Rapport présenté à la CMQ

Project Énergie-Est : Vulnérabilité et exposition de l'estuaire fluvial du St-Laurent dans la région de la CMQ

Par : Yves Secretan, Professeur INRS-ETE

Rapport INRS R-1654

Mars 2016

Ce rapport fait état des analyses, préoccupations et recommandations de l'auteur concernant le projet d'oléoduc Énergie Est de Trans-Canada et de ses impacts sur l'estuaire fluvial du Saint-Laurent sur le territoire de la CMQ. Il a été élaboré sur la base de documents fournis par la CMQ. Sauf indiqué dans le texte, il se limite à l'estuaire fluvial, les autres aspects étant traités par d'autres experts.

Préoccupations

- Tel que présenté, le projet d'oléoduc Énergie Est de Trans-Canada (TC) ne tient pas compte de l'exposition du fleuve Saint-Laurent à un déversement direct ou indirect, via les tributaires, dans le cours d'eau. Le trajet prévu coupe en effet de nombreux tributaires tant en rive Nord qu'en rive Sud (Voir à cet effet le document d'expertise par Leclerc, 2015). Les documents soumis par TC mentionnent les tributaires, mais ne font pas référence aux impacts possible sur l'estuaire fluvial, tant pendant la construction, en phase d'exploitation et surtout lors d'un éventuel déversement accidentel majeur.
- Le comportement hydrodynamique du fleuve dans la région est très particulier, en lien avec la présence de fortes marées et d'inversions complètes du courant en phase de montant (jusant). Ceci donne lieu à une hydrodynamique complexe, la même particule de polluant pouvant faire plusieurs va-et-vient avant d'être évacuée vers l'estuaire et le golfe. La prédiction du comportement en cas de déversement est difficile en raison des multiples facteurs qui déterminent cette dynamique.
- Plusieurs facteurs aggravants influencent le comportement hydrodynamique. Les courants et les amplitudes de marées sont très variables. La saison hivernale se laisse difficilement circonscrire en raison de la présence d'un couvert de glace fracturé qui se déplace au gré des courants. Sur le plus long terme, les changements climatiques vont également venir vraisemblablement affecter le régime hydrodynamique de fleuve.
- Dans le présent dossier, le fleuve Saint-Laurent ne fait pas l'objet d'une analyse même minimale. Une modélisation numérique élaborée à l'échelle du fleuve permettrait d'analyser le degré d'exposition des diverses vulnérabilités à un aléa majeur de déversement accidentel.
- Les scénarios de déversement présentés pour les tributaires ou les autres composantes du réseau hydrographique (milieux humides, nappes souterraines) sont très réducteurs. Ils ne correspondent pas en fait aux données du projet, notamment par rapport aux volumes qui pourraient être déversés en cas de rupture transversale ou longitudinale de la conduite principale. Ils ne tiennent pas compte réalistement de la présence de glace dans les cours d'eau sous ses diverses formes (flottante, embâcle consolidé, banquise appuyée au fond, frasil). Ils ne tiennent pas du tout compte du facteur humain, facteur pourtant à la source de nombreuses catastrophes industrielles.
- Le scénario de déversement dans le rivière Etchemin est à notre avis optimiste, tant dans les temps de réaction que dans les temps de transport vers le fleuve. Il ne tient pas compte des caractéristiques des différents produits transportés (National Academies of Sciences 2016), ni de la présence possible de glace. Ce n'est pas un scénario catastrophe comme on est en droit de s'attendre dans une analyse de risque. Il n'est pas représentatif pour les autres rivières sur lesquelles aucune analyse n'est faite.

- Le débit du pipeline est de 2 m^3/s. Dans un cas de bris, avec un temps d'arrêt théorique de 22 minutes, ce sont au moins de 2 600 m^3 de produits qui se déversent sans compter le volume contenu dans le pipeline. Dans le cas d'une fuite non détectée de 1.5% du débit ce sont potentiellement 40 000 m^3 qui sont déversés entre deux inspections au 15 jours.
- La compréhension de l'hydrodynamique des cours d'eau est essentielle afin de définir les risques pour le fleuve Saint-Laurent. Cette connaissance n'a pas été mobilisée pour configurer un plan de mesures d'urgence et de rétablissement en cas de catastrophe.
- Une analyse de risque présentant les principales vulnérabilités exposées à un déversement, les conséquences d'un tel aléa sur celles-ci et la planification des mesures d'urgence en ce qui concerne le fleuve dans la région de Québec n'ont pas été présentés.
- Il n'est pas prévu de faire un relevé de l'état actuel afin de servir d'état de référence.

L'analyse de risque

De manière classique l'analyse de risque est basée sur la vulnérabilité, l'exposition de celle-ci et l'aléa. Pour le fleuve Saint-Laurent, nous proposerons dans un premier temps un survol de quelques éléments de vulnérabilité qui nous sont connus et qui s'imposent d'amblée à l'analyse, comme par exemple les prises d'eau au fleuve dans la région. Les autres vulnérabilités reliées aux usages de contact, le récréo-tourisme ou à la pérennité des écosystèmes aquatiques demeureront implicites dans le document qui suit.

Dans un second temps, nous montrerons par la voie de simulations numériques sommaires des exemples d'exposition de ces vulnérabilités (prises d'eau) en cas de déversement de pétrole. Cette contribution est loin de représenter formellement une analyse de risque, laquelle devrait inclure un traitement élaboré des nombreuses vulnérabilités, y compris en leur attribuant une valeur monétaire.

Il ne s'agit pas ici de proposer des scénarios catastrophe (« *worst case scenario* ») en bonne et due forme, cet entreprise sortant du cadre très limité de notre mandat. Il s'agit surtout de souligner que, même pour des situations hydrologiques et marégraphiques relativement normales (habituelles), le fleuve est un enjeu hydrique majeur hautement exposé aux aléas du transport de matières dangereuses et pour cette raison, il ne peut être ignoré pour la suite des choses.

Vulnérabilité

Les deux paragraphes suivants sont adaptés de la thèse de Pascal Matte (Matte, 2014).

Le fleuve Saint-Laurent et son estuaire font partie de l'un des plus importants systèmes hydrographiques d'Amérique du Nord : le système Saint-Laurent – Grands Lacs. Avec un bassin de 1.6×10^6 km^2, ce dernier draine plus de 25 % des réserves mondiales d'eau douce. Il connecte les Grands Lacs avec l'océan Atlantique, formant la plus grande voie navigable intérieure au monde. Plus de 45 millions de personnes vivent à l'intérieur de son bassin, qui constitue le cœur industriel des États-Unis et un centre socio-économique majeur pour le Québec et le Canada. L'environnement naturel du Saint-Laurent renferme des ressources essentielles à une multitude d'espèces animales et végétales et représente une source d'approvisionnement en eau potable pour près de la moitié de la population du territoire (Hébert & Belley, 2005).

L'estuaire fluvial du Saint-Laurent, composé d'eau douce, se trouve à la jonction entre le fleuve et l'estuaire supérieur du Saint-Laurent. Il s'étend sur près de 180 km, de la sortie du lac Saint-Pierre à la pointe est de l'île d'Orléans, située à la limite de l'intrusion saline et du bouchon de turbidité, ou zone de transition estuarienne (D'Anglejan, 1990, Ingram & El-Sabh, 1990, Simons *et al.*, 2010). Cette région du fleuve est caractérisée par une topographie complexe, que l'on associe à des zones profondes (> 60 m), à une section de largeur variable (< 1 à 15 km), à l'imposant chenal de navigation et à la présence d'îles, de hauts-fonds, de marais et de nombreux ouvrages de génie. Elle présente également une forte hétérogénéité dans la distribution des plantes aquatiques ou du couvert de glace, selon la saison. Ces caractéristiques physiques ont un impact significatif sur la circulation et sur la dynamique des écoulements.

Les marais de l'estuaire d'eau douce du Saint-Laurent abritent une biodiversité exceptionnelle, en l'occurrence plusieurs espèces floristiques menacées ou vulnérables. Parmi ces espèces, trois sont officiellement reconnues comme étant menacées au Québec et ont fait l'objet de plans de conservation produits par le MDDEF (Bhiry *et al.* 2013)

La CMQ regroupe près de 800 000 habitants (http://www.cmquebec.qc.ca/municipalites) dont la ville de Québec qui fait partie du patrimoine mondial de l'UNESCO. Une part très significative de cette population est approvisionnée en eau à partir de trois prises d'eau dans le fleuve ainsi que d'une prise d'eau dans la rivière Chaudière.

Complexité de l'hydrodynamique

Les quatre paragraphes suivants sont adaptés de la thèse de Pascal Matte (Matte, 2014).

De l'aval vers l'amont, l'écoulement est soumis à l'influence d'une marée semi-diurne, avec des marnages culminant à 7 m à Saint-Joseph-de-la-Rive (défini comme kilomètre de rivière 0, ou rkm 0) lors des grandes marées de vives-eaux. Des augmentations du niveau de l'eau (vitesse de montée du plan d'eau) de plus de 1 m/h sont observables en marée montante, menant à des changements très rapides des conditions d'écoulement et des aires submergées (estrans). De fortes inversions de courant sont ainsi générées, avec des débits de pointe jusqu'à cinq fois supérieurs à la moyenne journalière aux stations aval (Figure 4).

Le signal de marée est progressivement déformé et atténué à mesure qu'il se propage vers l'amont dû aux effets de la friction (Godin, 1999, Matte *et al.*, 2014c); la durée du jusant s'en trouve ainsi augmentée par rapport au flot, plus court et abrupt. La limite amont où cessent les inversions de courant (une seule étale) se déplace entre Grondines (rkm 179.5) et Bécancour (rkm 217) en fonction de la marée et du débit fluvial (Figure 4).

Le débit fluvial dans l'estuaire fluvial du Saint-Laurent provient des débits sortants du lac Ontario, de la rivière des Outaouais et des différents tributaires le long de son cours intermédiaire. Bien que le débit moyen journalier à Québec soit de 12 200 m^3/s, les débits minimum et maximum observés pour la période de 1960–2010 ont été de 7000 et 32 700 m^3/s, respectivement, incluant la contribution des tributaires et des superficies drainées en amont de Québec (Bouchard & Morin, 2000). Les effets de telles variations (saisonnières et interannuelles) sur les niveaux moyens et le marnage de la marée sont sévères, particulièrement dans la portion amont de l'estuaire fluvial (cf. section 2.3, Matte *et al.*, 2014c).

Par ailleurs, certaines conditions météorologiques particulières, comme les tempêtes extratropicales (dépressions) se déplaçant entre le Saint-Laurent et le littoral atlantique, provoquent occasionnellement une surélévation des niveaux d'eau (surcote) pouvant atteindre quelques mètres; ces surcotes peuvent se produire à marée haute comme à marée basse (El-Sabh *et al.*, 1988, Drapeau, 2008). Une augmentation de la fréquence et de la force de ces événements a été observée dans la dernière moitié du 20e siècle, suggérant des changements dans la dynamique de forçage des tempêtes (Xu *et al.*, 2006). Ainsi, les tendances des changements climatiques pourraient avoir une influence significative sur la dynamique du fleuve dans la région, y compris à l'égard de l'équilibre de la position du front salin.

À ces divers facteurs, s'ajoute celui de la variabilité saisonnière qui implique en saison hivernale la présence active d'un couvert de glace fracturé, donc mobile, afin de maintenir la navigabilité dans la Voie maritime du Saint-Laurent.

Ensemble, les caractéristiques du terrain, de la marée et des débits fluviaux, combinées à l'influence d'événements météorologiques extrêmes et des facteurs saisonniers, font de l'estuaire fluvial du Saint-Laurent une région aux conditions d'écoulement très dynamiques et en constant ajustement.

Le déplacement d'un panache de contaminant va donc dépendre, entre autres, de la saison, de la phase de la marée lors du déversement et de la durée de celui-ci. Ainsi, au montant, le panache va d'abord se déplacer vers l'amont, tandis qu'au baissant il se propagera vers l'aval; aux étales de courant de marée basse et de marée haute, la nappe déversée va faire du sur-place et s'y accumuler. Ceci donne lieu à une dynamique complexe, la même particule de polluant pouvant faire plusieurs va et vient avant d'être finalement évacuée vers l'estuaire et le golfe, où de nouvelles conséquences peuvent être anticipées.

En résumé, les facteurs qui influencent le transport de contaminants pétroliers sont :

- la nature du polluant et le comportement spécifique de chacune de ses fractions (évaporation, étalement en surface, émulsion dans la colonne d'eau, sédimentation au fond)
- le vent pour un polluant flottant;
- la présence d'un couvert de glace fixe ou mobile et la température de l'eau en hiver;
- les courants (advection) et la turbulence du milieu;

les facteurs qui influencent les courants sont :

- les débits du fleuve et des tributaires;
- le niveau moyen des mers;
- la marée;
- la topographie du fond et la présence d'importants estrans;

les facteurs qui influencent les débits sont :

- la météorologie et la pluviométrie;
- les changements climatiques;

les facteurs qui influencent les niveaux moyens des mers sont :

- les changements climatiques;

et les facteurs qui influencent la marée sont :

- l'alignement des planètes;

- le vent;
- les phénomènes météorologiques à grandes échelles (tempêtes extratropicales).

En vue de déterminer l'exposition du fleuve dans la région à un aléa de déversement, il sera donc primordial de tenir compte de ces facteurs car ils ont un impact sur le comportement d'un panache de contaminant, sur l'exposition des diverses vulnérabilités et donc sur le risque global.

Exposition

Compte tenu de la complexité des écoulements décrite à la section précédente, et de tous les scénarios de déversements possibles, il est hors du cadre de notre mandat de déterminer les cas les plus dangereux pour le domaine fluvial de la CMQ.

Afin de montrer l'étendue (portée) de la zone potentiellement touchée par un déversement, nous avons fait un exercice sommaire de simulation avec des déversements en provenance de deux tributaires, la rivière Chaudière et la rivière Jacques–Cartier. La première se situe directement dans le territoire de la CMQ et elle est traversée en divers points de son propre réseau hydrographique, dont la rivière Beaurivage. Le deuxième est situé légèrement en amont de la juridiction de la CMQ, mais un panache de contaminants impacterait directement le territoire et les usages de l'eau de la CMQ comme nous allons le voir. Tous les autres cas de figure similaires liés à des déversements dans d'autres tributaires (rivières Beaurivage, Etchemin, en rive sud; Sainte-Anne, Batiscan, etc. en rive nord) pourraient donner des résultats aussi préoccupants mais n'ont pas fait l'objet de simulations équivalentes.

Un événement hydrodynamique de référence moyen

Les calculs sont basés sur un état de référence hydrodynamique de juin 2009, lequel correspond à des conditions de marée moyenne (~4–4.5 m de marnage), de débits relativement moyens journaliers du fleuve oscillant entre 12 000 et 13 000 m^3/s, des débits dans la rivière Chaudière variant entre 50 et 100 m^3/s et des débits dans le rivière Jacques-Cartier entre 30 et 45 m^3/s.

Le modèle hydrodynamique utilisé provient de la thèse de Matte (2014). Il permet de restituer les niveaux d'eau et les vitesses moyennées sur la verticale, sur l'ensemble du domaine de simulation. Il a été calibré et validé en niveaux d'eau et en vitesses. Les simulations hydrodynamiques ont toutefois été réalisées sans tenir compte de l'influence du vent. On comprendra ici que des conditions hydrodynamiques beaucoup plus intenses ou contrastées peuvent régulièrement se produire selon les phases de marée de vives-eaux, les débits en période de crue et/ou d'étiage et les épisodes de vents violents en provenance de l'Est. En d'autres mots, le cas traité est loin de représenter un scénario de pire cas (*whorst case scenario*).

Le modèle d'advection-diffusion, couplé à l'hydrodynamique, permet de restituer l'évolution du panache de concentration de contaminant dans le temps. Il simule en non-stationnaire les concentrations mélangées sur toute la colonne d'eau. Les diffusivités utilisées dans le modèle proviennent des diffusivités calibrées pour le lac Saint-Pierre (Champoux *et al.*, 2007). Elles n'ont pas été formellement calibrées ni validées pour la section à marée du fleuve.

Dans le cas d'une nappe de pétrole qui flotte en surface, le vent peut aussi avoir un grand impact sur le transport du contaminant et son étalement en surface (fraction flottante), poussant le

contaminant dans sa direction. De plus, les vitesses issues du modèle hydrodynamique sont moyennées sur la verticale, alors que ce sont les vitesses de surface (généralement plus élevées de l'ordre de 15-20%) qui agiront sur le transport d'une nappe de pétrole flottant.

Scénarios de déversement

Pour le scénario de déversement, nous avons retenu les paramètres suivants :

- Contaminant conservatif voyageant à la vitesse moyenne de la colonne d'eau;
- Pas d'évaporation de la partie volatile;
- Pas de déposition de la fraction lourde (bitume), etc.
- Dilution initiale ou rapport du débit de déversement sur le débit du cours d'eau de 1 à l'injection (voir plus loin sur la signification de cette hypothèse sur l'interprétation);
- Injection en continu débutant le 2009-06-14 à 16 ::00 :00.

Le moment de l'injection correspond au début du baissant à la station marégraphique de Lauzon.

La valeur retenue pour représenter l'exposition est D_{max}, le maximum des dilutions atteintes en chaque point entre le temps initial t_0 et le temps final t_0+dt:

$$D_{max}(x,y) = \max(\, D(x,y,t)\,) \quad t \in [t_{0,}, t_0 + dt]$$

Par exemple, après 3h, la limite de 10^{-3} représente la limite des zones ayant eu au cours de ces 3 heures une dilution de 1 en 1000.

Pour obtenir une indication plus précise de la dilution au fleuve, il faut tenir compte de la dilution initiale de la nappe dans le cours d'eau à sa confluence.

Ainsi,

$$D_f(x,y,t) = D_u(x,y,t) \times \frac{Q_p}{Q_r}$$

où :

$D_f(x,y,t)$ la dilution final au fleuve, distribué dans l'espace et le temps [ ]

$D_u(x,y,t)$ la dilution unitaire, résultat de la simulation [ ]

Q_p le débit du déversement de pétrole (m^3/s)

Q_r le débit du cours d'eau (m^3/s)

Il est possible aussi d'extraire le débit du déversement de la formule pour obtenir les propriétés intrinsèques de mélange. La dilution finale du produit pétrolier serait alors calculée en majorant le résultat, soit $D_{u(}(x,y,t)/Q_r$ par le débit du déversement Q_p.

La Figure 1 représente l'exposition du fleuve aux concentrations de contaminant sous la forme des maximums des dilutions D_u atteintes après 3h, 6h, 12 et 24h, pour la rivière Chaudière. Elle fait clairement ressortir la vitesse de propagation et l'étendue de la zone affectée par le jeu des courants de marée.

Dans ce cas, la dilution finale D_f doit être réduite par le débit de la Chaudière, soit environ 100 m^3/s. En considérant un débit caractéristique de déversement de 1 m^3/s en phase initiale, les dilutions finales devraient donc être minorées par un facteur 10^{-2}.

Bien que ne faisant pas partie du territoire de la CMQ, une simulation équivalente a été réalisée sur la rivière Jacques-Cartier (Figure 2). Dans ce cas, le débit de la rivière simulé est de l'ordre de 40 m^3/s. La dilution finale devrait donc être minorée d'un facteur équivalent pour un débit de pétrole unitaire. Cette simulation, qui n'a pas été prolongée sur plus de 24 heures, ne permet pas d'observer la redistribution dans le milieu à la hauteur de Québec, mais montre que très rapidement le marais Provancher de St-Augustin est touché par le panache.

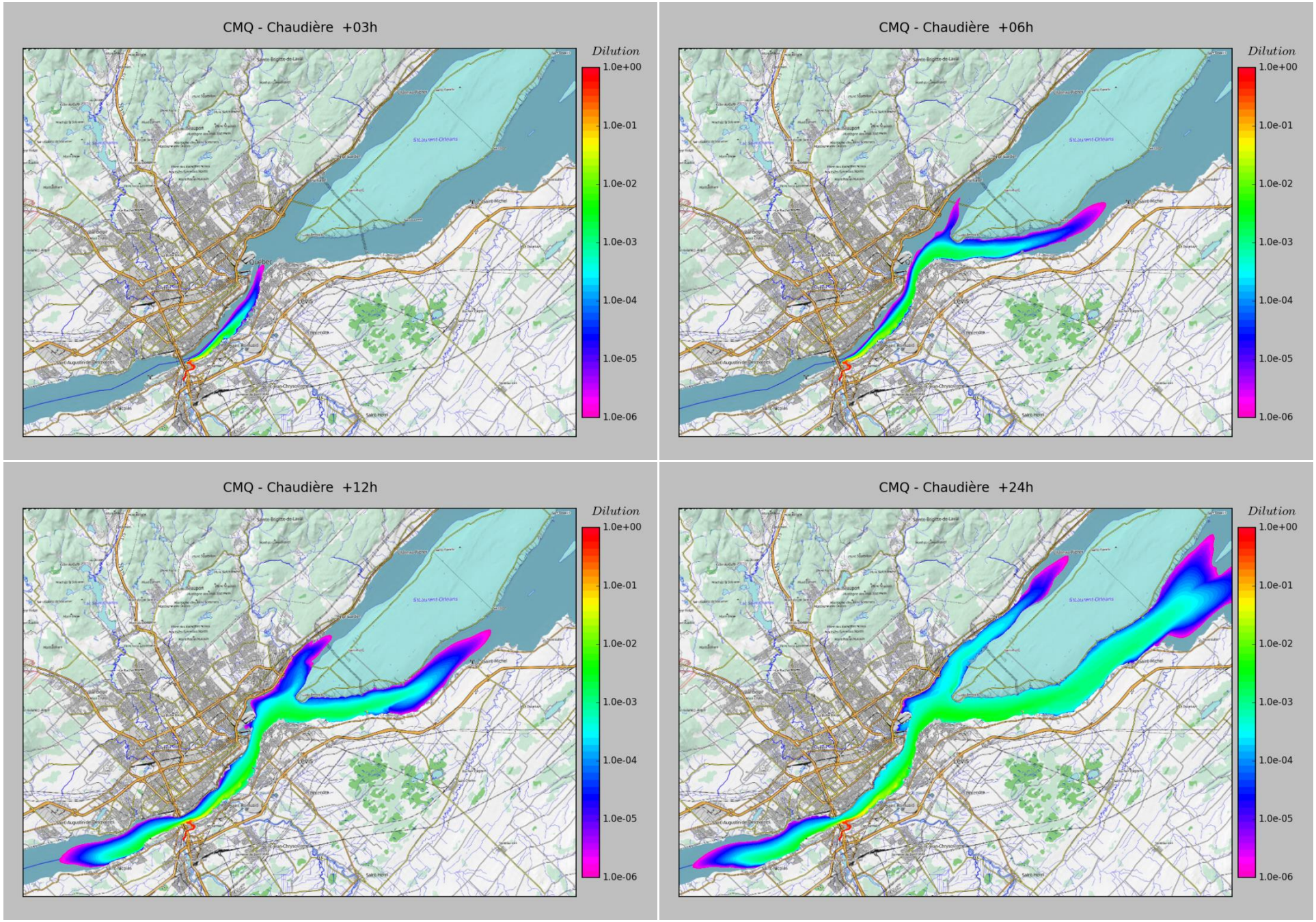


Figure 1 Panache de la rivière Chaudière : Maximum des dilutions unitaires. La dilution finale doit être minorée en fonction du rapport de dilution à l'injection.

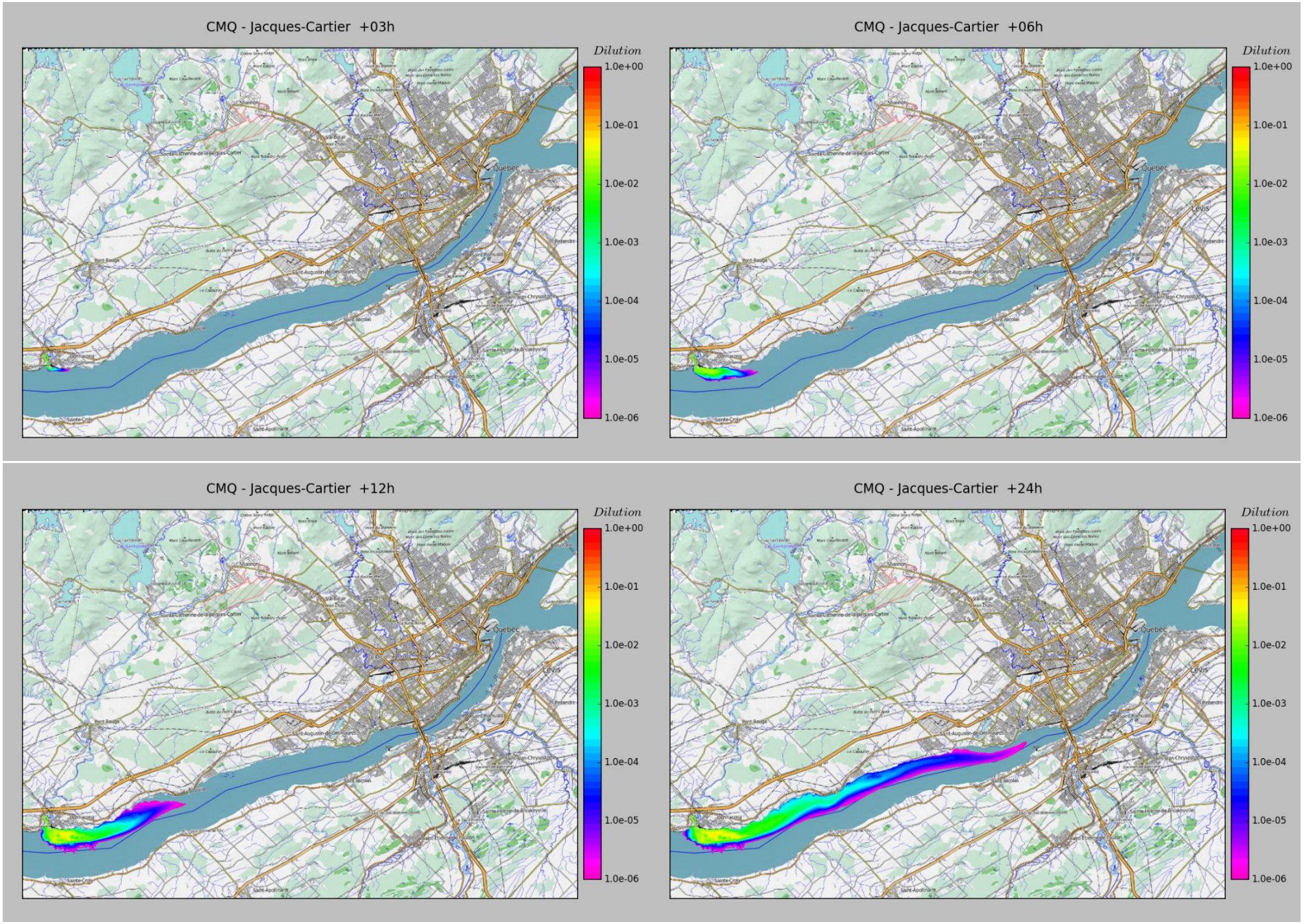


Figure 2 Panache de la rivière Jacques-Cartier : Maximum des dilutions unitaires. La dilution finale doit être minorée en fonction du rapport de dilution à l'injection

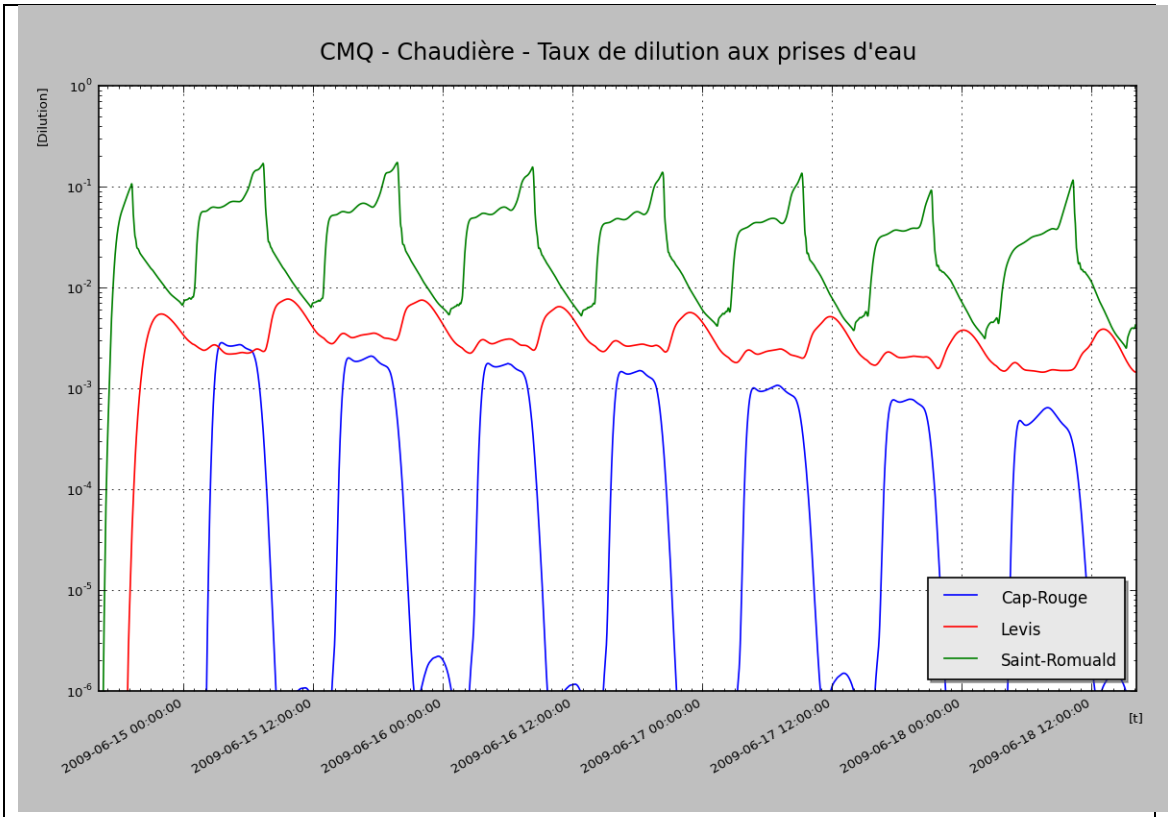


Figure 3. Panache de la rivière Chaudière – Dilutions unitaires aux prises d'eau de la CMQ. La dilution finale doit être minorée en fonction du rapport de dilution à l'injection

La Figure 3 représente l'évolution de la dilution unitaire aux prises d'eau dans le fleuve St-Laurent pour la simulation de la rivière Chaudière. En tenant compte d'une dilution initiale à l'injection, l'échelle du graphique serait réduite par le facteur 10^{-2} typiquement.

A titre indicatif et de comparaison, Transports Canada dans son « Règlement sur la prévention de la pollution par les navires et sur les produits chimiques dangereux »[1] spécifie que :

> « … les navires qui veulent décharger des eaux de cale doivent respecter la limite de 5 ppm et disposer d'une alarme de dépassement des 5 ppm dans les eaux de cale … »

Cette valeur de 5ppm correspond à $5x10^{-6}$. Ainsi, pour la prise d'eau de Saint-Romuald, les simulations montrent que les dilutions unitaires oscillent rapidement entre 10^{-1} et 10^{-2}. Prenant en compte une dilution initiale à l'injection de 10^{-2}, ces valeurs représentent des dilutions effectives de 10^{-3} à 10^{-4}, soit de 100 à 1000 fois la limite autorisée pour les eaux de cale des bateaux. Pour la prise d'eau de Lévis, ce serait typiquement entre 10 fois et 100 fois. On constate aussi que la rive nord du fleuve ne serait pas à l'abri d'un tel déversement en rive sud, les taux de dilution pouvant transitoirement dépasser les limites autorisées pour les eaux de vidange des cales de bateau.

[1] https://www.tc.gc.ca/fra/securitemaritime/epe-environnement-sources-hydrocarbures-1530.htm

Bien que les conditions simulées soient loin de correspondre à la définition d'un scénario catastrophe répondant aux normes en la matière, la redistribution de produits pétroliers dans le fleuve Saint-Laurent devra être analysée en fonction de l'énorme pouvoir dispersif des masses d'eau mues par la marée dans la région de Québec.

Facteurs aggravants

Ainsi, le cas présenté à la section précédente est un cas moyen en terme de débits, tant du fleuve que des tributaires, ainsi qu'en terme de marée. Les marées et les courants peuvent être beaucoup plus importants conduisant possiblement à une propagation plus rapide et à une portée d'exposition plus étendue que celle simulée. Il nous est difficile de figurer à l'avance quelle situation pourrait définir les paramètres d'un scénario du pire.

Par contre, et à titre d'exemple, une reconstruction des débits tidaux sur une année entre août 2007 et août 2009 est présentée à la Figure 4. Les débits tidaux sont les débits dus à la marée qui comprennent également les débits nets du fleuve. « Ebb » désigne les marées baissantes et « flood » les marées montantes. La reconstruction permet de mieux appréhender la variabilité des conditions d'écoulement dans l'estuaire fluvial, incluant le débit d'inversion (valeurs négatives).

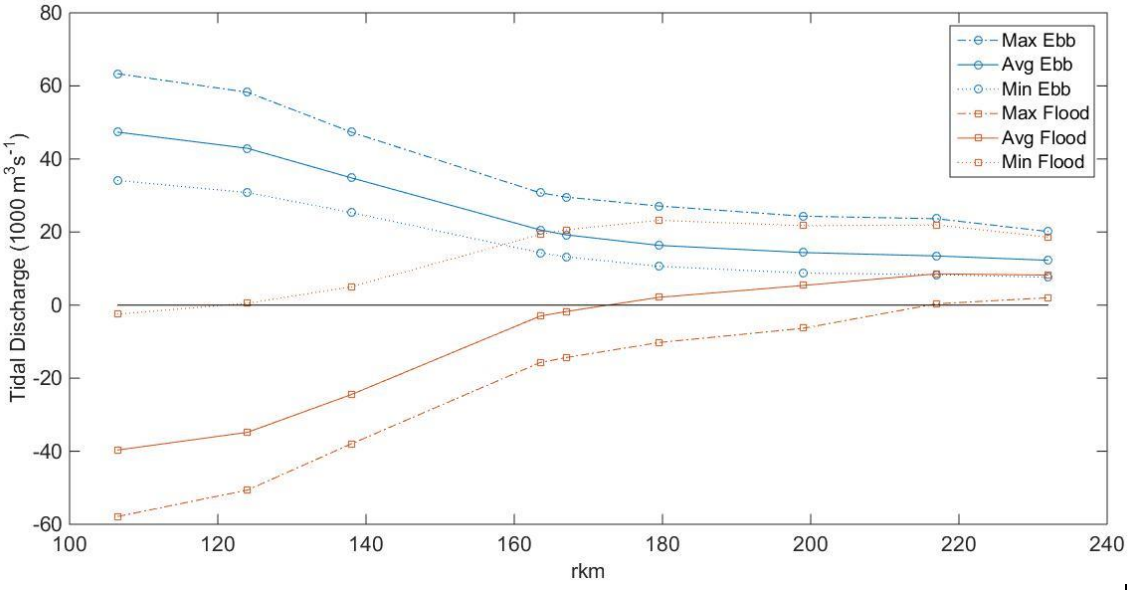


Figure 4 : Reconstitution des débits tidaux pour la période Août 2007 – Août 2008

Québec se situe au rkm 106.5 (axe des *x*), les rkm augmentant vers l'amont. On constate qu'à mesure que l'on remonte, le débit net fluvial vient à dominer le débit de la marée. De la Figure 4, il apparait donc que la limite d'inversion varie entre le rkm 120 et le rkm 220.

Pour juin 2009, soit les conditions de la Figure 1, avec un débit entre 12 000 et 13 000 m³/s, on se situe environ autour de la moyenne sur la Figure 4, donc loin des extrêmes. Lors de la campagne de mesure de 2009, celle qui a servi à valider les résultats hydrodynamiques, en marée de mortes-eaux, l'inversion de courant s'arrêtait vers Grondines (rkm 179.5); en marée de vives-eaux on a observé une inversion presque totale même à Batiscan (rkm 199).

Sans statuer sur le cas du pire scénario, on peut déjà affirmer que la combinaison d'un débit d'étiage du fleuve et de fortes marées (vives-eaux) va provoquer de forts courants ascendants au jusant et une plus grande extension du panache vers l'amont, ce qui pourrait amplifier le processus de dispersion latérale dans le fleuve et exposer toutes les vulnérabilités présentes quelle que soit la rive considérée.

De plus, les changements climatiques appréhendés (Ouranos 2016) indiquent une diminution probable des débits fluviaux, une augmentation des extrêmes hydrologiques (crues et étiages) ainsi qu'un relèvement graduel systématique ou transitoire (ondes de tempêtes) du niveau de la mer.

En résumé

Les résultats montrent que potentiellement toute la région de Québec serait touchée par un déversement, quel que soit le point d'entrée via les tributaires et ils sont nombreux, ce qui accroît le risque en proportion du nombre.

Les conditions d'écoulement dans la région de la CMQ sont très complexes et ne peuvent être réduites à un seul scénario.

Le territoire de la CMQ présente un haut potentiel dommageable, avec des impacts sur sa région, sa population et son écosystème.

Recommandations

En regard du potentiel dommageable, des impacts sur la région, sa population et son écosystème, Trans-Canada doit faire la démonstration qu'elle prend tous les moyens pour minimiser les impacts en cas de déversement.

Une analyse de risque élaborée devrait tenir compte non seulement des différents cas de figure pouvant déterminer la redistribution des produits pétroliers dans le fleuve (scénarios de pire cas) mais également des facteurs humains à la source de nombreuses catastrophes industrielles et des limites inhérentes à la gestion de grandes catastrophes.

Étant donné les nombreuses incertitudes sur les conséquences environnementales et humaines d'un déversement accidentel dans un milieu aussi complexe que l'estuaire fluvial, on pourrait s'attendre à ce que le principe de précaution[2] soit appliqué tant que ces incertitudes ne seront pas mieux connues.

[2] " Principe selon lequel l'absence de certitudes, compte tenu des connaissances scientifiques et techniques du moment, ne doit pas retarder l'adoption de mesures effectives et proportionnées visant à prévenir un risque dans les domaines de l'environnement, de la santé ou de l'alimentation." (http://www.vie-publique.fr/th/glossaire/principe-precaution.html)

Références

Bouchard A & Morin J (2000) Reconstitution des débits du fleuve Saint-Laurent entre 1932 et 1998. Rapport Technique RT-101 (Environnement Canada, Sainte-Foy). 71 p.

BHIRY, N., CLOUTIER, D., COUILLARD, L., GERVAIS, A., LAMARRE, P., NORMANDEAU, M., et al. Plan d'action Saint-Laurent 2011- 2026, «Évolution des hauts marais de l'estuaire d'eau douce du Saint-Laurent et stratégies de protection des espèces en situation précaire dans une perspective de changements climatiques», [En ligne], Québec (QC) : UNIVERSITE LAVAL; 2013; 134p. (http://www.ouranos.ca/media/publication/241_RapportBhiry2013.pdf)

Champoux, O. & J. Morin (2007). Use of 2D convection-diffusion model in habitat modeling of the St. Lawrence River, Canada. 6th International Symposium on Ecohydraulics. Christchuch, New - Zealand, 18-23 February 2007.

D'Anglejan B (1990) Recent sediments and sediment transport processes in the St. Lawrence Estuary. Oceanography of a large-scale estuarine system: The St. Lawrence, El-Sabh MI & Silverberg N (Édit.) Springler-Verlag, New York. p 109-129.

Drapeau G (2008) Surélévations de la marée dans la région de Québec. 76e Congrès de l'Acfas. (Québec, 5-9 mai 2008).

El-Sabh MI, Murty TS & Briand J-M (1988) Negative storm surges on Canada's East coast. Natural and Man-Made Hazards, El-Sabh MI & Murty TS (Édit.) Springer Netherlands. p 305-316.

Godin G (1999) The propagation of tides up rivers with special considerations on the Upper Saint Lawrence River. Estuar. Coast. Shelf Sci. 48(3):307-324.

Hébert S & Belley J (2005) Le Saint-Laurent - La qualité des eaux du fleuve 1990-2003. Envirodoq n° ENV/2005/0095, collection n° QE/156 (Ministère de l'Environnement, Direction du suivi de l'état de l'environnement, Québec). 25 p.

Ingram RG & El-Sabh MI (1990) Fronts and mesoscale features in the St. Lawrence Estuary. Oceanography of a large-scale estuarine system: The St. Lawrence, El-Sabh MI & Silverberg N (Édit.) Springler-Verlag, New York. p 71-93.

Matte, Pascal (2014). *Modélisation hydrodynamique de l'estuaire fluvial du Saint-Laurent.* Thèse. Québec, Institut National de la Recherche Scientifique, Université du Québec, 334 p.

Matte P, Secretan Y & Morin J (2014c) Temporal and spatial variability of tidal-fluvial dynamics in the St. Lawrence fluvial estuary: An application of nonstationary tidal harmonic analysis. J. Geophys. Res. 119:5724–5744.

Ouranos. Vers l'adaptation aux changements climatiques. [En ligne]. http://adaptation.ouranos.ca/fr/adaptation/vulnerabilites-impacts/activites/eau/fleuve-st-laurent/ (page consultée le 1 février 2016)

Simons RD, Monismith SG, Saucier FJ, Johnson LE & Winkler G (2010) Modelling stratification and baroclinic flow in the estuarine transition zone of the St. Lawrence estuary. Atmos. Ocean 48(2):132-146.

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2016. Spills of Diluted Bitumen from Pipelines: A Comparative Study of Environmental Fate, Effects, and Response. Washington, DC: The National Academies Press.

Xu Z, Saucier FJ & Lefaivre D (2006) Water level variations in the Estuary and Gulf of St. Lawrence. Understanding Sea-Level Rise and Variability Workshop. (Paris, France, June 6-9, 2006).