermine avec quelles eaux du Saguenay se fera le mélange, ainsi que la profondeur à laquelle ce mélange pénétrera dans le fjord.

Ces eaux intermédiaires, relativement chaudes (4-5 °C) comparativement aux eaux profondes et supérieures, circulent ainsi vers l'amont à une vitesse de 5 à 10 cm s⁻¹ (0,2-0,4 km h⁻¹) (Belzile et collab., 2016, figure 2). À cette vitesse, le nez de l'intrusion atteint la tête du fjord, tout en amont, en 1 à 2 semaines. Il suffirait alors d'environ un mois pour renouveler ainsi l'ensemble des eaux intermédiaires. Bien que ce type d'épisode de renouvellement s'effectue rapidement en été, l'eau intermédiaire ainsi amenée persiste à l'intérieur du bassin interne pendant plusieurs mois, bien qu'elle perde graduellement ses propriétés initiales et qu'elle se refroidisse de quelques degrés étant donné le fort mélange turbulent (nous y reviendrons) qui se produit avec les eaux supérieures et profondes. C'est ainsi que l'on trouve des restes de cette eau intermédiaire à l'hiver tout juste sous la pycnocline (la plage de profondeur où la masse volumique varie rapidement) dans le bassin interne (figure 2, panneau du haut). Bien qu'ayant été refroidis au fil des mois, ces restes d'eaux intermédiaires demeurent néanmoins les eaux les plus chaudes du fjord pendant l'hiver. Leur présence près de la surface pourrait favoriser des glaces très minces tout en amont; il pourrait s'agir d'une polynie à chaleur sensible (soit une zone qui reste

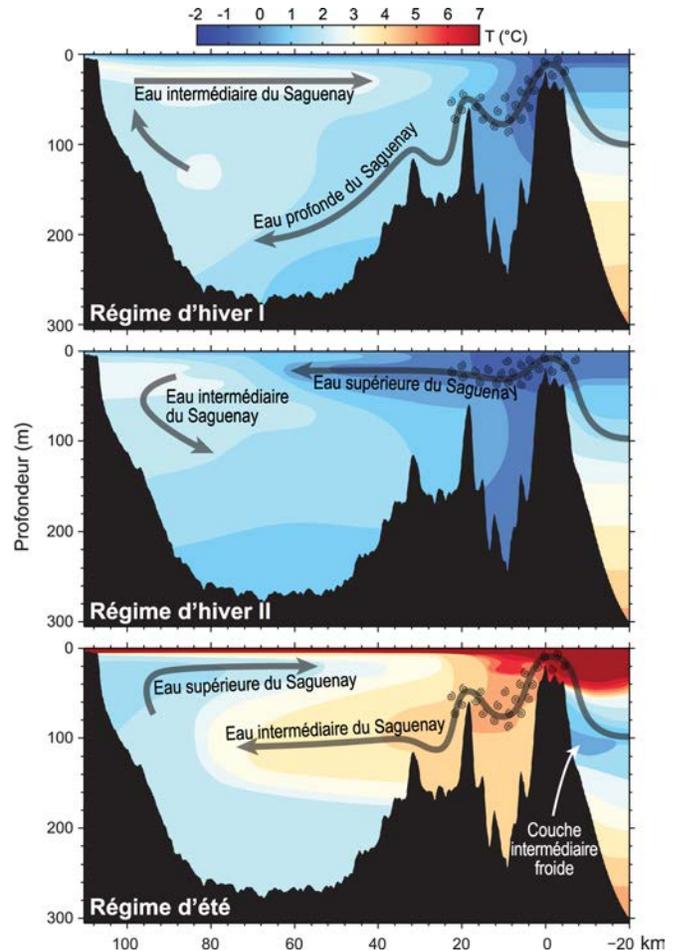


Figure 2. Schéma synthétique des 3 types de renouvellement de l'eau du fjord du Saguenay identifiés par Belzile et collab. (2016). Régime d'hiver I: renouvellement par le fond en automne et début d'hiver; régime d'hiver II: renouvellement par la subsurface en mi-hiver ou au printemps; régime d'été: renouvellement par des eaux intermédiaires en été. Traduit et adapté de la figure 13 de Belzile et collab. (2016).

libre de glace ou couverte d'une couche de glace très mince, engendrée par une source de chaleur sous la glace).

En hiver, le même processus de formation de masse d'eau qu'en été se produit dans le premier bassin externe, sauf que les eaux hivernales de l'estuaire sont plus denses, et se mélangent donc avec des eaux du Saguenay plus profondes, c'est-à-dire avec les eaux intermédiaires du Saguenay. Ceci engendre un mélange plus chaud que dans l'estuaire à pareille densité: les eaux profondes du Saguenay (panneau du haut de la figure 2), dont la salinité est suffisante pour renouveler le Saguenay par le fond. Si la salinité des eaux mélangées au seuil est croissante dans le temps, ce nouveau mélange sera plus dense que l'ancien et pourra permettre de poursuivre le renouvellement du fjord par le fond. Plus tard en hiver, les eaux froides et moins salées de la couche hivernale du golfe arrivent à la tête de l'estuaire. Le mélange formé, moins dense,

constitue alors les eaux supérieures du Saguenay et remplit le fjord par une intrusion tout juste sous les eaux de surface, sous la pycnocline (panneau du milieu de la figure 2).

Belzile et collab. (2016) ont déterminé que le bassin interne du fjord du Saguenay est renouvelé au complet dans un intervalle de 2 à 6 mois. Comme les eaux de la tête du fjord sont les plus éloignées, elles sont les plus longues à se renouveler, ce qui crée habituellement une opposition de gradient horizontal de température de l'été à l'hiver : les eaux les plus froides se trouvant à la tête en été alors que ce sont les eaux les plus chaudes en hiver qui s'y trouvent.

De nouvelles données que nous avons acquises en 2016 illustrent une signature de renouvellement printanier plus difficile à discerner, et fournissent un exemple estival de renouvellement presque entier du fjord en une courte période. Nous comblons ici une lacune de l'étude de Belzile et collab. (2016), laquelle n'avait pas de mesures à long terme au premier seuil concurrentes aux autres données de transect de température et de salinité. Pour mettre en évidence la connectivité entre les masses d'eaux, nous comparons les variations de la salinité au seuil qui participe à la formation des nouvelles eaux de renouvellement à celles observées dans l'estuaire, 100 km plus loin.

Méthodologie et nouvelles données

Nous avons déployé un détecteur de température et de salinité Seabird Instruments SBE37 à 2 m au-dessus du fond de 33 m de profondeur, juste du côté intérieur du premier seuil près de l'embouchure (figure 1), du 17 juillet 2015 au 17 octobre 2017 (avec 3 déploiements successifs du détecteur [que l'on appelle un mouillage] avec sa flottaison et son ancrage, soit en septembre 2015, en mai 2016 et en septembre

2016). L'instrument enregistrait les données à des intervalles de 5 minutes.

Trois transects de température-salinité ont été faits dans le fjord à l'été 2016. Le premier a été fait par le Programme de Monitoring de la Zone Atlantique (PMZA) de Pêches et Océans Canada, le 25 juin 2016, à partir du *MV Coriolis II*. Le second a été fait par Parcs Canada, en collaboration avec Yvan Simard (Pêches et Océans Canada), à bord du bateau *Alliance*, en combinant diverses occupations de stations du 16 au 24 août 2016. Le troisième a été fait à nouveau par le PMZA, les 19 et 20 octobre 2016 à bord du *NGCC Hudson*.

La station de monitoring Rimouski, située à 20 km au large de la ville du même nom, est occupée par le PMZA à l'aide d'un mouillage déployé à l'année depuis juin 2015, composé de plusieurs détecteurs de température et salinité (Seabird SBE19 et SBE37), avec des enregistrements toutes les 15 minutes. Le mouillage a été retiré de l'eau le 5 octobre 2015 et redéployé le 4 novembre 2015, retiré à nouveau le 23 septembre 2016 et redéployé le 25 octobre 2016. Les données de détecteurs à 20 et 70 m sont utilisées dans notre étude, ainsi que celles à 50 m pour la portion après le 4 novembre 2015.

Résultats et discussion

D'après Belzile et collab. (2016), la salinité des eaux de l'estuaire du Saint-Laurent qui sont présentes au premier seuil du fjord est déterminante de la salinité qu'atteindront les eaux intermédiaires (en été) ou profondes (en hiver) par mélange avec les eaux de surface (été) ou supérieures (hiver) et donc, de la profondeur de renouvellement qui s'en suivra. Nous utilisons le mouillage situé à l'intérieur du bassin externe à 31 m de profondeur (figure 3) pour les identifier.

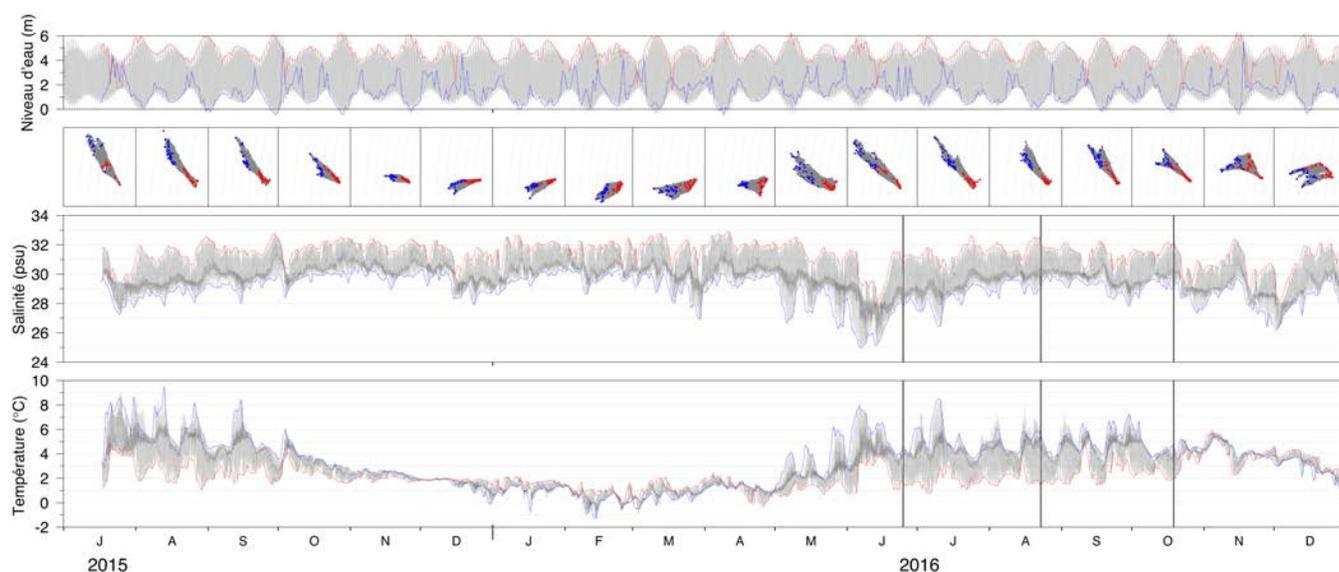


Figure 3. Température (panneau du bas) et salinité (second à partir du bas) mesurées à 31 m de profondeur à l'intérieur du premier seuil du fjord du Saguenay jusqu'au 1^{er} janvier 2017. La marée (niveau d'eau) prédite à Tadoussac est indiquée (panneau du haut) ainsi que des diagrammes mensuels de température-salinité. Les lignes bleues et rouges montrent les valeurs journalières minimales et maximales de salinité, ainsi que les valeurs de niveau d'eau et de température correspondantes. Les dates d'échantillonnage du bassin externe lors des transects de température et de salinité en juin et en août sont indiquées par des traits verticaux.

En été, les eaux les plus salées sont habituellement les plus froides et leur présence coïncide avec la marée haute. Nous présumons alors que ce sont des eaux qui ont traversé le seuil de 20 m sans avoir encore été grandement modifiées par des processus de mélange turbulent, tels que les sauts hydrauliques internes, qui se manifestent un peu plus en amont du seuil. Durant une même journée, à marée basse, des eaux de plus de 4°C plus chaudes peuvent être enregistrées au mouillage. Présumons maintenant que ce sont des eaux issues du mélange intense du côté amont du seuil qui renouvellent le bassin interne du fjord et qui refoulent sur le mouillage au courant inverse; cette hypothèse sera considérée ci-après. Notons que de la mi-décembre 2015 à la mi-avril 2016, la situation s'inverse et ce sont alors les eaux les plus salées qui sont les plus chaudes. À l'automne 2016, cette transition est survenue à la fin novembre.

En plus de 17 mois d'observation en continu, la salinité au premier seuil est apparue la plus faible en juin 2016 (figure 3), quelques semaines avant le premier transect de température-salinité fait le 25 juin (figure 4). Ce transect ne démontre aucune indication de l'intrusion d'une langue chaude d'eaux intermédiaires du Saguenay telle que vue dans le régime d'été de Belzile et collab. (2016), centré autour de 100 m de profondeur (figure 2, panneau du bas). Plutôt, les quelques inversions de températures se trouvent près de la tête du fjord à environ 50 m de profondeur, ou plus profond, vers 150 m. Le renouvellement ressemble donc au second régime d'hiver observé par Belzile et collab. (2016), soit une intrusion supérieure, tout juste sous la pycnocline, occasionnée par la faible salinité du début juin. Contrairement à l'occurrence hivernale de ce régime, l'intrusion est caractérisée par un profil de températures de plus en plus élevées en montant vers la surface et ne crée pas d'inversions verticales de température qui en faciliterait l'identification, sauf près de la tête du bassin. La présence de ce régime de renouvellement peut donc facilement passer inaperçue.

Entre les 2 premiers transects de température-salinité, la salinité au seuil a généralement augmenté, accompagnée de fluctuations (figure 3). Le transect du mois d'août est caractérisé par un renouvellement massif des eaux intermédiaires (figure 5). Les eaux plus froides que 2°C se voient confinées à la tête. L'isohaline de 29 psu passe de 100 m en juin à 50 m, et celle de 30 psu passe de 150 m pour descendre à 200 m, ce qui triple la plage de profondeur occupée par cet intervalle de salinité. La base de l'intrusion visible en

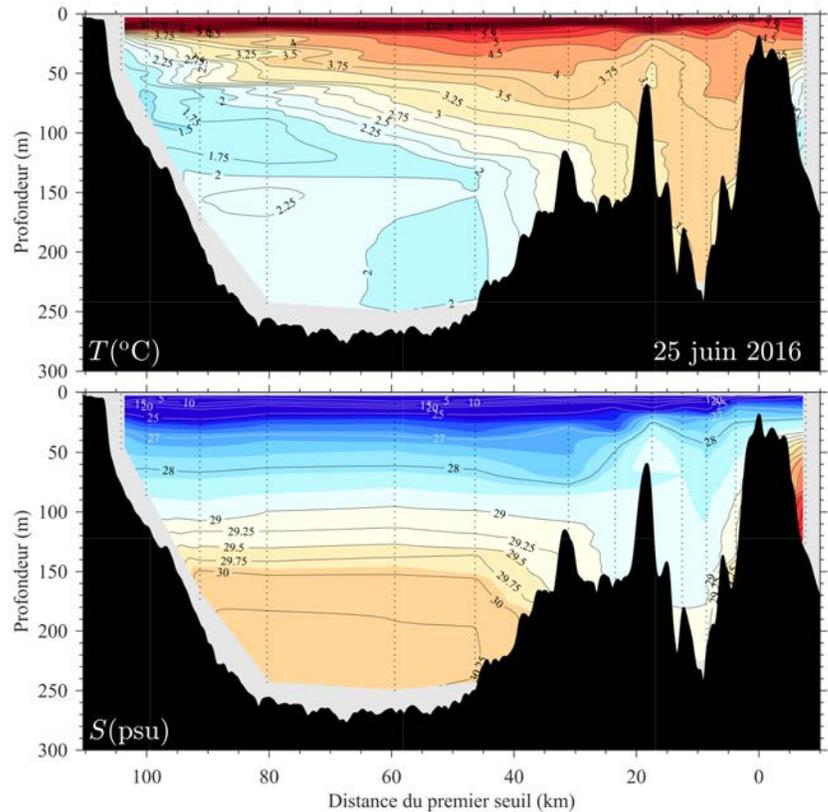


Figure 4. Transect de température (haut) et de salinité (bas) fait le 25 juin 2016 par le Programme de monitoring de la zone Atlantique de Pêches et Océans Canada à bord du *MV Coriolis II*. Les stations occupées sont représentées par des traits verticaux en pointillé.

température se trouve à 150 m de profondeur; le mélange vertical a dû être intense sous 150 m pour diminuer la masse volumique du fluide depuis le mois de juin. Bien que la salinité journalière maximale mesurée au seuil ait augmenté jusqu'à des niveaux comparables à ceux de l'hiver, il semble bien qu'elle n'ait pas été suffisante pour engendrer des renouvellements par le fond. Néanmoins, sauf pour cette partie profonde, le reste des eaux du fjord est presque entièrement renouvelé durant cette période de près de 2 mois.

Entre le second et le troisième transect (figure 6), les eaux profondes plus froides que 2,5°C ont fortement diminué vers la tête du bassin interne et les eaux intermédiaires plus froides que 2,5°C sont aussi fortement réduites vers la tête du fjord; les eaux plus froides au-dessus des eaux intermédiaires du Saguenay présentes en août disparaissent presque complètement. Il s'agit ici d'un mélange turbulent, car le minimum de température est augmenté par les eaux plus chaudes avoisinantes.

Masses d'eau

Un diagramme de température et salinité est utile pour identifier les masses d'eau source, ainsi que le mélange entre celles-ci tel que démarqué par une ligne droite. La figure 7 montre de tels diagrammes pour les profils faits lors des 3 transects, ainsi que 24 h de données du mouillage à l'intérieur

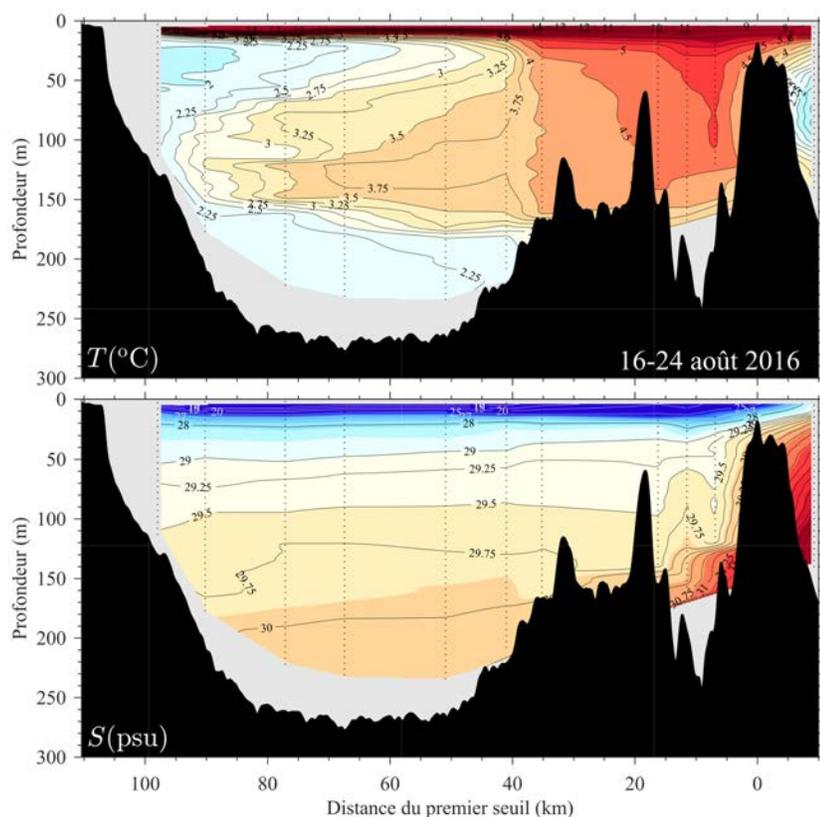


Figure 5. Transect de température (haut) et de salinité (bas) fait du 16 au 24 août 2016 par Parcs Canada (en collaboration avec Yvan Simard, Pêches et Océans Canada) à bord de l'Alliance. Les stations occupées sont représentées par des traits verticaux en pointillé.

du seuil pour la journée correspondante. En août, les eaux les plus froides et salées mesurées au mouillage pendant la journée du transect (1,46°C et 32,07 psu) correspondent aux eaux de la couche intermédiaire froide mesurées à 64 m à la station de l'estuaire (la première station, la plus à droite sur la figure 5). La plupart des eaux sur le mouillage du seuil le 23 août correspondent à des eaux observées dans l'estuaire, sans modification. Il y a un point d'inflexion à 4,7°C au-dessus duquel les eaux du bassin externe (à la seconde et à la troisième station du transect) se sont mélangées avec des eaux plus douces du Saguenay. Les eaux mesurées à la seconde station, ainsi qu'une partie des eaux à la troisième station, sont entièrement issues de ce mélange. Notons que les eaux mesurées au mouillage du seuil (points noirs dans l'encadré de la figure 7) sont identiques à celles mesurées dans le bassin externe au même moment (points rouges dans l'encadré), mais que des eaux plus salées et plus denses que celles observées dans les bassins sont aussi observées au seuil pendant la même journée (points noirs dans le panneau principal de la figure 7). Les masses d'eaux identiques appuient notre hypothèse émise précédemment selon laquelle ce sont les eaux issues du mélange dans le bassin externe qui refoulent sur le mouillage à marée basse.

Pareillement, le 25 juin 2016, les masses d'eau enregistrées au mouillage du seuil correspondent pour la plupart aux eaux de l'estuaire (première station du transect). Le point d'inflexion se trouve à 3,6°C, ce qui correspond aux eaux les plus profondes et salées observées dans le bassin externe; les eaux du bassin externe sont, cette fois, toutes issues d'un nouveau mélange. Les eaux les plus salées observées cette journée-là sur le seuil (31,07 psu) correspondent à des eaux situées à 82 m à la station de l'estuaire, tandis que les eaux les moins salées (27,82 psu) ont été observées à 21 m dans l'estuaire, soit à une profondeur semblable à celle du seuil (20 m).

La région du seuil externe a été échantillonnée quelques heures avant la marée basse durant les transects de juin et août, ce qui explique la faible salinité mesurée au mouillage du seuil. Il est possible que le mélange de ce bassin se fasse assez vite pour que les masses d'eau soient plus salées et denses si les mesures des transects sont prises à marée haute. Cela semble être corroboré avec le transect du mois d'octobre 2016, lors duquel la quatrième station a été visitée à marée basse et la troisième à marée haute, alors que la salinité profonde est beaucoup plus élevée à marée haute. D'ailleurs, nous observons en juin un renouvellement identifié par le maximum

de température à 160 m dans le bassin interne (figure 4). Cette masse d'eau est perçue dans le maximum de température à 30 psu de salinité dans le diagramme de température et salinité (figure 7, 1^{er} panneau) qui n'est présent qu'à 2 stations en août (4^e panneau). Cette masse d'eau se serait formée plus tôt à partir des eaux plus froides et moins salées du bassin interne et des eaux de la couche intermédiaire froide de l'estuaire, présentes au mouillage sur le seuil à marée haute, pour constituer les eaux du maximum profond en température. Ce mécanisme avait été identifié par Belzile et collab. (2016). Puis, ces mêmes eaux ont pu se mélanger avec des eaux encore plus froides et salées de la couche intermédiaire froide pour former la queue refroidissante de la courbe en température et salinité. Ce mélange n'a toutefois pas été mesuré directement par les transects, car nous ne trouvons jamais des eaux intermédiaires le long de ces lignes de mélanges. Alors que le transect du mois d'août indique un fort renouvellement des eaux intermédiaires du Saguenay, les données de température et salinité montrent aussi cette masse d'eau nouvellement formée située à l'entrée du bassin interne (reconnaisable par le maximum de température sur le diagramme de température et de salinité à la figure 7). Cela indique bien l'importance des modifications de masses

d'eau dans le bassin intermédiaire pour renouveler le bassin interne par la suite. Le même phénomène est présent en juin, alors que les eaux les plus froides et salées du bassin intermédiaire (en vert sur la figure 7) alimentent par la suite le bassin interne aux salinités inférieures à 29 psu.

Bassin interne

Le quatrième diagramme de température et salinité de la figure 7 montre les données prises dans le bassin interne durant les 3 transects. Celui de juin est caractérisé par un maximum de température profond à 30 psu, une structure presque disparue en août. Les eaux sont alors caractérisées par une ligne de mélange entre cet ancien maximum de température et un nouveau maximum de température moins profond et moins salé que l'on associe aux eaux intermédiaires du Saguenay, décrites précédemment. Les températures et salinités des mois d'août et octobre ne montrent aucune évidence de formation de nouvelles masses d'eaux qui seraient associées à des renouvellements par le fond. Ces transects sont plutôt caractérisés par une diminution de la salinité et, par conséquent, de la masse volumique des eaux profondes du bassin interne.

Pour qu'un tel épisode de renouvellement d'eau dense se produise, il faut nécessairement que les eaux résidentes intermédiaires ou profondes, provenant du précédent épisode de renouvellement, aient été allégées (moins salées) par un mélange turbulent avec les eaux supérieures et de surface moins denses. Autrement, si l'eau résidente demeure aussi dense qu'à son arrivée, de nouvelles eaux, vraisemblablement de même densité que l'eau résidente dans un système stationnaire périodique, ne pourraient pas s'insérer sous les eaux résidentes. C'est ainsi que les épisodes de renouvellement ne sont pas uniquement conditionnés par les vents, les courants et les propriétés des eaux qui passent le premier seuil, mais qu'ils le sont tout autant par les propriétés turbulentes du bassin interne. Autrement dit, s'il n'y avait aucun mélange turbulent dans les eaux intermédiaires et profondes du bassin interne, l'eau résidente y stagnerait jusqu'à atteindre l'anoxie. Or, les renouvellements sont rapides et fréquents dans le Saguenay, ceci est en grande partie dicté par le fait que les eaux profondes du Saguenay sont très turbulentes. En effet, des observations de turbulence prises dans le bassin interne, ainsi que des analyses de l'évolution saisonnière de la stratification profonde (Belzile et collab., 2016; Bourgault et collab., 2012), indiquent que la diffusivité turbulente profonde (qui quantifie la dispersion associée au mélange turbulent), sous 50 m, est de l'ordre de $O(K) = 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Or cette valeur est 10 fois plus grande que la diffusivité à profondeur équivalente

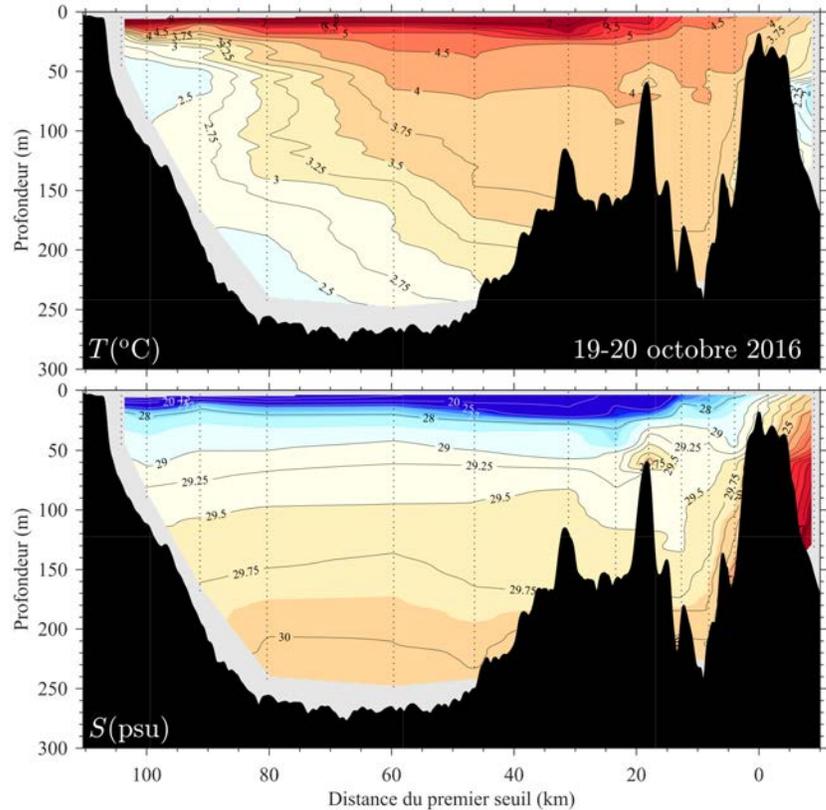


Figure 6. Transect de température (haut) et de salinité (bas) fait les 19 et 20 octobre 2016 par le Programme de monitoring de la zone Atlantique de Pêches et Océans Canada à bord du *NGCC Hudson*. Les stations occupées sont représentées par des traits verticaux en pointillé.

dans l'estuaire maritime du Saint-Laurent qui est, justement, hypoxique (Bourgault et collab., 2012). Les causes de cette forte turbulence profonde dans le fjord du Saguenay, nécessaire pour expliquer les renouvellements rapides, demeurent inconnues. Il n'est pas encore bien compris pourquoi le Saguenay profond est si turbulent. Une hypothèse serait que des marées internes et des ondes internes de plus hautes fréquences générées aux seuils, telles qu'observées par Bourgault et collab. (2011) et Bourgault et collab. (2016), iraient déferler le long des parois dans le bassin interne. Cela pourrait représenter une source considérable de mélange turbulent.

Connectivité du fjord et de l'estuaire

La salinité maximale journalière observée au seuil est indicatrice des eaux de l'estuaire qui peuvent franchir le seuil et contribuer à la formation des eaux profondes du Saguenay. Une salinité intermédiaire, mais plus près de la salinité minimale journalière, est nécessaire pour le renouvellement du Saguenay par la formation d'eaux supérieures ou d'eaux intermédiaires du Saguenay. La figure 8 reproduit la figure 3 en ne montrant que les températures et salinités qui correspondent à la salinité minimale et maximale observées chaque jour au mouillage (lignes rouges et bleues). Ces valeurs sont comparées à la température et à la salinité moyenne journalière mesurées à

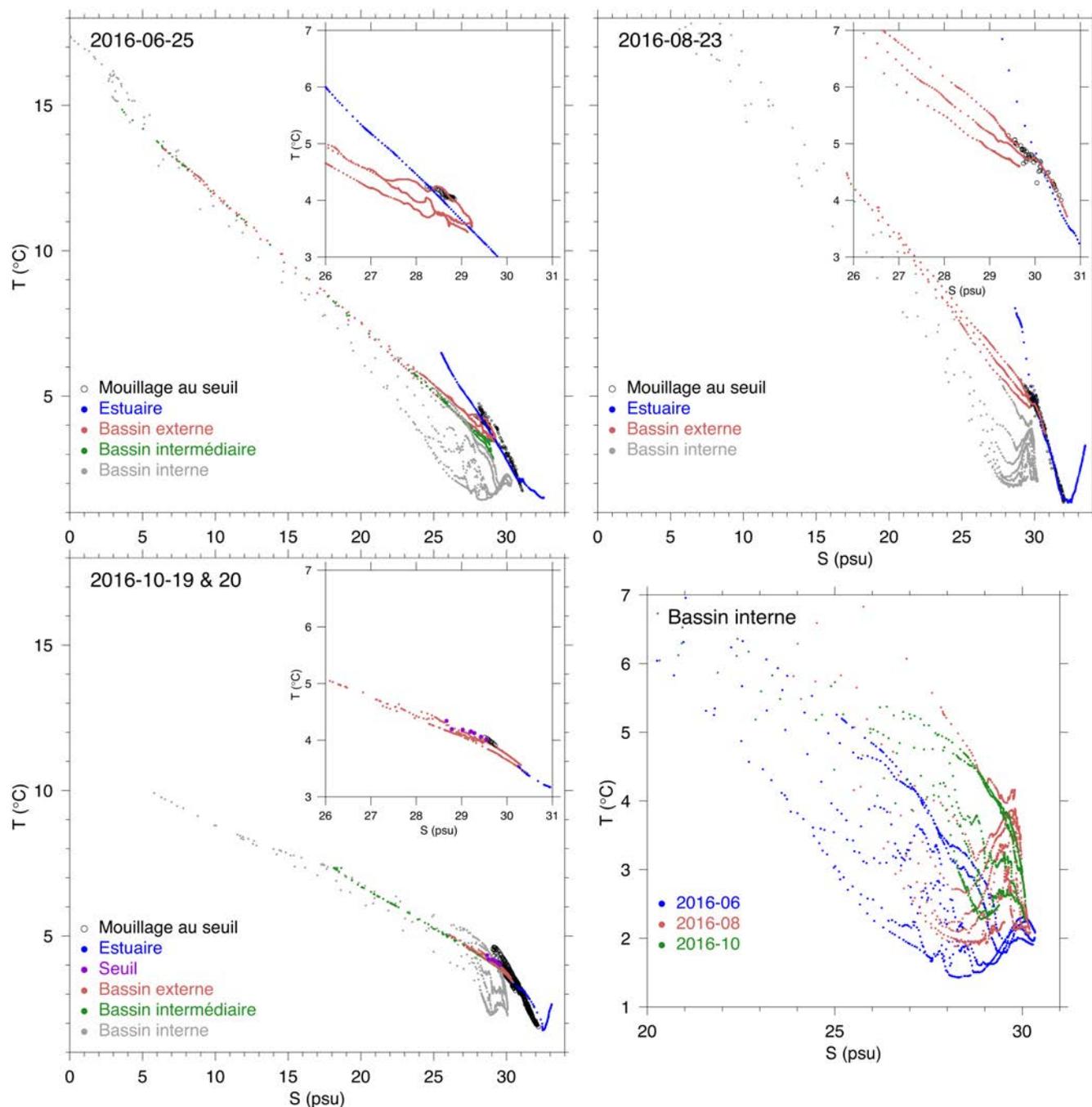


Figure 7. Relation entre la température et la salinité des profils lors des transects du 25 juin, du 23 août et du 19-20 octobre 2016 (3 premiers panneaux), ainsi que dans le bassin interne (4^e panneau). Dans les figures principales, les données du mouillage au seuil sont montrées pour la seule journée du transect, tandis que les encadrés montrent les données uniquement pour les heures correspondant aux profils faits dans le bassin externe.

la station Rimouski du PMZA à 20, 50 et 70 m de profondeur. Les variations de température et de salinité des eaux de salinité minimale journalière au seuil sont très semblables à celles observées à 20 m à la station Rimouski, tandis que les variations de salinité maximale journalière sont semblables à celles observées à la station Rimouski à 50 et 70 m.

La coïncidence des températures et des salinités observées au seuil avec celles de la station Rimouski, 100 km

plus loin, mérite qu'on s'y attarde. La couche intermédiaire froide n'est pas native de l'estuaire, mais est tranquillement transportée à partir du golfe où elle s'est formée en hiver (Galbraith, 2006; Ingram, 1979; Smith et collab., 2006). Ce temps de transport est apparent dans nos données où la température minimale des eaux les plus salées de la journée au mouillage est observée tard en avril 2016, comme l'avait aussi rapporté Ingram (1979) pour la tête du chenal Laurentien.

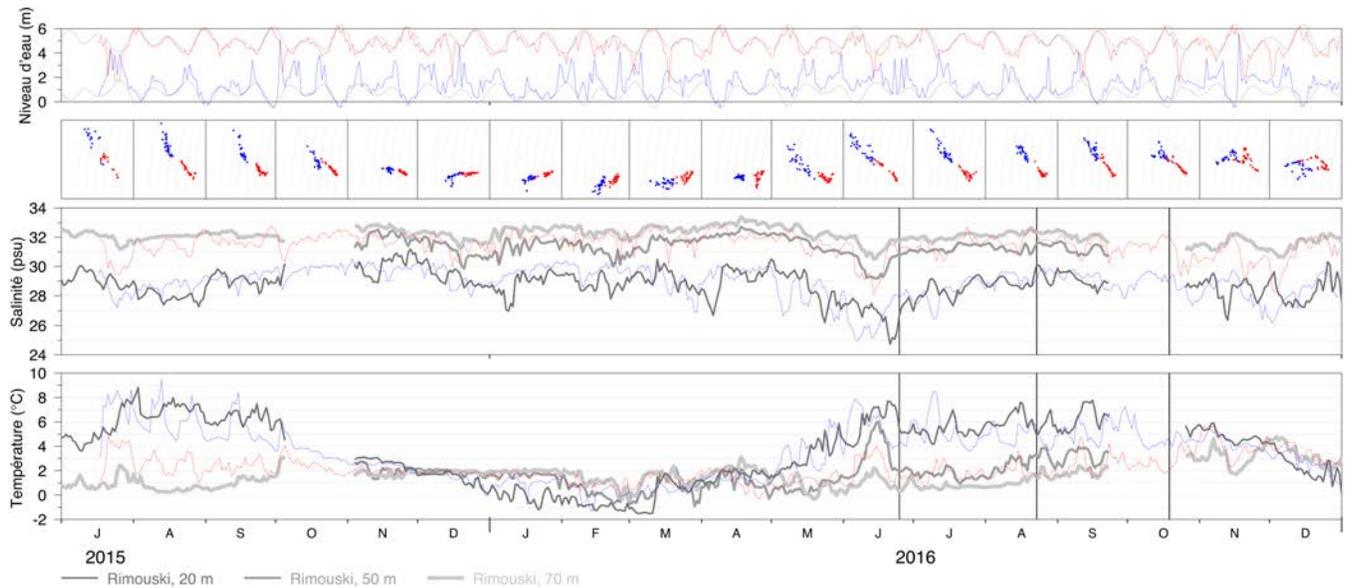


Figure 8. Température (panneau du bas) et salinité (second à partir du bas) mesurées à 31 m de profondeur à l'intérieur du premier seuil du fjord du Saguenay, correspondant à la salinité minimale (en bleu) et maximale (en rouge) mesurées chaque jour. La marée (niveau d'eau) prédite à Tadoussac ainsi que des diagrammes mensuels de température-salinité sont présentés sur le panneau du haut et dans la série de diagrammes juste en dessous. Les séries temporelles de température et de salinité mesurées au mouillage océanographique de la station Rimouski du PMZA à 20, 50 et 70 m de profondeur sont aussi indiquées en tons de gris.

Dans le cas de la majorité des variations au seuil et à la station Rimouski, il n'y a pas d'écart de quelques mois. Les variations se produisent en même temps aux 2 endroits. Ceci implique que l'estuaire se fait remplir (ou vider) par le fond et que toutes les masses d'eaux de la couche de 20 à 70 m montent et descendent en même temps. Les variations de circulation dans l'estuaire, qui pourraient en être responsables, sont possiblement reliées aux événements d'entrées d'eaux dans l'Estuaire à Pointe-des-Monts, forcés par les vents d'est sur le golfe (Lavoie et collab., 2016).

Conclusion

En juin 2016, un épisode de renouvellement estival observé dans le fjord du Saguenay ressemblait au second régime d'hiver décrit par Belzile et collab. (2016), un régime occasionné par une faible salinité au seuil. Dans le cas présent, il s'agissait d'une faible salinité probablement associée à la crue printanière du Saint-Laurent. L'intrusion est par contre chaude, ce qui ne permet pas de l'identifier facilement par simple inspection visuelle du transect de température. Dans ce cas, les inversions de température se trouvaient près de la tête du fjord.

Par la suite, une grande partie des eaux du fjord a été renouvelée par une intrusion intermédiaire en moins de 2 mois; une courte période conforme à la plage inférieure de temps de résidence notée dans la littérature (Belzile et collab., 2016).

Tandis que les eaux présentes à un mouillage placé du côté intérieur du seuil sont presque toutes des eaux de l'estuaire à marée haute, les eaux du bassin externe observées à 2 occasions à marée basse (juin et août 2016) résultent

d'un mélange des salinités parmi les plus faibles des eaux du seuil avec des eaux de surface du Saguenay. Une partie de ce mélange fait dans le bassin externe refoule sur le seuil à marée basse. Les eaux les plus salées observées au seuil durant un cycle de marée correspondent à des eaux mesurées à 64 et 82 m de profondeur à la station de l'estuaire en juin et en août, en accord avec l'estimation de Lavoie et collab. (2000).

La plage de salinité des eaux présentes au mouillage du seuil correspond assez bien à celle des eaux 100 km plus loin à la station Rimouski du PMZA, entre 20 et 70 m. Les eaux les moins salées contribuent au renouvellement des eaux supérieure et intermédiaire du fjord par des mélanges qui y ont été observés. Quant aux salinités supérieures, elles pourraient contribuer au renouvellement par le fond, même si le mécanisme n'a pas été directement observé durant l'été 2016.

La coïncidence temporelle des variations de salinité à la station Rimouski et au seuil indique que ce n'est pas une anomalie qui est transportée horizontalement de l'estuaire vers le seuil, mais plutôt un mouvement vertical des eaux synchrone dans tout l'estuaire, causé par une entrée d'eau intermédiaire ou profonde dans l'estuaire, à son embouchure, à Pointe-des-Monts. La dynamique de circulation de l'estuaire induirait un cycle saisonnier de variations de la salinité à des profondeurs de 20 à 70 m, qui serait déterminante pour le type et la vitesse de renouvellement des eaux du fjord du Saguenay.

Un manque de connaissances demeure quant à la création des masses d'eaux profondes, la variabilité du mélange durant un cycle de marées dans le bassin externe du fjord et sur les mécanismes entourant le mélange turbulent dans le bassin interne, nécessaire pour faire redescendre la salinité du

fond du fjord et permettre de nouveaux renouvellements. La création des eaux profondes du Saguenay pourrait être étudiée à l'aide d'un second mouillage pour mesurer la température et la salinité sur le second seuil. Le déploiement d'un mouillage dans le bassin externe pour mesurer la variabilité sur l'ensemble de la colonne d'eau pendant les cycles de marée pourrait répondre à la seconde question, ou encore un échantillonnage aux heures à partir d'un navire en station fixe. L'érosion temporelle des extrêmes de température peut être utilisée pour estimer l'intensité du mélange turbulent, en plus de mesures directes de turbulence.

Remerciements

Cette étude a été réalisée grâce au soutien du Programme de Monitoring de la Zone Atlantique de Pêches et Océans Canada, et est une contribution au programme scientifique de Québec-Océan. Nous désirons remercier Yvan Simard (Pêches et Océans Canada) ainsi que le parc marin du Saguenay–Saint-Laurent pour les données obtenues sur l'Alliance. Nous remercions aussi Rémi Desmarais (Pêches et Océans Canada) pour la préparation, les déploiements et les récupérations du mouillage au seuil de fjord, le personnel technique de l'Institut Maurice-Lamontagne de Pêches et Océans Canada pour la calibration des détecteurs, ainsi que François Villeneuve (Pêches et Océans Canada), chef de mission sur les 2 relevés du PMZA, qui ont récolté 2 des transects de température et salinité. Nous remercions particulièrement l'équipe du *Naturaliste canadien* pour le travail apporté au texte. Les commentaires d'Émilien Pelletier, rédacteur ad hoc, et de 2 réviseurs anonymes ont contribué à l'amélioration de ce manuscrit. ◀

Références

- ALLEN, G. et J. SIMPSON, 1998. Deep water inflows to Upper Loch Linnhe. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 47: 487-498.
- BÉLANGER, C., 2003. Observation and modelling of a renewal event in the Saguenay Fjord. Thèse de doctorat, Université du Québec à Rimouski, Rimouski, Québec, 235 p.
- BELZILE, M., P.S. GALBRAITH et D. BOURGAULT, 2016. Water renewals in the Saguenay Fjord. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 121: 638-657. doi:10.1002/2015JC011085.
- BOURGAULT D., D.C. JANES et P.S. GALBRAITH, 2011. Observations of a large-amplitude internal wave train and its reflection off a steep slope. *Journal of Physical Oceanography*, 41: 586-600.
- BOURGAULT, D., P.S. GALBRAITH et G. WINKLER, 2012. Exploratory observations of winter oceanographic conditions in the Saguenay Fjord. *Atmosphere-Ocean*, 50 (1): 17-30.
- BOURGAULT, D., P.S. GALBRAITH et C. CHAVANNE, 2016. Generation of internal solitary waves by frontally forced intrusions in geophysical flows. *Nature Communications* 7, 13606 doi:10.1038/ncomms13606.
- CHASSÉ, R. et R. CÔTÉ, 1991. Aspects of winter primary production in the upstream section of Saguenay fjord. *Hydrobiologia*, 215: 251-260.
- DRAINVILLE, G., 1968. Le fjord du Saguenay: I. Contribution à l'océanographie. *Le Naturaliste canadien*, 95: 809-855.
- FARMER, D.M. et H.J. FREELAND, 1983. The physical oceanography of fjords. *Progress in Oceanography*, 12: 147-219.
- GALBRAITH, P.S., 2006. Winter water masses in the Gulf of St. Lawrence. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 111: 23 p.
- GEYER, W. et G. CANNON, 1982. Sill processes related to deep water renewal in a fjord. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 87: 7985-7996.
- INALL, M. et P. GILLIBRAND, 2010. The physics of mid-latitude fjords: a review. *Geological Society, London, Special Publications*, 344: 17-33.
- INGRAM, R.G., 1979. Water mass modification in the St. Lawrence Estuary. *Le Naturaliste canadien*, 106: 45-54.
- LAVOIE, D., Y. SIMARD et F.J. SAUCIER, 2000. Aggregation and dispersion of krill at channel heads and shelf edges: the dynamics in the Saguenay-St. Lawrence Marine Park. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 57: 1853-1869.
- LAVOIE, D., J. CHASSÉ, Y. SIMARD, N. LAMBERT, P.S. GALBRAITH, N. ROY et D. BRICKMAN, 2016. Control of large-scale atmospheric and oceanic forcing on krill transport into the St. Lawrence estuary investigated using a 3D numerical model. *Atmosphere-Ocean*, 54 (3): 299-325. doi:10.1080/07055900.2015.1082965.
- LOUCKS, R.H. et R.E. SMITH-SINCLAIR, 1975. The physical oceanography of the Saguenay Fjord. Technical Report. Bedford Institute of Oceanography, Halifax, Nova Scotia, 77 p.
- SEIBERT, G., R. TRITES et S. REID, 1979. Deepwater exchange processes in the Saguenay fjord. *Journal of the Fisheries Board of Canada*, 36: 42-53.
- SMITH, G., F. SAUCIER et D. STRAUB, 2006. Response of the lower St. Lawrence Estuary to external forcing in winter. *Journal of Physical Oceanography*, 36: 1485-1501.
- STACEY, M.W. et Y. GRATTON, 2001. The energetics and tidally induced reverse renewal in a two-silled fjord. *Journal of Physical Oceanography*, 31: 1599-1615.
- SUNDBY, B. et D.H. LORING, 1978. Geochemistry of suspended particulate matter in the Saguenay fjord. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 15: 1002-1011.
- TAYLOR, G.B., 1975. Saguenay River sections from fifteen cruises. Technical Report BI-R-75-15. Bedford Institute of Oceanography, Halifax, Nova Scotia, 38 p.
- TERRIAULT, J. et G. LACROIX, 1975. Penetration of the deep layer of the Saguenay fjord by surface waters of the St. Lawrence Estuary. *Journal of the Fisheries Board of Canada*, 32: 2373-2377.
- TERRIAULT, J., R. DE LADURANTAYE et R. INGRAM, 1984. Particulate matter exchange across a fjord sill. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 18: 51-64.
- XIE, H., C. AUBRY, S. BÉLANGER et G. SONG, 2012. The dynamics of absorption coefficients of CDOM and particles in the St. Lawrence estuarine system: Biogeochemical and physical implications. *Marine Chemistry*, 128: 44-56.