

CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET TRANSPORT MARITIME

SUR LE SAINT-LAURENT

ÉTUDE EXPLORATOIRE D'OPTIONS D'ADAPTATION

AVERTISSEMENT

Ce document se veut une étude exploratoire face au sujet traité. Les opinions et conclusions présentées n'engagent en rien les membres du Comité de concertation navigation, les organisations partenaires, ni les entreprises impliquées dans la production du document.

Toute référence à une loi ou une réglementation n'est présentée qu'à titre informatif. Ces références ne peuvent en aucun cas être utilisées pour prendre des décisions ou des actions. En ce sens, les lectrices et les lecteurs sont appelés à se référer aux textes de lois originaux pour obtenir des informations ayant force de loi.

Pour fins de citation :

D'Arcy, P., J.-F. Bibeault, R. Raffa. 2005. Changements climatiques et transport maritime sur le Saint-Laurent. Étude exploratoire d'options d'adaptation. Réalisé pour le Comité de concertation navigation du Plan d'action Saint-Laurent. 140 p.

ÉQUIPE DE RECHERCHE

Chercheur principal et rédaction	Pierre D'Arcy – Pêches et Océans Canada, Garde côtière – Région du Québec Coordonnateur du Comité de concertation navigation
Révision	Jean-François Bibeault – Environnement Canada Rachid Raffa – Transports Québec Comité de concertation navigation – Plan d'action Saint-Laurent
Collaboration spéciale	Denis Lefavre – Pêches et Océans Canada – Institut Maurice-Lamontagne Bernard Doyon – Pêches et Océans Canada, Garde côtière¹ Yann Ropars – Consultants Ropars inc. Claude Rioux – Université du Québec à Rimouski Pierre Rouleau – Pêches et Océans Canada, Garde côtière – Région du Québec Gestion des voies navigables

¹ Anciennement de la section Hydrologie du Service météorologique du Canada, Environnement Canada.

MOT DES COPRÉSIDENTS DU COMITÉ DE CONCERTATION NAVIGATION

Le Comité de concertation navigation a déposé en 2004 une Stratégie de navigation durable pour le Saint-Laurent, laquelle vise à réduire les impacts environnementaux de ce mode de transport tout en assurant son développement sur le fleuve. Le Comité a déterminé dans un premier temps huit enjeux prioritaires auxquels est associé un plan d'action qui s'échelonne sur cinq ans (2004-2009). L'évaluation d'options d'adaptation pour la navigation commerciale relativement aux fluctuations des niveaux d'eau causées par les changements climatiques fait partie de ces enjeux.

La présente étude est une première contribution à l'atteinte de cet enjeu. Les changements climatiques sont un domaine fort complexe et étudier des moyens d'adaptation qui permettraient d'atténuer des baisses potentielles de niveaux d'eau dans le Saint-Laurent, constitue un sujet très sensible qui suscite des discussions animées. L'étude se veut ainsi une réflexion sur ce qui pourrait être fait pour se prémunir contre les effets négatifs des changements climatiques pour la navigation et non une proposition d'un moyen d'adaptation particulier.

Nous avons le plaisir de présenter cette étude exploratoire sur les changements climatiques et le transport maritime sur le Saint-Laurent. À la lumière des discussions qui ont eu lieu au Comité de concertation navigation, nous sommes bien conscients que la portée de cet enjeu déborde le seul cadre des activités de navigation. Nous espérons en conséquence que ce travail pourra susciter de nouvelles études et idées dans ce domaine et que la discussion s'élargira à un bassin plus grand d'intervenants.

Vincent Jarry
Coprésident Canada
Comité de concertation navigation
Transports Canada

Claire Poulin
Coprésidente Québec
Comité de concertation navigation
Ministère des Transports du Québec

SOMMAIRE

Ce document est le fruit d'une première réflexion sur certaines possibilités d'adaptation techniques et logistiques aux incidences des changements climatiques sur la navigation commerciale. Cette initiative découle d'un enjeu reconnu par le Comité de concertation navigation dans la Stratégie de navigation durable pour le Saint-Laurent. Cependant, il est présupposé qu'avant de chercher à faire face à une situation de bas niveaux durables sur le Saint-Laurent fluvial par des adaptations portant directement et exclusivement sur le Saint-Laurent lui-même et faisant appel à ses seules ressources ainsi qu'à celles de son milieu physique et humain, on recourra aux possibilités offertes par la gestion de l'ensemble Grands Lacs–Saint-Laurent, et particulièrement à celles offertes par le contrôle exercé au barrage Moses-Saunders. La détermination et l'analyse de ces possibilités dépassaient toutefois le cadre et les moyens de cette étude et n'en font donc pas partie. Par conséquent, on ne doit pas présumer que l'absence ou la plus ou moins grande quantité d'information sur une option constitue une prise de position à son égard.

Certains scénarios climatiques prévoient une baisse des apports d'eau dans le système Grands Lacs–Saint-Laurent. Cette baisse pourrait avoir des impacts appréciables sur certaines activités, notamment la navigation commerciale sur le Saint-Laurent. Pour cette raison, le Comité de concertation navigation a estimé judicieux, dans la perspective d'une navigation durable, d'étudier des options d'adaptation qui permettraient le maintien des activités maritimes et portuaires à leur niveau actuel. Cette étude exploratoire constitue un premier exercice en matière d'adaptation aux changements climatiques pour les activités de navigation commerciale sur le Saint-Laurent. D'autres études devront suivre pour compléter et préciser les différents scénarios analysés.

L'étude se divise en deux parties. La première partie évalue la baisse appréhendée des niveaux d'eau dans la partie fluviale du Saint-Laurent (tronçon Montréal-Québec) en matière d'amplitude et de distribution spatiale. Cette évaluation est effectuée à l'aide d'un modèle hydraulique numérique qui intègre les résultats des plus récents scénarios climatiques pour le bassin des Grands Lacs et de la rivière des Outaouais, et ceux relatifs au rehaussement du niveau des océans. Des simulations ont été effectuées en prenant

comme référence les niveaux d'eau d'une année hydrologique moyenne et ceux d'une année de faible hydraulité, desquels ont été soustraites les valeurs obtenues des projections climatiques. Dans le cas où l'hydrologie vers 2050 correspondrait à une année hydrologique moyenne, les baisses observées sur le fleuve ne nuiraient pas aux activités de navigation commerciale. En fait, la profondeur d'eau à Montréal serait pour tous les mois au-dessus du zéro des cartes marines, et ce, pour les quatre scénarios climatiques retenus. Les impacts entrevus deviennent par contre plus sévères lorsque les simulations utilisent une année de faible hydraulité comme référence. Selon le scénario climatique le plus pessimiste, CS (Chaud et Sec), les baisses pourraient atteindre 1 mètre sous le zéro des cartes à Montréal, alors qu'elles seraient d'environ 30 centimètres à Trois-Rivières. Cette situation se prolongerait sur plusieurs mois consécutifs, d'où l'appréhension des impacts. Les simulations situent la limite de l'effet des baisses des niveaux d'eau aux alentours de Bécancour. Il est à noter que ces simulations n'ont pas considéré des modalités de gestion particulières du barrage Moses-Saunders, où sont régulés les apports d'eau du lac Ontario vers le Saint-Laurent. L'ajustement de ces modalités constituera vraisemblablement la première mesure d'adaptation mise en œuvre, car la navigation commerciale fait partie des usages prioritaires désignés dans le Traité des eaux limitrophes canado-américain. La réalisation d'un scénario tel que le CS mettra sûrement cette mesure à l'épreuve sur le plan de ses capacités à fournir de l'eau. Le nouveau plan de régularisation que la Commission mixte internationale adoptera bientôt cherchera à partager les impacts entre l'amont (Grands Lacs) et l'aval (Saint-Laurent) lorsque les situations l'exigeront. Cette ouverture au partage suppose que la gestion du barrage ne pourra pas tout régler et que des mesures d'adaptation devront être prises tant en amont qu'en aval si les scénarios de changements climatiques critiques se réalisaient.

Il est très difficile de prédire la récurrence d'un évènement hydrologique de cette ampleur, car la probabilité que les conditions climatiques à venir reproduisent celles du passé est faible. Toutefois, il est certain qu'une succession d'années où les niveaux d'eau seraient sous le zéro des cartes aurait davantage d'impacts que si cet évènement se produisait en alternance, à savoir en suivant les fluctuations d'un cycle hydrologique normal. Les incertitudes liées aux prévisions climatiques, notamment à l'amplitude et à

la direction des événements à venir, incitent à la prudence dans l'interprétation des projections. Le rôle joué par un grand nombre d'éléments demeure encore à préciser. Ainsi, les simulations hydrologiques effectuées et leurs impacts sur les niveaux d'eau doivent être compris dans la perspective que les événements climatiques anticipés se réaliseraient tel qu'on peut le prévoir actuellement, ce qui, bien entendu, restera à valider. Ces projections ont servi particulièrement pour explorer différentes stratégies d'adaptation qui atténueraient les impacts des baisses de niveaux d'eau appréhendées.

C'est le sujet de la deuxième partie de l'étude, où quelques options d'adaptation pour la navigation commerciale sont explorées par rapport aux gains potentiels qu'elles permettraient en hauteur d'eau. Les options se divisent en deux catégories : la première exclut toute modification physique du fleuve, alors que l'autre inclut des travaux d'aménagement. Elles sont analysées au regard des exigences du développement durable, c'est-à-dire en considérant certaines de leurs incidences économiques, environnementales et sociales. Trois classes de fluctuations des niveaux d'eau ont été établies, auxquelles sont associées un groupe d'options :

- 1- Fluctuations faibles (0-15 cm) : évaluation des gains potentiels en niveau d'eau obtenus par l'amélioration de la précision des outils *techniques et technologiques*.
- 2- Fluctuations moyennes (15-50 cm) : évaluation des gains potentiels obtenus par des travaux *d'aménagement fluvial* (dragage et ouvrages hydrauliques).
- 3- Fluctuations fortes (50 cm et plus) : évaluation des gains potentiels obtenus à partir d'une *adaptation structurale* (configuration des navires ajustée aux conditions du Saint-Laurent) et *organisationnelle* (réorganisation des activités portuaires).

L'analyse des gains potentiels en hauteur d'eau que permettraient les options technologiques (réseau SINECO) et techniques (équation du squat) révèle que les résultats seraient limités. En ce qui concerne le réseau SINECO, il ne prédit pas avec assez d'exactitude les niveaux d'eau fluviaux. L'écart actuel entre les valeurs prédites et observées dépasse, après seulement quatre jours, la marge de manœuvre sécuritaire que les transporteurs se gardent pour les chargements outre-mer. Une réduction de cette

marge se traduirait par un gain en hauteur d'eau qui varierait entre 20 et 30 centimètres. Des avancées substantielles sur le plan des prévisions météorologiques sont donc indispensables pour que cette option puisse faire partie des stratégies d'adaptation. En ce qui a trait à l'équation du squat, des études sont en cours sur le Saint-Laurent pour vérifier si l'équation actuellement utilisée est optimale pour tous les types de navires. À la lumière des expériences qui sont faites sur d'autres voies navigables, il ressort que, dans certains cas, l'utilisation d'une équation de remplacement permet de gagner quelques centimètres supplémentaires. Par contre, ces nouvelles équations donnent occasionnellement des valeurs inférieures à celles mesurées, allant même parfois en dessous des normes de dégagement sous quille. Il faudra donc attendre les résultats de l'étude conduite sur le Saint-Laurent pour voir si des gains sont possibles sur ce plan.

Les résultats de l'analyse de l'option des travaux d'aménagement fluvial permettent d'estimer que les baisses de niveaux d'eau pourraient être compensées à l'aide d'une intervention de cette nature. Dans le cas du dragage, un calcul préliminaire des volumes de sédiments à prélever a été effectué en fonction des baisses prévues par les scénarios climatiques CS (le plus pessimiste) et PCS (scénario intermédiaire). Les volumes de sédiments ont été estimés à 1,6 million et à 930 000 mètres cubes respectivement. Des coûts approximatifs de 70 millions de dollars (CS) et de 42 millions de dollars (PCS) ont été estimés, sans considérer toutefois le coût des études d'impacts environnementaux, des mesures de compensation environnementale et des effets résiduels. Un aperçu très sommaire de certains impacts environnementaux est présenté; celui-ci devrait être complété et les impacts, quantifiés, si cette option était retenue. Si les coûts de l'option du dragage sont relativement bas, l'efficacité du dragage est également relative, car l'approfondissement du chenal ne permet pas de retenir l'eau.

Quelques simulations numériques ont été effectuées sur différents types d'ouvrages hydrauliques, digues et barrage, situés entre Montréal et Trois-Rivières. Ces simulations ont été menées à partir d'un scénario de référence dans lequel le débit du fleuve était réduit à 5 000 mètres cubes par seconde à Sorel. Ce débit occasionne une baisse des niveaux d'eau d'un peu plus de 1 mètre à Montréal, ce qui correspond aux résultats du

scénario climatique CS. Les résultats obtenus avec les digues transversales montrent un rehaussement potentiel du plan d'eau de 90 centimètres à Montréal lorsque les simulations sont faites sur une série de trois digues disposées à quelques kilomètres de distance. Ces digues ont toutefois été localisées relativement près de Montréal, soit entre Lanoraie et Verchères. Même si le rehaussement est significatif, il demeure inférieur d'une vingtaine de centimètres au zéro des cartes. De plus, un problème observé avec ce type d'ouvrage serait la formation d'un appel d'eau à la sortie des digues qui produirait un abaissement des niveaux d'eau d'une vingtaine de centimètres sur quelques dizaines de kilomètres. Le design des structures pourrait corriger cet effet. Des simulations ont été faites sur le même type de digues, mais situées cette fois en amont de Trois-Rivières. Le gain enregistré serait de 35 centimètres à Montréal et pourrait être considéré comme important si l'on considère qu'une distance de 120 kilomètres sépare les ouvrages de Montréal. D'autres simulations ont aussi été faites avec des digues longitudinales d'une longueur de 7 kilomètres, couplées à des digues transversales situées dans le secteur de Verchères. Le rehaussement observé du plan d'eau serait de 1,6 mètre à Montréal, et les niveaux se retrouveraient à près de 50 centimètres au-dessus du zéro des cartes. La sortie de l'ouvrage, en forme de diffuseur, semblerait résoudre le problème d'appel d'eau. Une dernière simulation a été effectuée avec un barrage avec écluse situé en amont de Trois-Rivières. Cette structure rehausse le plan d'eau à Montréal de près de 2 mètres (1 mètre au-dessus du zéro des cartes). Ce fort rehaussement indiquerait que la cote du seuil franchissable du barrage devrait être ajustée à la baisse pour limiter les effets négatifs. Quoique intéressante sur le plan hydraulique puisqu'elle permettrait de reconquérir toute la superficie du plan d'eau perdue à cause des changements climatiques, cette option comporterait plusieurs désavantages environnementaux, puisqu'elle constituerait un obstacle à la migration des espèces et qu'elle modifierait le transport des sédiments, pour n'en nommer que deux. Dans le cas où on noterait un intérêt marqué en sens, des études sur la conception de ces ouvrages devraient être faites pour prendre en compte les conséquences sur l'environnement et en atténuer les impacts. Un aperçu général des impacts environnementaux liés à l'érection des ouvrages hydrauliques est présenté à la section 2.3.6. Les coûts approximatifs de ces ouvrages varient entre 50 millions et un peu

plus de 500 millions de dollars, sans considérer les frais relatifs aux mesures de compensation environnementale, à l'entretien et à l'exploitation.

L'option d'adaptation structurale analysée se rapporte à la configuration des navires. Cette option aurait pour objectif d'adapter la structure des navires aux conditions hydrauliques du Saint-Laurent en réduisant le tirant d'eau de ceux-ci. La dernière génération de navires dessinée pour le Saint-Laurent a suivi ce concept en allongeant la coque à 294 mètres, pour un tirant d'eau de 10,78 mètres, tout en maintenant une largeur de 32,2 mètres. Certaines limites semblent avoir été atteintes avec cette configuration tant sur le plan des pressions exercées sur la coque que sur celui de la manœuvrabilité des navires dans les courbes du fleuve. Il faudrait donc étudier la possibilité d'élargir les navires tout en réduisant leur tirant d'eau. Cet aspect implique plusieurs contraintes, comme la révision des normes de design du chenal de navigation – lequel a été conçu en fonction d'un navire-type d'une largeur de 32,2 mètres – et les coûts relatifs à la construction d'un porte-conteneurs, lesquels sont actuellement de l'ordre de 60 millions de dollars américains. À première vue, cette option exigerait qu'une flotte de navires soit spécialement réservée au Saint-Laurent ou à des cours d'eau n'ayant pas d'ouvrages qui limiteraient le passage des navires en largeur. Or, dans un contexte d'échanges économiques croissants où le maritime sera de plus en plus mis à contribution pour le transport de marchandises outre-mer, la flexibilité d'une flotte, c'est-à-dire sa capacité à naviguer sur plusieurs cours d'eau sans contraintes, apparaîtrait probablement comme un critère décisionnel important pour les armateurs.

L'option de la réorganisation des activités portuaires a été analysée en considérant les coûts directs d'un transfert partiel des activités du port de Montréal vers un autre port du Saint-Laurent qui serait moins affecté par les baisses de niveaux d'eau. L'exercice conduit à la section 2.5 visait donc à obtenir un aperçu général des coûts directs qui seraient engendrés de même que des impacts associés à cette option.

Les scénarios analysés incluent un transfert partiel des marchandises, à savoir certains vrac et conteneurs, vers Québec, Trois-Rivières, Bécancour ou une combinaison de ces

ports. Le rôle économique du port de Montréal est dans un premier temps présenté de façon à bien faire comprendre les différents enjeux. Par la suite, une caractérisation de chaque port est effectuée, et les estimations des coûts directs sont faites pour un scénario de 400 000 conteneurs. Les coûts estimés varient entre 230 et 260 millions de dollars et n'impliquent que des éléments du type construction de quais, acquisition de terrains, d'entrepôts, etc. L'ajout des coûts indirects tels que la construction de voies ferrées, de routes et d'autoroutes pour assurer l'efficacité du transport intermodal ferait monter rapidement les estimations. Les coûts de construction d'une voie ferrée sont de l'ordre de 492 000 \$ par kilomètre, alors que ceux d'une route simple et d'une autoroute sont de 1,5 et de 7 millions de dollars par kilomètre respectivement. Ces estimations n'incluent pas les coûts pour les études environnementales. En considérant ces facteurs indirects et un transfert total des activités (environ 1,2 million de conteneurs), le coût d'une réorganisation portuaire atteindrait facilement le milliard de dollars. Les impacts environnementaux et sociaux d'une telle opération seraient par ailleurs non négligeables. En conservant le même ratio qui a cours actuellement à Montréal pour l'acheminement des marchandises à destination, à savoir 60 % par train et 40 % par camion, c'est 450 camions supplémentaires qui se retrouveraient sur les routes du port d'accueil dans le scénario de transfert partiel. Une pression substantielle serait donc exercée sur le réseau routier local et régional, sans compter les désagréments pour les citoyens (congestion, bruit, pollution, détérioration des routes, etc.). Une augmentation des émissions de gaz à effet de serre serait aussi à prévoir du fait que le transport maritime a un meilleur rendement énergétique que les autres modes de transport et émet moins de gaz à effet de serre par tonne-kilomètre de marchandises transportées. Un dernier point à souligner relativement à la réorganisation des activités portuaires a trait à l'intérêt qu'auront les transporteurs à transférer leurs activités d'un endroit à l'autre. Le port de Montréal a développé avec le temps des liens multimodaux qui en font une plaque tournante dans l'est de l'Amérique du Nord. Les principaux compétiteurs du port se situent non sur le Saint-Laurent mais sur la côte est américaine. Un des défis de cette option serait fort probablement de trouver des motivations économiques suffisantes pour inciter les transporteurs à favoriser un autre port du Saint-Laurent plutôt que de transférer leurs activités vers un port de la côte est américaine.

Dans l'option de la réorganisation portuaire, le cabotage pourrait constituer une solution de rechange qui maintiendrait le transport par voie d'eau. Il faudrait regarder plus en détail comment il serait possible d'utiliser des navires à plus faible tirant d'eau pour transporter les marchandises d'un port en eaux profondes vers soit Montréal, soit une ville située dans la région des Grands Lacs. Cette option serait plus avantageuse sur les plans environnemental et social que d'utiliser les camions et les trains. Il faudrait également envisager un réaménagement portuaire pour l'entreposage des conteneurs et acquérir des équipements de manutention. Ces investissements, de même que ceux liés aux activités (augmentation du nombre de transbordements, acquisition de navires spécialisés et d'infrastructures pour la manutention des conteneurs, augmentation du risque de déversements accidentels, etc.), devraient être équitablement amortis pour que l'attrait de cette option soit renforcé. Le principal avantage du cabotage est qu'il pourrait faire partie d'une planification à long terme des autorités gouvernementales et portuaires. Cette planification serait susceptible de réduire les impacts économiques sur les administrations et villes portuaires les plus touchées. Enfin, il faut signaler que le cabotage, même s'il apparaît potentiellement favorable à la navigation commerciale, ne résoudrait pas le problème d'abaissement du niveau d'eau pour les autres usages du Saint-Laurent.

Ainsi, de manière exploratoire et avec comme objectif d'amorcer une réflexion sur les mesures d'adaptation aux changements climatiques, quelques options d'adaptation ont été étudiées, et, dans la mesure du possible, leur incidence économique, environnementale et sociale a été considérée. Cette recherche a permis de déceler certaines limites et possibilités propres à chaque option et d'illustrer à quel point il est complexe de les analyser en fonction des critères du développement durable. Des études supplémentaires seraient toutefois nécessaires pour être en mesure de bien déterminer celles qui s'inscrivent dans cette perspective et pour en découvrir de nouvelles. Plusieurs initiatives voient le jour tant au Canada qu'à l'étranger pour que les adaptations aux changements climatiques soient dès maintenant prises en considération. Les impacts des changements climatiques débordent le cadre des seules activités de navigation, et le Comité de concertation navigation est d'avis qu'une réflexion sur la vocation future du Saint-

Laurent dans la perspective du développement durable et d'une gestion plus intégrée devrait être amorcée au cours des prochaines années.

Table des matières

LISTE DES FIGURES	XVI
LISTE DES TABLEAUX.....	XIX
REMERCIEMENTS	XX
AVIS	XXI
AVANT-PROPOS.....	XXII
INTRODUCTION	1
PARTIE I - INTÉGRATION DES SCÉNARIOS CLIMATIQUES ET DU REHAUSSEMENT DU NIVEAU DES OCÉANS À UN MODÈLE HYDRAULIQUE DU SAINT-LAURENT FLUVIAL.....	7
1.1 CONTEXTE	8
1.2 MÉTHODOLOGIE	9
1.2.1 <i>Projection relative aux conditions atmosphériques pour les années 2050 – Modèles atmosphériques globaux.....</i>	<i>9</i>
1.2.2 <i>Projection relative aux apports hydrologiques totaux des bassins versants des Grands Lacs et du Saint-Laurent.....</i>	<i>10</i>
1.2.3 <i>Niveau moyen des océans.....</i>	<i>11</i>
1.2.4 <i>Modélisation des niveaux d'eau du Saint-Laurent.....</i>	<i>13</i>
1.2.5 <i>Résultats de l'intégration des scénarios de changements climatiques et de rehaussement du niveau marin au modèle hydraulique.....</i>	<i>14</i>
PARTIE II - STRATÉGIES D'ADAPTATION	22
2.1 CONTEXTE	23
2.2 OPTIONS TECHNOLOGIQUES ET TECHNIQUES.....	23
2.2.1 <i>SINECO.....</i>	<i>23</i>
2.2.2 <i>Squat.....</i>	<i>26</i>
2.3 ADAPTATION DU MILIEU PHYSIQUE	28
2.3.1 <i>Dragage</i>	<i>29</i>
2.3.1.1 <i>Méthodologie et résultats.....</i>	<i>29</i>
2.3.1.2 <i>Aspects environnementaux et sociaux</i>	<i>33</i>
2.3.2 OUVRAGES DE RÉGULARISATION	35
2.3.2.1 <i>Revue de littérature préliminaire sur les projets d'aménagement fluvial... 35</i>	<i>35</i>
2.3.2.2 <i>Sélection des ouvrages de régularisation pour le Saint-Laurent..... 38</i>	<i>38</i>
2.3.2.3 <i>Géométrie des ouvrages et emplacement</i>	<i>42</i>
2.3.2.4 <i>Modélisation hydraulique - méthodologie</i>	<i>46</i>
2.3.2.5 <i>Modélisation hydraulique – résultats.....</i>	<i>52</i>
2.3.2.6 <i>Modélisation hydraulique – impacts</i>	<i>66</i>
2.4 MODIFICATION DE LA CONFIGURATION DES NAVIRES	77
2.5 RÉORGANISATION DES ACTIVITÉS PORTUAIRES	82
3 DISCUSSION.....	105

CONCLUSION	113
BIBLIOGRAPHIE.....	116
ANNEXE 1 - CARTOGRAPHIE DES SECTEURS OÙ UN DRAGAGE SERAIT NÉCESSAIRE	122
ANNEXE 2 - ÉTAPES DE CONCEPTION ET D'IMPLANTATION DES OUVRAGES HYDRAULIQUES DANS LE MODÈLE HYDRODYNAMIQUE.....	127
ANNEXE 3 - CARACTÉRISTIQUES DES OUVRAGES HYDRAULIQUES.....	131
ANNEXE 4 - VENTILATION DES COÛTS DES OUVRAGES HYDRAULIQUES.....	134

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 – PRÉSENTATION SCHÉMATIQUE DES OPTIONS D’ADAPTATION ANALYSÉES.....	5
FIGURE 2 - CARTE DU SAINT-LAURENT FLUVIAL ET MARIN AINSI QUE DES VOIES NAVIGABLES ET MARITIMES	8
FIGURE 3 – ÉVOLUTION DU NIVEAU MOYEN DES OCÉANS CAUSÉE PAR LE RÉCHAUFFEMENT GLOBAL AU COURS DU DERNIER SIÈCLE ET PROJECTIONS POUR LA PÉRIODE 2000-2100	12
FIGURE 4 – EFFET DE L’AUGMENTATION DU NIVEAU DES OCÉANS DANS LA PARTIE FLUVIALE DU SAINT-LAURENT	13
FIGURE 5 – COMPARAISON DES DÉBITS MENSUELS MOYENS DE L’ANNÉE 1969 À CORNWALL ET POUR LA RIVIÈRE DES OUTAOUAIS.....	14
FIGURE 6 –NIVEAU D’EAU MENSUEL PRÉVISIBLE À MONTRÉAL (JETÉE #1) PAR RAPPORT À L’ANNÉE DE RÉFÉRENCE 1969, ET SELON LES QUATRE SCÉNARIOS CLIMATIQUES	16
FIGURE 7 – NIVEAU D’EAU MENSUEL PRÉVISIBLE À TROIS-RIVIÈRES PAR RAPPORT À L’ANNÉE DE RÉFÉRENCE 1969, ET SELON LES QUATRE SCÉNARIOS CLIMATIQUES	16
FIGURE 8 – NIVEAU D’EAU MENSUEL PRÉVISIBLE À MONTRÉAL (JETÉE #1) PAR RAPPORT UNE ANNÉE DE BAS NIVEAUX (2001), SELON LES QUATRE SCÉNARIOS CLIMATIQUES	18
FIGURE 9 – NIVEAU D’EAU MENSUEL PRÉVISIBLE À TROIS-RIVIÈRES PAR RAPPORT À UNE ANNÉE DE BAS NIVEAUX (2001), SELON LES QUATRE SCÉNARIOS CLIMATIQUES	18
FIGURE 10 – NIVEAU D’EAU MENSUEL PRÉVISIBLE À BÉCANCOUR PAR RAPPORT À UNE ANNÉE DE BAS NIVEAUX (2001), SELON LES QUATRE SCÉNARIOS CLIMATIQUES	20
FIGURE 11 – VARIATIONS MENSUELLES DES NIVEAUX D’EAU À MONTRÉAL (JETÉE #1) POUR LA PÉRIODE 1913-2003	21
FIGURE 12 – PRÉCISION DES PRÉVISIONS DES NIVEAUX D’EAU DANS UN INTERVALLE DE CONFIANCE DE 95% POUR QUELQUES STATIONS ENTRE MONTRÉAL ET QUÉBEC	25
FIGURE 13 – ILLUSTRATION DES ÉLÉMENTS DU DÉGAGEMENT SOUS QUILLE.....	26
FIGURE 14 – ENFONCEMENT DES NAVIRES (SQUAT) EN FONCTION DE LA VITESSE.....	27
FIGURE 15 – FONCTIONNEMENT DU BARRAGE GONFLABLE.....	36
FIGURE 16– DIFFÉRENTS TYPES DE PLANTES AQUATIQUES ARTIFICIELLES UTILISÉES POUR REHAUSSER LES PLANS D’EAU, PRÉVENIR L’ÉROSION DES BERGES OU RÉDUIRE LA SÉDIMENTATION.....	37
FIGURE 17 – DIGUES TRANSVERSALES (EN NOIR) SUR LES RIVES DE LA PARTIE SUPÉRIEURE DU MISSISSIPPI.....	39
FIGURE 18 – COUPE LONGITUDINALE D’UNE SÉRIE DE DIGUES À 250 M (EN HAUT) ET À 120 M (EN BAS) D’OUVERTURE.....	42
FIGURE 19 – COUPE TRANSVERSALE DES PARTIES NON FRANCHISSABLES DES DIGUES	42
FIGURE 20 – COUPE TRANSVERSALE DES PARTIES FRANCHISSABLES DES DIGUES	43
FIGURE 21 – COUPE LONGITUDINALE DU BARRAGE AVEC ÉCLUSE	44
FIGURE 22 –EMPLACEMENT DES OUVRAGES HYDRAULIQUES	45

FIGURE 23 – REPRÉSENTATION À PLUS GRANDE ÉCHELLE DE LA DIGUE #8 LONGITUDINALE (À GAUCHE) ET DU BARRAGE AVEC ÉCLUSE (À DROITE)	45
FIGURE 24 – MAILLAGE DE SIMULATION COUVRANT LE TERRITOIRE D'ÉTUDE	47
FIGURE 25 – MODÈLE NUMÉRIQUE D'ÉLÉVATION DU TERRITOIRE D'ÉTUDE.....	49
FIGURE 26 – CARTE DE LA RUGOSITÉ HYDRAULIQUE (COEFFICIENT DE FROTTEMENT) DU TERRITOIRE D'ÉTUDE	50
FIGURE 27 – PROFILS DE LA PENTE D'EAU MESURÉE ET DE CELLE OBTENUE PAR SIMULATION POUR L'ÉVÈNEMENT HYDRAULIQUE DU PRINTEMPS 1996 UTILISÉ POUR LE CALIBRAGE	51
FIGURE 28 – PROFILS DE LA PENTE D'EAU MESURÉE ET DE CELLE OBTENUE PAR SIMULATION POUR L'ÉVÈNEMENT HYDRAULIQUE DU PRINTEMPS 1999 UTILISÉ POUR LE CALIBRAGE	51
FIGURE 29 – NIVEAUX D'EAU OBTENUS PAR SIMULATION ENTRE MONTRÉAL ET TROIS-RIVIÈRES SELON LE SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE DE 5 000 M ³ /S À SOREL.....	52
FIGURE 30 – COMPARAISON DES NIVEAUX D'EAU OBTENUS SELON LE SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE AVEC UN DÉBIT DE 5 000 M ³ /S À SOREL (À GAUCHE) AVEC CEUX OBTENUS AVEC UN DÉBIT MOYEN DE 9 500 M ³ /S.....	54
FIGURE 31 – NIVEAUX D'EAU OBTENUS ENTRE MONTRÉAL ET TROIS-RIVIÈRES SELON LE SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE DE 5 000 M ³ /S À SOREL AVEC L'OUVRAGE #8 À UNE OUVERTURE DE 250 M.....	55
FIGURE 32 – NIVEAUX D'EAU OBTENUS ENTRE MONTRÉAL ET TROIS-RIVIÈRES SELON LE SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE DE 5 000 M ³ /S À SOREL AVEC L'OUVRAGE #8 À UNE OUVERTURE DE 120 M.....	56
FIGURE 33 – NIVEAUX D'EAU OBTENUS ENTRE MONTRÉAL ET TROIS-RIVIÈRES SELON LE SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE DE 5 000 M ³ /S À SOREL AVEC LES OUVRAGES #7, 8 ET 9 À UNE OUVERTURE DE 120 M.....	57
FIGURE 34 – DIFFÉRENCE EN HAUTEUR D'EAU OBTENUE AVEC LES OUVRAGES SUCCESSIFS #7, 8 ET 9 À 120 M ET AVEC L'OUVRAGE #8 À 120 M.....	58
FIGURE 35 – NIVEAUX D'EAU OBTENUS ENTRE MONTRÉAL ET TROIS-RIVIÈRES SELON LE SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE DE 5 000 M ³ /S À SOREL AVEC LES OUVRAGES #1A ET 1B À UNE OUVERTURE DE 120 M.....	59
FIGURE 36 – NIVEAUX D'EAU OBTENUS ENTRE MONTRÉAL ET TROIS-RIVIÈRES SELON LE SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE DE 5 000 M ³ /S À SOREL AVEC L'OUVRAGE #8, VERSION DIGUES LONGITUDINALES.....	61
FIGURE 37 – DIFFÉRENCE EN HAUTEUR D'EAU OBTENUE AVEC L'OUVRAGE #8, VERSION DIGUES LONGITUDINALES, À 120 M.....	62
FIGURE 38 – NIVEAUX D'EAU OBTENUS ENTRE MONTRÉAL ET TROIS-RIVIÈRES SELON LE SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE DE 5 000 M ³ /S À SOREL AVEC LE BARRAGE AVEC ÉCLUSE..	63
FIGURE 39 – COMPARAISON DES NIVEAUX D'EAU OBTENUS AVEC LE SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE, À UN DÉBIT DE 5 000 M ³ /S À SOREL (À GAUCHE), AVEC LES NIVEAUX D'EAU OBTENUS LORS DE LA SIMULATION AVEC LE BARRAGE, AU MÊME DÉBIT (À DROITE).....	64
FIGURE 40 – DIFFÉRENCE EN HAUTEUR D'EAU OBTENUE AVEC LE BARRAGE	65
FIGURE 41 – IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX ANTICIPÉS ET NON ANTICIPÉS POUR UN ÉCHANTILLON DE 87 PROJETS.....	71

FIGURE 42 – VITESSES OBTENUES POUR UN DÉBIT DE 5 000 M ³ /S À SOREL AU SORTIR DE L’OUVRAGE #8 LONGITUDINAL AVEC UNE OUVERTURE DE 120 M	75
FIGURE 43 – EMBLACEMENT DES DIGUES #7	76
FIGURE 44 - VITESSES OBTENUES POUR UN DÉBIT DE 5 000 M ³ /S À SOREL AU SORTIR DE L’OUVRAGE #7 AVEC UNE OUVERTURE DE 120 M.....	77
FIGURE 45 – COMPOSANTES DE LA LARGEUR D’UN CHENAL	80
FIGURE 46 – CONCEPTION DU CHENAL DE NAVIGATION DU SAINT-LAURENT	81
FIGURE 47 – TONNAGE MANUTENTIONNÉ AUX PORTS DE MONTRÉAL, DE QUÉBEC ET DE TROIS-RIVIÈRES PENDANT LA PÉRIODE 1993-2004	86

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 – VARIATIONS DU POURCENTAGE DES APPORTS TOTAUX D’EAU POUR LE BASSIN DES GRANDS LACS ET DE LA RIVIÈRE DES OUTAOUAIS SELON LES QUATRE SCÉNARIOS CLIMATIQUES.	11
TABLEAU 2 – VALEURS DES BAISSSES DE NIVEAUX D’EAU UTILISÉES POUR ESTIMER LES VOLUMES ET LA SUPERFICIE DE SÉDIMENTS À DRAGUER.....	30
TABLEAU 3 - ESTIMATION DES VOLUMES ET SUPERFICIES À DRAGUER DANS LA VOIE NAVIGABLE SELON LES SCÉNARIOS CLIMATIQUES CS ET PCS EN RÉFÉRENCE À L’ANNÉE 2001 ET COÛTS APPROXIMATIFS..	31
TABLEAU 4 – ESTIMATION DES COÛTS POUR LES OUVRAGES HYDRAULIQUES.	66
TABLEAU 5 – NOMBRE D’EMPLOIS, CHIFFRE D’AFFAIRES ET VALEURS DES ACTIFS AUX PORTS DE MONTRÉAL, DE QUÉBEC ET DE TROIS-RIVIÈRES.....	85
TABLEAU 6 – SYNTHÈSE DE QUELQUES CARACTÉRISTIQUES STRUCTURANTES DES PORTS DE MONTRÉAL, DE TROIS-RIVIÈRES ET DE QUÉBEC BASÉES SUR L’ANNÉE 2003..	87
TABLEAU 7 – CONTENEURS MANUTENTIONNÉS EN 2004 DANS LES PRINCIPAUX PORTS DE LA CÔTE ATLANTIQUE.	89
TABLEAU 8 – MARCHANDISES CONTENEURISÉES MANUTENTIONNÉES DANS LES PORTS DE L’AMÉRIQUE DU NORD EN 2001 PAR RÉGION D’ORIGINE ET DE DESTINATION.....	90
TABLEAU 9 – DESCRIPTION DES SCÉNARIOS DE RÉAMÉNAGEMENT PORTUAIRE.....	93
TABLEAU 10 – SYNTHÈSE DES COÛTS UNITAIRES DIRECTS POUR CHACUN DES PORTS.	96
TABLEAU 11 – SYNTHÈSE DES ESTIMATIONS DES COÛTS DIRECTS (M\$) POUR UN TRANSFERT PARTIEL DU TRAFIC DE MONTRÉAL VERS UN AUTRE PORT DU SAINT-LAURENT FLUVIAL. SCÉNARIOS IMPLIQUANT 400 000 EVP.....	97
TABLEAU 12 – COMPARAISON DES SCÉNARIOS SUR LA BASE D’ÉLÉMENTS ÉCONOMIQUES, SOCIAUX ET ENVIRONNEMENTAUX.	102
TABLEAU 13 – ÉVALUATION QUALITATIVE DE L’IMPACT DE CERTAINES VARIABLES DU RÉAMÉNAGEMENT PORTUAIRE.....	104
TABLEAU 14 – SYNTHÈSE DES RÉSULTATS.	106

Remerciements

Ce projet a été réalisé grâce à la collaboration financière du programme Fonds d'action sur les changements climatiques de Ressources naturelles Canada et du Consortium Ouranos. Plusieurs partenaires ont apporté leur contribution par le partage de données, notamment Pêches et Océans Canada, région du Québec (Garde côtière et Institut Maurice-Lamontagne incluant le Service hydrographique du Canada), Environnement Canada, Transports Québec et des transporteurs maritimes. Un remerciement particulier va au Comité de concertation navigation, qui est à l'origine de la réalisation de ce projet.

AVIS

Ce document est le fruit d'une première réflexion sur certaines possibilités d'adaptation techniques et logistiques aux incidences des changements climatiques sur la navigation commerciale. Cette initiative découle d'un enjeu reconnu par le Comité de concertation navigation dans la Stratégie de navigation durable pour le Saint-Laurent (D'Arcy, Bibeault et CCN, 2004). La réponse à cet enjeu vise la :

documentation des options d'adaptation pour le Saint-Laurent, acceptables sur les plans économique et environnemental.

Particulièrement, il s'agit de considérer :

des scénarios d'adaptation qui excluent une modification physique du fleuve et d'autres qui l'incluent, afin d'assurer le transport des marchandises.

Le rapport analyse uniquement les options techniques et les aménagements physiques qui permettraient de maintenir le transport maritime sur le Saint-Laurent en cas de bas niveaux d'eau persistants. Les options tiennent compte de manière très partielle des aspects commerciaux, des enjeux économiques régionaux, de l'intégrité environnementale et de l'acceptabilité sociale.

Compte tenu de la nature exploratoire de cette étude, les résultats comportent plusieurs limites d'ordre méthodologique, liées notamment aux incertitudes quant au climat et à ses effets sur les niveaux d'eau du Saint-Laurent. De plus, les ressources financières dont nous disposons n'ont pas permis de considérer un plus grand nombre d'options ni d'examiner exhaustivement les conséquences environnementales et socio-économiques de celles étudiées. Un travail de comparaison sur une base homogène serait éventuellement requis avant de juger des orientations ou des recommandations du Comité de concertation navigation (et de l'ensemble de ses membres). Enfin, les impacts appréhendés des changements climatiques débordent le cadre des seules activités de navigation. À cet égard, le Comité de concertation navigation suggère que soit amorcée dès à présent une réflexion sur la vocation future du Saint-Laurent. Cette réflexion, pour être fructueuse, devrait s'appuyer sur les principes du développement durable et d'une gestion intégrée du Saint-Laurent. Cette réflexion supplémentaire serait nécessaire pour qu'on dispose d'un aperçu plus précis de la situation.

Avant-propos

Ce projet découle d'une volonté de mieux explorer différentes options d'adaptation pour le Saint-Laurent fluvial (tronçon Montréal-Québec) relativement aux changements climatiques appréhendés, et ce, dans une perspective de navigation durable. Plusieurs des options analysées ici émanent d'une table ronde tenue au printemps 2002 qui regroupait des intervenants du secteur de la navigation commerciale et de plaisance, des gouvernements et des représentants de la société civile. Cette table ronde avait pour but la validation et la bonification du cadre d'orientation et des enjeux d'une stratégie de navigation durable pour le Saint-Laurent (D'Arcy, Bibeault et CCN, 2004).

Il est présupposé dans cette étude qu'avant de chercher à faire face à une situation de bas niveaux d'eau durables sur le Saint-Laurent fluvial par des adaptations portant directement et exclusivement sur le Saint-Laurent lui-même et faisant appel à ses seules ressources ainsi qu'à celles de son milieu physique et humain, on recourra aux possibilités offertes par la gestion de l'ensemble Grands Lacs-Saint-Laurent, et particulièrement à celles offertes par le contrôle exercé au barrage Moses-Saunders. Toutefois, la détermination et l'analyse de ces possibilités dépassaient le cadre et les moyens de cette étude et n'en font donc pas partie. On ne doit par conséquent pas présumer que l'absence ou la plus ou moins grande quantité d'information sur une option constitue une prise de position à son égard.

Les épisodes de bas niveaux d'eau sont un phénomène hydrologique normal. Le Saint-Laurent en a connu au cours des années trente, soixante et quatre-vingt-dix, ce qui laisse supposer un cycle hydrologique récurrent de 30 ans. Cependant, l'augmentation de la fréquence des épisodes de bas niveaux à partir des années quatre-vingt-dix, combinée à l'importance de certains épisodes (1999 et 2001) et à la possibilité d'un accroissement de leur récurrence avec les changements climatiques, ont interpellé le Comité de concertation navigation et l'ont amené à retenir cette problématique dans la Stratégie de navigation durable. Le présent projet vise à étudier cette problématique et constitue, ce faisant, une première exploration en ce qui concerne la navigation commerciale.

Les impacts et inconvénients des bas niveaux d'eau pour les activités de transport maritime et de plaisance, ainsi que pour l'approvisionnement en eau, la qualité de vie des riverains et l'environnement sont connus et ont été bien décrits par les récentes recherches du Groupe d'étude international sur le lac Ontario et le fleuve Saint-Laurent de la Commission mixte internationale (<http://www.losl.org>, consulté en mai 2005). La pêche en eau douce y a également été abordée, puisqu'il était question de l'impact des niveaux d'eau sur l'habitat de certaines espèces clés.

Un aspect moins bien connu cependant est les différentes options d'adaptation qui permettraient d'atténuer ces impacts. À ce sujet, soulignons d'entrée de jeu qu'avant de pouvoir être adoptée ou promue de quelque façon, toute adaptation devra se révéler susceptible de satisfaire équitablement les besoins et les intérêts de l'ensemble des usages du Saint-Laurent et de son eau. Cette obligation vaudra pour toute adaptation, quelle qu'elle soit et quelque intérêt qu'elle présente pour un usage particulier. La présente étude se limite à inventorier et à analyser quelques adaptations pouvant aider le transport maritime en cas de bas niveaux durables sur le Saint-Laurent. Vu ses limites, il n'était pas possible d'y analyser les impacts que leur adoption aurait sur les autres usages. L'obligation de le faire n'en demeure pas moins.

Cela étant dit, dans un contexte de navigation durable où l'objectif de réduire les impacts environnementaux des activités de navigation tout en maintenant le potentiel de développement de l'activité, l'étude de différentes options d'adaptation constitue néanmoins le premier jalon d'une réflexion qui prend comme appui les fondements du développement durable. La table ronde de 2002 a permis la détermination de différentes options telles que les ouvrages hydrauliques, le dragage, la réorganisation portuaire, la reconfiguration des navires, etc. Pour synthétiser, on peut diviser ces différentes options en deux catégories :

- 1- Adapter les activités de navigation aux conditions environnementales et hydrauliques du Saint-Laurent et exclure de ce fait toute modification physique du fleuve.

- 2- Envisager la possibilité de l'aménagement fluvial pour maintenir le transport maritime à tout le moins à son niveau actuel.

Les discussions qui ont eu lieu au Comité de concertation navigation ont également permis de mettre en lumière l'absence d'une documentation technique et scientifique sur différentes options d'adaptation, et ce, particulièrement au regard de leur pertinence technique, de leur efficacité économique et de leurs impacts environnementaux. L'étude ne pourra pallier que partiellement cette déficience en données et en connaissances sur les options d'adaptation, car l'ampleur du sujet nécessite évidemment d'autres recherches. Toutefois, ce sera une première contribution à un exercice de réflexion qui essaiera d'évaluer les options non seulement en fonction d'intérêts particuliers, mais à la lumière des préceptes du développement durable, lequel intègre à la fois les intérêts économiques et environnementaux et l'acceptabilité sociale.

Il faut d'ailleurs poser d'emblée que la présente réflexion s'est faite en supposant que le premier recours en situation de bas niveaux durables sur le Saint-Laurent fluvial sera la gestion de l'ensemble hydrographique dont le Saint-Laurent fait partie, le système Grands Lacs–Saint-Laurent. Cette gestion dispose notamment, mais sans que ce soit la seule possibilité, de la capacité d'agir sur les niveaux relatifs, l'un par rapport à l'autre, du lac Ontario (et, en amont de lui, des autres Grands Lacs) et du Saint-Laurent fluvial : c'est le contrôle des débits entre le lac Ontario et le Saint-Laurent exercé au barrage Moses-Saunders. Une des exigences qui s'imposent à la gestion du système Grands Lacs–Saint-Laurent est de chercher à satisfaire l'ensemble des besoins en eau des différentes parties de ce système de façon équitable, selon la répartition la plus équilibrée possible entre les besoins et entre les parties.

Les options sont présentées ici sommairement et aucune d'entre elles ne fait l'objet d'une analyse de faisabilité. Des moyens beaucoup plus substantiels que ceux mis à notre disposition seraient nécessaires pour passer à l'étape ultérieure. Finalement, l'acceptabilité sociale des différentes options doit être discutée à une échelle beaucoup

plus large que celle du Comité de concertation navigation. Cette étude exploratoire pourrait contribuer à la tenue d'une telle discussion.

Il est clair et primordial pour l'ensemble des intervenants du Québec que la gestion des niveaux d'eau du système Grands Lacs–Saint-Laurent en amont des sites possibles d'implantation des solutions d'adaptation, s'inscrit dans le contexte plus large d'un processus de concertation qui assure le respect de l'ensemble des usages autant en amont qu'en aval. Il est également important de prendre en considération les impacts des changements climatiques en amont et les stratégies d'adaptation qu'on y préconise.

En ce sens, la présente étude demeure pertinente, puisqu'elle repose sur le mode actuel de gestion du barrage Moses-Saunders et pose ainsi comme prémisse que les ratios d'eau amont-aval ne sont pas remis en question. C'est donc en tenant compte du mode de gestion actuel qu'elle propose des options d'adaptation pour la situation hypothétique où l'ensemble du système Grands Lacs–Saint-Laurent serait affecté par une diminution des niveaux d'eau en raison des changements climatiques.

Enfin, nous pensons qu'il s'agit d'un exercice intéressant mais qui, en pratique, demeure partiel parce qu'il ne prend pas en considération l'influence de la régularisation. Les critères de régularisation sont en révision, et de nouveaux plans seront soumis à la consultation au printemps 2006. Certains de ces plans, s'ils étaient mis en œuvre, augmenteraient les apports d'eau dans le Saint-Laurent. Il est donc impératif que la régularisation soit prise en compte dans toute réelle stratégie d'adaptation. Il y aurait ainsi lieu de refaire un exercice sur cette nouvelle base, et ce, dans une perspective qui déborde le seul cadre de la navigation commerciale.

Introduction

Lors de l'élaboration de la Stratégie de navigation durable élaborée en 2004, le Comité de concertation navigation a estimé que les fluctuations des niveaux d'eau sur le Saint-Laurent pouvaient affecter les activités maritimes et portuaires et qu'à cet égard, des options d'adaptation devaient être étudiées en relation avec les principes d'une navigation durable (D'Arcy, Bibeault et CCN, 2004).

Dans un cadre plus global, le rapport de 2001 du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat soulignait que plusieurs indicateurs climatiques observés au cours du xx^e siècle convergent vers des changements climatiques (GIEC, 2001). La fiabilité des données préindustrielles est toutefois relative (McIntyre and McKittrick, 2005; Osborn and Briffa, 2004), et l'importance quantitative de certains facteurs (gaz à effet de serre, champ magnétique solaire, etc.) qui contribueraient à ces changements est encore imprécise (Parker, 1999; GIEC, 2001). En outre, les changements observés jusqu'à présent seraient valables pour l'hémisphère Nord, mais ne s'appliqueraient pas à l'hémisphère Sud (GIEC, 2001). Au Canada, des observations faites sur une période de cinquante à cent ans illustrent bien la variabilité régionale du climat. Les changements les plus notables se sont produits dans l'ouest de l'Arctique, dans le bassin du Mackenzie et dans les Prairies où, au cours du xx^e siècle, les températures se sont réchauffées de 1,5 °C, soit près du triple du réchauffement planétaire moyen (0,6 °C). La côte de la Colombie-Britannique et la région des Grands Lacs et du Saint-Laurent a connu un réchauffement à peu près identique à celui de la planète. Le réchauffement le moins prononcé, environ la moitié de celui de la planète, a été décelé dans le nord-ouest de l'Ontario, le centre du Québec et les provinces atlantiques (Conseil canadien des ministres de l'environnement, 2003).

Il appert que la direction que prendront les variations climatiques sur le plan régional et leur amplitude sont difficiles à prédire avec certitude, notamment en raison de la très grande variabilité des précipitations et de l'incapacité des modèles atmosphériques

actuels à rendre compte de certains processus atmosphériques (Ressources naturelles Canada, 2002).

Dans le bassin Grands Lacs–Saint-Laurent, les premières estimations basées sur une simulation du doublement du CO₂ atmosphérique laissent prévoir une baisse du débit fluvial annuel moyen de l'ordre de 3 100 mètres cubes par seconde ($\approx 40\%$), ce qui diminuerait le niveau d'eau au port de Montréal d'environ 1,25 mètre (Mortsch et al., 2000). Des simulations climatiques plus récentes situent la réduction en apport d'eau net entre 4 et 24 % dans les bassins des Grands Lacs (Croley II, 2003). Cette variation, attribuable à une plus grande augmentation des températures que des précipitations, intensifierait l'évaporation.

Ces scénarios, malgré leur degré d'incertitude, ont conduit les autorités à vouloir étudier les impacts qui y seraient associés tant du côté humain que des activités économiques (Transports Canada – Canmore Workshop, 2003; Ressources naturelles Canada, 2002). En ce qui a trait à la navigation commerciale, l'évaluation des impacts a été mieux étudiée pour les Grands Lacs (Caldwell et al., 2002; Quinn, 2002; Transport Canada – Canmore Workshop, 2003; Millerd, 2004) que pour le Saint-Laurent. Parmi les raisons qui expliqueraient ce manque d'intérêt, on retrouve l'absence d'une organisation de recherche vouée à cette question et la confiance que les intervenants du milieu maritime ont dans leur expérience et leur connaissance des fluctuations fluviales (Baclet et Montagné, 2002).

Une baisse importante des niveaux d'eau a pour conséquence directe une réduction de la capacité de chargement des navires. Ainsi, il faut un nombre supplémentaire de voyages ou de navires, dans le cas d'un service régulier, pour transporter une même quantité de marchandises. Selon certains scénarios climatiques, les coûts pour les transporteurs maritimes agissant dans les Grands Lacs pourraient augmenter de 15 à 30 % (Millerd, 2004). Dans ce contexte, et si les coûts devenaient trop importants, les compagnies qui utilisent le transport maritime sur les Grands Lacs pour acheminer leurs marchandises devraient considérer d'autres modes de transport (Millerd, 2004).

Les simulations climatiques ne peuvent anticiper avec précision la période et la fréquence où ces changements se réaliseront. La plage temporelle obtenue par simulation tourne habituellement autour de 2050. Cet éloignement temporel permettra aux modélisateurs de raffiner d'ici là leurs prédictions en gagnant en certitude sur la direction et l'amplitude des changements. Il donne aussi l'occasion d'explorer différentes options d'adaptation pour faire face éventuellement à ces changements. Cet aspect cependant est souvent négligé, au point où l'on parle d'un déficit croissant et inacceptable en recherche orientée vers des mesures d'adaptation (Burton, 2004).

Il existe généralement différentes façons de s'adapter aux changements. Dans les systèmes naturels, l'adaptation se fait de façon réactive alors que, dans les systèmes humains, elle peut se faire par anticipation (GIEC, 2001). Le marché est un exemple de ce type d'adaptation, qui utilise le mécanisme des prix comme point de référence. Cette adaptation par anticipation peut également être planifiée par les gouvernements de manière à réduire les coûts écologiques, sociaux et économiques associés aux changements climatiques. Étonnamment, très peu de cas ont été relevés où les décideurs ont recouru à un cadre analytique pour évaluer les options d'adaptation (GIEC, 2001). L'incertitude liée aux effets à long terme des changements climatiques peut certainement constituer un frein aux investissements majeurs dans les infrastructures (Transport Canada – Canmore Workshop, 2003; European Environment Agency, 2005). Cependant, les changements climatiques devraient être considérés dans le contexte de la gestion des risques et de l'évaluation des points vulnérables (Ressources naturelles Canada, 2002) et, à cet égard, la perspective d'adaptation devrait être incluse dans la planification du développement à long terme par les gouvernements. Certains pays d'Europe ont amorcé récemment cette intégration (European Environment Agency, 2005).

Les options d'adaptation usuelles pour le transport maritime sont assez bien connues et se résument au dragage, à l'érection d'ouvrages hydrauliques, à la modification de la configuration de la coque des navires pour réduire le tirant d'eau et à l'utilisation plus intense du transport intermodal (Transport Canada – Canmore Workshop, 2003; Mortsch et al., 2000; Millerd, 2003; Quinn, 2002). La révision des normes opérationnelles de

gestion du trafic pourrait éventuellement faire partie des options potentielles. Toutefois, même si elles ont été considérées, ces options n'ont pas fait l'objet d'une étude exhaustive. La documentation sur les options présentées demeure donc inégale. La raison en est que certaines sont historiquement mieux connues et surtout plus abondamment étudiées. Dans d'autres cas, les options sont relativement nouvelles et peu connues. La détermination des coûts est par ailleurs relativement nouvelle, et on doit considérer cette information à titre indicatif plutôt que d'y voir des coûts de projets réels. Il importe cependant de préciser qu'on ne devrait pas présumer que l'absence ou l'abondance d'information dans ce rapport indique une préférence du Comité de concertation navigation pour une option plutôt qu'une autre. Une analyse comparative des impacts, coûts et avantages, incluant différentes variantes, permettrait une meilleure évaluation du potentiel d'adaptation de chacune. De plus, cette analyse favoriserait la détermination des options qui s'inscrivent dans les objectifs du développement durable.

L'objectif de l'étude est d'explorer différentes stratégies d'adaptation qui permettraient le maintien des activités maritimes et portuaires à leur niveau actuel, et ce, en supposant que les changements climatiques produiront une baisse des niveaux d'eau dans le système Grands Lacs–Saint-Laurent. Le projet se divise en deux parties. La première partie porte sur une simulation hydraulique des variations des niveaux d'eau dans le fleuve faite à partir des modèles climatiques et océaniques. Cette simulation permet d'estimer l'amplitude des modifications et la distribution spatiale des niveaux d'eau en considérant à la fois la baisse des apports d'eau des Grands Lacs et le rehaussement des niveaux marins. La deuxième partie évalue les gains potentiels en hauteur d'eau que permettraient quelques options d'adaptation en fonction de trois classes de fluctuations des niveaux d'eau. Une catégorie d'options est associée à chacune de ces classes :

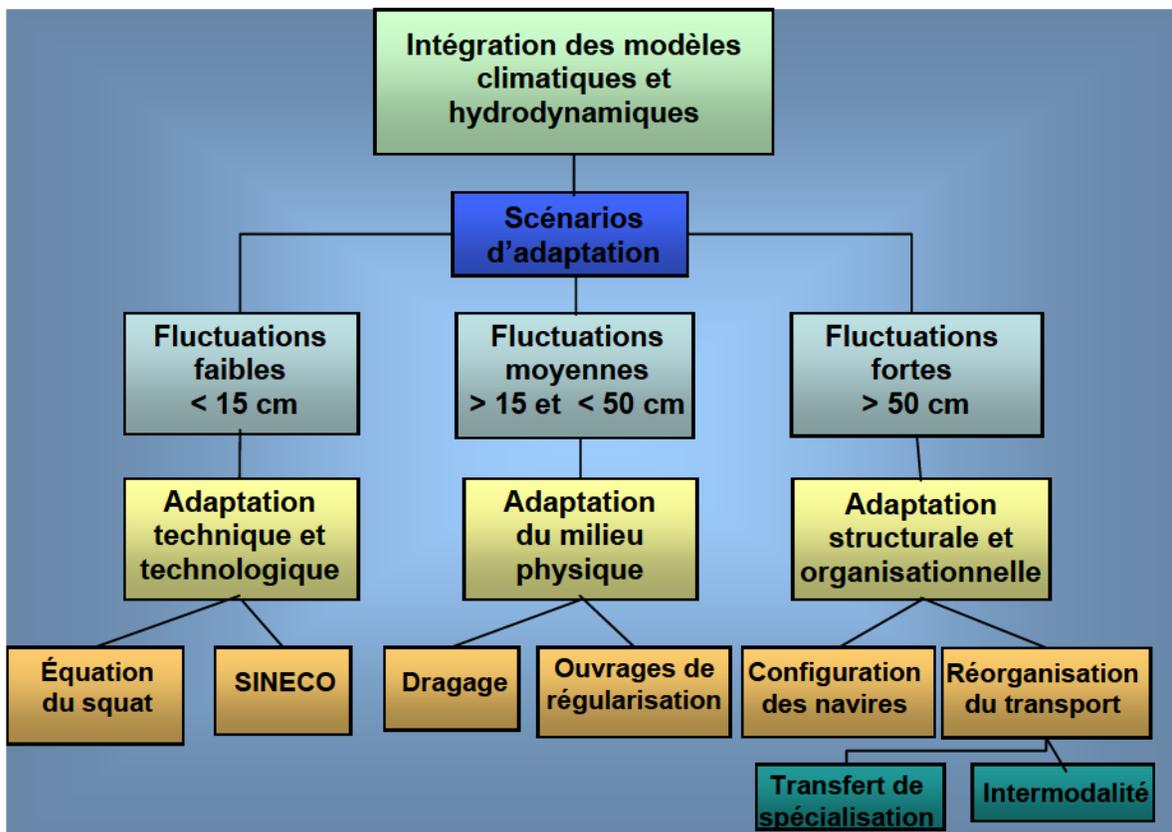
- 1- Fluctuations faibles (0-15 cm) : évaluation des hausses potentielles de la colonne d'eau obtenues par l'amélioration de la précision des outils *techniques et technologiques*.
- 2- Fluctuations moyennes (15-50 cm) : évaluation des gains potentiels obtenus avec des travaux *d'aménagement fluvial* (dragage et des ouvrages hydrauliques).

- 3- Fluctuations fortes (50 cm et plus) : évaluation des gains potentiels obtenus à partir d'une *adaptation structurale* (configuration des navires ajustée aux conditions du Saint-Laurent) et *organisationnelle* (réorganisation des activités portuaires).

Une brève discussion sur les résultats obtenus et le potentiel de chaque option complète cette deuxième partie.

Il importe de mentionner que la division en trois classes des fluctuations et du gain correspondant à chaque option s'est faite à l'origine de façon approximative, d'où la différence entre les gains potentiels supposés et les résultats obtenus. Dans les cas appropriés, les incidences environnementales et économiques des options sont sommairement estimées. La figure 1 donne un aperçu de la démarche analytique suivie pour la réalisation du projet.

Figure 1 – Présentation schématique des options d'adaptation analysées



Les premiers résultats obtenus sont intéressants mais doivent être interprétés avec prudence. Par exemple, les projections obtenues avec la simulation hydraulique illustrent que l'impact des changements climatiques sur les niveaux d'eau fluviaux serait à peu près nul si le climat futur ressemble à une année hydrologique moyenne actuelle. Par contre, si le climat futur s'apparente davantage à une année actuelle de faible hydraulicité, les baisses des niveaux d'eau seront plus substantielles et atteindront à certains moments environ 1 mètre à Montréal. Les impacts seraient plus sérieux, car cette diminution se prolongerait sur plusieurs mois. Toutefois, certaines des options d'adaptation explorées seraient en mesure de compenser les pertes subies, si la fréquence des épisodes le justifiait. Ces résultats doivent être considérés comme préliminaires. D'autres études seraient nécessaires tant pour préciser les scénarios climatiques que pour approfondir les options d'adaptation. De nouvelles options pourraient également être explorées comme les mesures financières compensatoires pour réduire les pressions économiques sur les transporteurs et autorités portuaires.

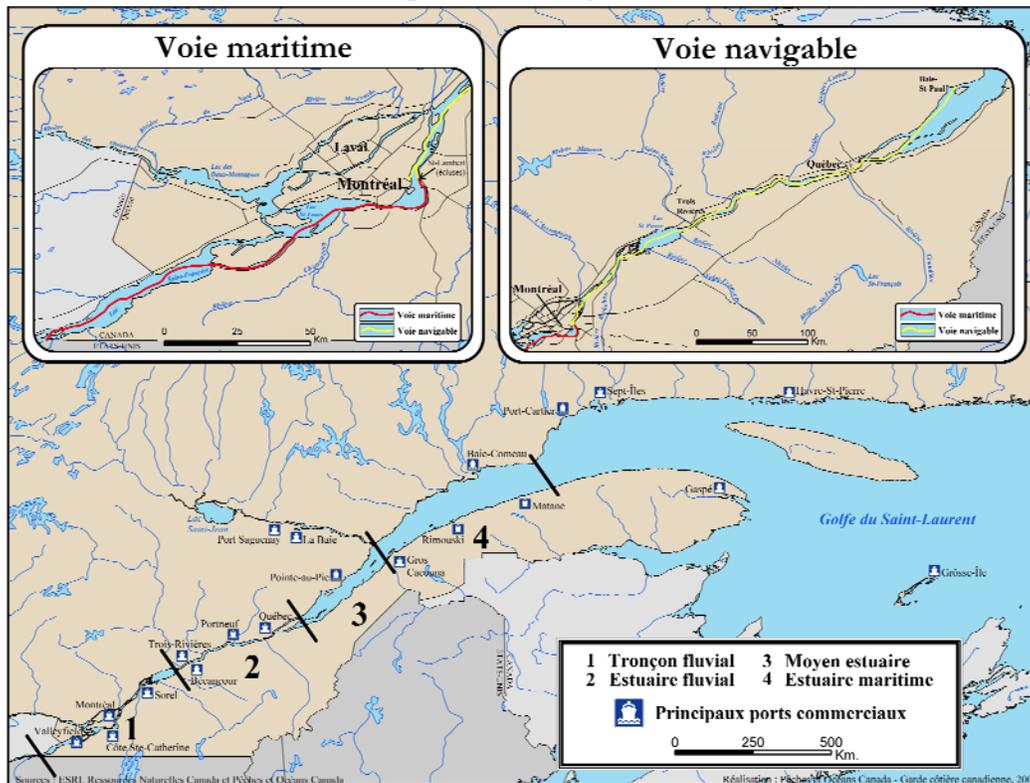
Partie I

Intégration des scénarios climatiques et du rehaussement du niveau des océans à un modèle hydraulique du Saint-Laurent fluvial

1.1 Contexte

Le Saint-Laurent, sur le plan hydrologique, prend sa source dans les Grands Lacs et termine son parcours dans le golfe. L'onde de marée remonte dans la partie fluviale jusqu'à la hauteur du lac Saint-Pierre où elle peut atteindre parfois 30 centimètres. Le chenal de navigation s'étend sur une distance d'environ 300 kilomètres entre le Cap Gribane et Montréal, et la profondeur nominale dans le chenal est de 11,3 mètres. Certains endroits ont une profondeur inférieure à 11,3 mètres mais la hauteur d'eau dans ces secteurs est compensée par l'effet des marées, ce qui assure le passage sécuritaire des navires.

Figure 2 - Carte du Saint-Laurent fluvial et marin ainsi que des voies navigables et maritimes (le secteur d'étude correspond aux tronçons 1 et 2 de la carte)



Les modèles climatiques prévoient des scénarios dont les effets sur les niveaux d'eau du Saint-Laurent seraient opposés. D'une part, l'apport d'eau provenant des Grands Lacs diminuerait à cause de l'augmentation de l'évaporation (Croley II, 2003), tandis que le niveau marin serait en hausse à cause de la fonte des glaciers et de l'expansion thermique

des océans (GIEC, 2001; Meehl et al., 2005). Une évaluation de l'effet combiné de ces deux scénarios est nécessaire pour estimer l'amplitude et la distribution spatiale des impacts des changements climatiques sur le Saint-Laurent fluvial.

1.2 Méthodologie

L'intégration des scénarios climatiques et océaniques à un modèle hydraulique pour anticiper les niveaux d'eau dans le Saint-Laurent au cours de la période 2050 (2040-2060) s'est faite de la façon suivante (Lefaivre, 2005):

1. Estimer, par modélisation numérique de l'atmosphère, les conditions atmosphériques pour les années 2050.
2. Appliquer cette projection, par modélisation hydrologique, aux bassins versants des Grands Lacs et du Saint-Laurent pour obtenir les apports d'eau totaux.
3. Estimer par une projection les niveaux moyens des océans pour la section en aval du Saint-Laurent.
4. Intégrer les projections relatives aux débits et aux niveaux marins au modèle hydraulique pour estimer les niveaux d'eau correspondants dans le fleuve.

1.2.1 Projection relative aux conditions atmosphériques pour les années 2050 – Modèles atmosphériques globaux

Les projections globales relatives aux conditions atmosphériques pour les années 2050 proviennent de deux centres climatiques : le Centre canadien de la modélisation et de l'analyse climatique et le Hadley Centre for Climate Prediction and Research. À partir de différentes hypothèses de croissance de l'émission des gaz à effet de serre, vingt-huit calculs de projections climatiques ont été effectués, à partir desquels quatre scénarios représentant les points extrêmes ont été définis. En modifiant les valeurs de deux variables principales, la température et les précipitations, ces scénarios reproduisent les quatre conditions atmosphériques suivantes : *chaud*, *pas aussi chaud*, *sec* ou *humide*. Les résultats utilisés pour le fleuve Saint-Laurent dérivent des calculs des deux centres :

- i) Centre canadien de la modélisation et de l'analyse climatique
 - Modèle CGCM2, résultat A 21 – Chaud et sec (CS)

- Modèle CGCM2, résultat B 23 – Pas aussi chaud et sec (**PCS**)

ii) Hadley Centre for Climate Prediction and Research

- Modèle HADCM3, résultat A1F1 – Chaud et humide (**CH**)
- Modèle HADCM3, résultat B22 – Pas aussi Chaud et humide (**PCH**)

Dans un premier temps, on sélectionne une période témoin (1961-1990), où les conditions climatiques actuelles sont reproduites à l'aide d'un modèle atmosphérique. La projection relative au climat futur, basée principalement sur les variations des gaz à effet de serre, se fait sur un nombre d'années similaire (2040-2069). Les résultats obtenus pour la période étudiée sont ensuite soustraits de ceux de la période témoin (Lefaiivre, 2005). La même procédure sera utilisée pour les calculs des apports d'eau totaux, du débit, du niveau des océans et des niveaux d'eau fluviaux. Il est à noter que la validité des projections repose sur les connaissances actuelles sur la croissance économique mondiale et sur l'augmentation des gaz à effet de serre et que, dans ces conditions, elles ne constituent pas une prédiction.

1.2.2 Projection relative aux apports hydrologiques totaux des bassins versants des Grands Lacs et du Saint-Laurent

Les résultats des projections climatiques ont été intégrés à des modèles hydrologiques pour obtenir les variations des apports totaux d'eau pour les bassins des Grands Lacs (Croley II, 2003) et de la rivière des Outaouais (Fagherazzi et al., 2004). Le tableau 1 présente ces variations.

Tableau 1 – Variations du pourcentage des apports totaux d'eau pour les bassins des Grands Lacs et de la rivière des Outaouais selon les quatre scénarios climatiques

Scénarios	Secteurs	Grands Lacs	Outaouais
CS		- 24 %	- 7 %
PCS		- 17 %	- 4 %
CH		- 21 %	- 8 %
PCH		- 4 %	- 1%

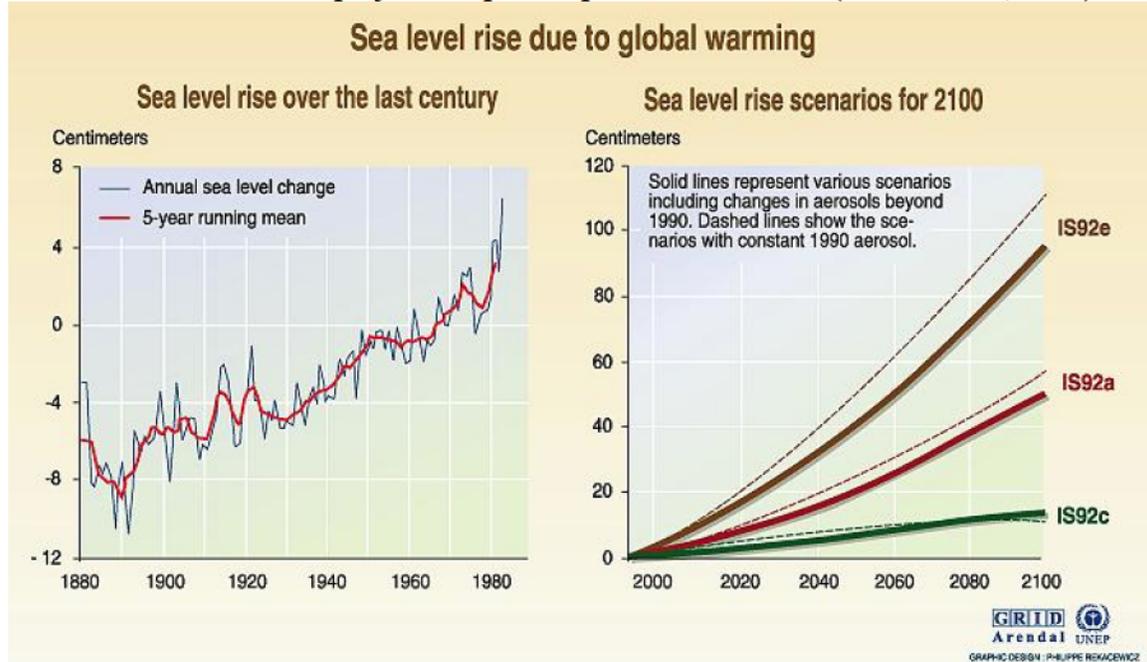
Le cycle hydrologique des deux bassins serait modifié par les changements climatiques, mais de façon moins significative pour la rivière des Outaouais. Les surfaces d'eau exposées directement à l'évaporation et la présence du couvert végétal pourraient expliquer cette différence.

Les résultats pour la rivière des Outaouais ont été utilisés pour les autres tributaires du Saint-Laurent entre Montréal et Québec en fonction du pourcentage relatif actuel de l'écoulement, à l'exception de la rivière Richelieu, à laquelle ont été attribués les résultats pour les Grands Lacs, étant donné la similitude entre l'écoulement du lac Champlain et celui des Grands Lacs. Enfin, les valeurs présentées au tableau 1 pour les Grands Lacs seront appliquées directement à l'exutoire du lac Ontario, sans considération d'une éventuelle gestion adaptative du barrage Moses-Saunders qui pourrait atténuer les effets de ces variations sur le débit fluvial.

1.2.3 Niveau moyen des océans

Plusieurs incertitudes demeurent relativement aux effets des changements climatiques sur l'amplitude de l'élévation du niveau moyen des océans. Parmi celles-ci, il y a le taux d'expansion thermique des océans, la vitesse de fonte des glaciers de même que les mouvements isostatiques (rebondissement) de la croûte terrestre. Ces incertitudes expliquent les grandes variations dans les projections à long terme (partie droite de la figure 3).

Figure 3 – Évolution du niveau moyen des océans causée par le réchauffement global au cours du dernier siècle et projections pour la période 2000-2100 (tiré de GIEC, 2001)



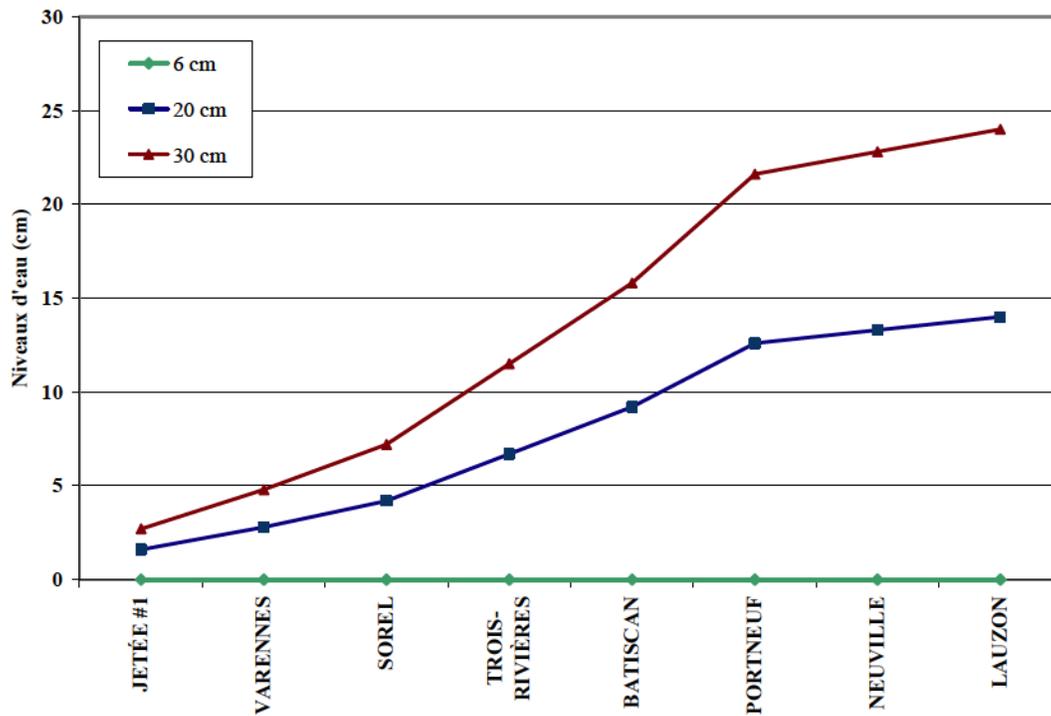
Source: Climate change 1995, The science of climate change, contribution of working group 1 to the second assessment report of the intergovernmental panel on climate change, UNEP and WMO, Cambridge university press, 1995; Sea level rise over the last century, adapted from Gornitz and Lebedeff, 1987.

Selon les experts du GIEC, le niveau moyen des océans aurait augmenté de quelque 12 centimètres au cours du dernier siècle (partie gauche de la figure 3), et cette hausse se poursuivrait dans le présent siècle. Les projections moyennes estiment que le niveau des océans serait supérieur de près de 20 centimètres, autour de 2050, par rapport aux observations actuelles (partie droite de la figure 3). L'imprécision est toutefois notable avec des valeurs variant entre 5 et 30 centimètres. La valeur moyenne de 20 centimètres sera utilisée pour les besoins de nos calculs.

Depuis le retrait glaciaire, il y a un peu plus de 10 000 ans, la croûte terrestre réagit par élasticité pour reprendre sa forme préglaciaire. Ce rebondissement peut, dans certains cas, annuler ou atténuer l'effet de rehaussement des niveaux marins. Des observations faites à la station marégraphique de Lauzon (en face de Québec) ont démontré que le niveau d'eau à cet endroit n'avait pas changé au cours du dernier siècle (Xu et al., 2004). Ces observations impliquent que le rééquilibrage postglaciaire de la croûte terrestre se ferait, à Lauzon, au même rythme que l'élévation moyenne du niveau des océans, c'est-à-

dire de l'ordre de 12 centimètres par cent ans. En supposant que ce rebondissement soit constant, la valeur de 6 centimètres en 2050 devra être soustraite de l'augmentation moyenne de 20 centimètres du niveau des océans. La valeur de 14 centimètres sera ainsi utilisée pour la modélisation hydraulique. La figure 4 illustre l'effet du rehaussement du niveau des océans le long du Saint-Laurent avec trois valeurs différentes.

Figure 4 – Effet de l'augmentation du niveau des océans dans la partie fluviale du Saint-Laurent (adapté de Lefaiivre, 2005)



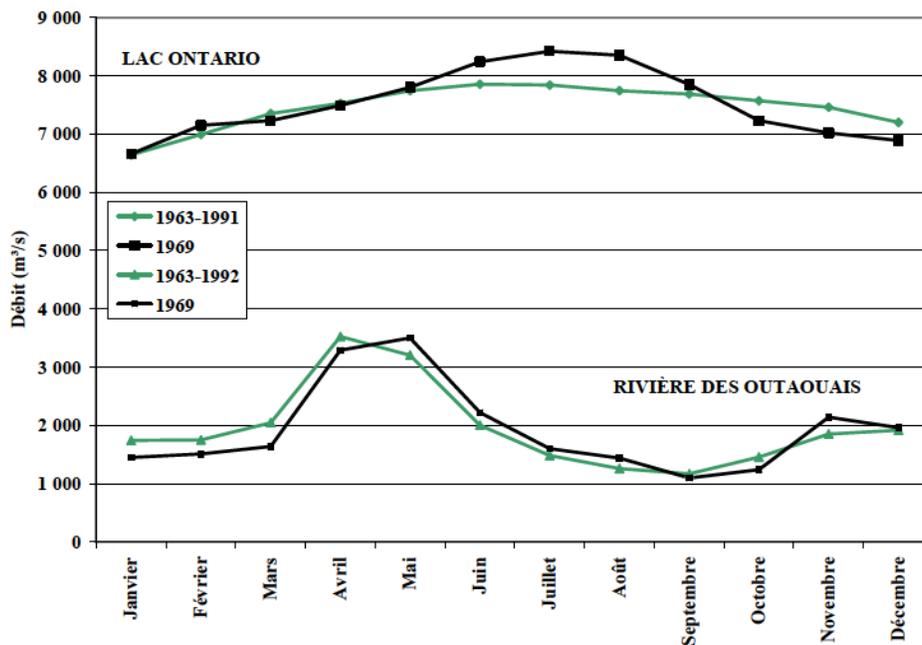
1.2.4 Modélisation des niveaux d'eau du Saint-Laurent

Le modèle numérique unidimensionnel utilisé pour reproduire les niveaux d'eau du Saint-Laurent a été conçu par des chercheurs du Massachusetts Institute of Technology (Dailey et al., 1972) et appliqué par la suite aux conditions du Saint-Laurent (Morse, 1990). Ce modèle permet d'obtenir les niveaux d'eau pour tout le fleuve en fonction seulement des conditions aux frontières amont et aval. Deux frontières sont imposées en amont. La première est le débit mesuré à Lasalle, alors que la seconde fait la somme des débits des rivières des Mille-Îles et des Prairies calculés à Repentigny. La frontière en aval correspond au niveau d'eau enregistré à Lauzon.

Les niveaux d'eau d'une année représentative de la période 1961-1990 ont été en premier lieu reproduits. Par la suite, les modifications des débits et du niveau moyen des océans selon les différents scénarios ont été appliquées aux frontières du modèle pour cette année typique. Les résultats sont présentés sous forme d'écart de niveaux pour chacun des quatre scénarios climatiques relativement aux niveaux de l'année typique.

L'analyse des débits du lac Ontario mesurés au barrage Moses-Saunders et ceux de la rivière des Outaouais enregistrés au barrage Carillon montre que l'année 1969 est celle qui se rapproche le plus de la moyenne des années 1961-1990 (figure 5). C'est cette année qui sera utilisée comme année typique ou de référence.

Figure 5 – Comparaison des débits mensuels moyens de l'année 1969 à Cornwall et pour la rivière des Outaouais – Cornwall, période 1963-1991; Outaouais, période 1963-1992 (adapté de Lefaivre 2005)



1.2.5 Résultats de l'intégration des scénarios de changements climatiques et de rehaussement du niveau marin au modèle hydraulique

La modélisation hydraulique visait principalement à :

- évaluer la distribution spatiale de la hauteur d'eau dans le Saint-Laurent fluvial en considérant les variations climatiques et le rehaussement des niveaux marins;
- évaluer l'amplitude des baisses de niveaux d'eau;
- déterminer le secteur où les variations deviennent nulles.

Les résultats sont présentés par rapport à l'année de référence (1969), qui correspond à une année de niveaux d'eau moyens et par rapport à une année de bas niveaux (2001). Cela permet d'avoir un portrait contrasté et assez réaliste de ce qui pourrait se produire. En outre, il faut savoir que ce sont les situations extrêmes qui nécessitent l'application de mesures d'adaptation, et non les situations moyennes (GIEC, 2001). Les calculs ont été faits pour plusieurs stations le long du Saint-Laurent, mais l'analyse se limitera ici à Montréal (Jetée #1) et à Trois-Rivières. L'analyse a été faite sur une base mensuelle pour prendre en compte les variations hydrologiques saisonnières. La résultante est une baisse non linéaire du pourcentage de variation des niveaux d'eau attribuable à chaque scénario. C'est ce qui explique que, pour certains mois, le scénario climatique PCH donne un résultat plus élevé que celui de l'année de référence. Les figures 6 et 7 présentent les variations par rapport à l'année 1969, alors que les suivantes (figures 8 et 9) le font relativement à l'année 2001.

Figure 6 – Niveau d'eau mensuel prévisible à Montréal (Jetée #1) par rapport à l'année de référence 1969, et selon les quatre scénarios climatiques (chaud et Sec; pas aussi chaud et sec; chaud et humide; pas aussi chaud et humide) (source : Lefavre, 2005. Adaptation : D'Arcy, 2005)

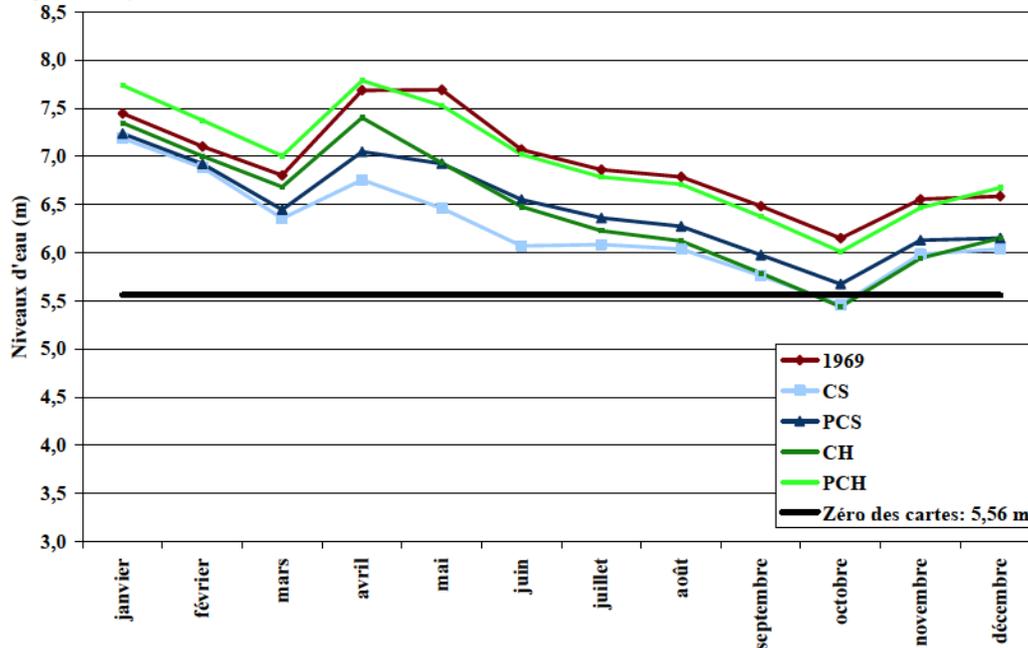
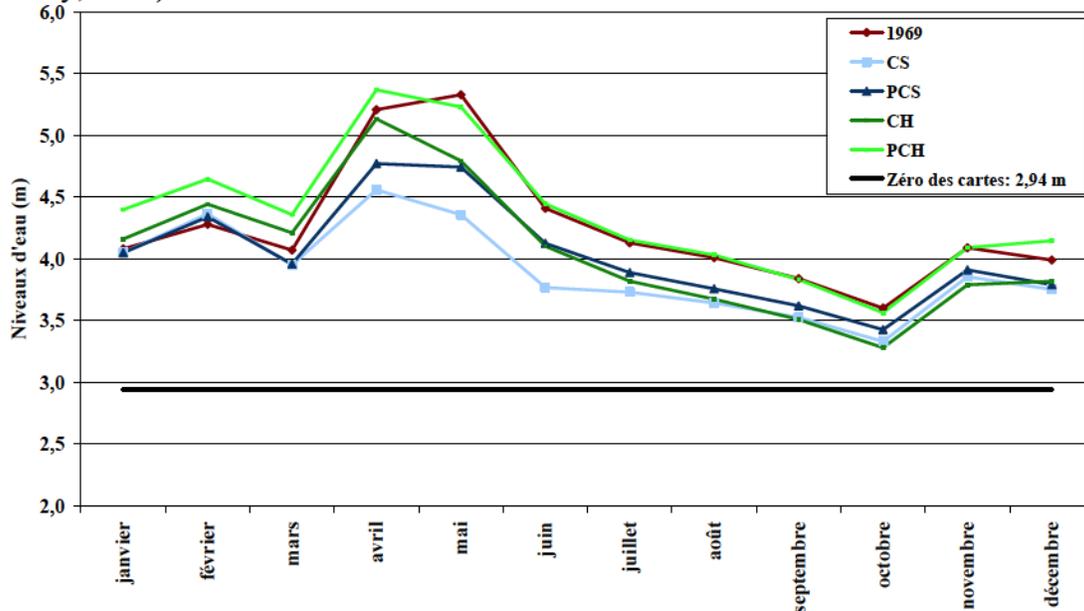


Figure 7 – Niveau d'eau mensuel prévisible à Trois-Rivières par rapport à l'année de référence 1969, et selon les quatre scénarios climatiques (chaud et sec; pas aussi chaud et sec; chaud et humide; pas aussi chaud et humide) (source : Lefavre, 2005. Adaptation : D'Arcy, 2005)



En plus des courbes pour chacun des scénarios, les figures indiquent la valeur du zéro des cartes pour chaque station. Cette valeur correspond aux plus faibles niveaux observés

dans 95% des cas au cours d'une période de cent ans. C'est aussi à partir de cette valeur que la profondeur nominale est mesurée dans la voie navigable.

Les figures 6 et 7 illustrent qu'en soustrayant les valeurs des changements climatiques de celles d'une année hydrologique moyenne, il n'y a pas d'effets observés à Montréal au regard du zéro des cartes, peu importe le scénario climatique retenu. Si l'on prend le scénario le plus pessimiste (CS), l'écart le plus grand avec l'année 1969 est au mois de mai, où il se situe légèrement au-dessus de 1 mètre. Mais il s'agit d'un mois de l'année où les niveaux d'eau sont habituellement élevés, ce qui atténue la baisse marquée due à la faible accumulation de neige. L'écart s'atténue au fur et à mesure que la saison avance, et le seul moment où une valeur se situe sous le zéro des cartes est en octobre. Cette situation n'est pas inhabituelle pour l'hydrologie du Saint-Laurent car le trimestre août-octobre est celui où les niveaux sont généralement les plus bas et vont de façon ponctuelle sous le zéro des cartes. Il est à noter que les écarts pour les autres scénarios se situent entre + 0,3 et - 0,75 mètre. Les scénarios impliquant une humidité plus élevée (CH et PCH) ont pour certains mois des valeurs supérieures à l'année de référence. Les écarts sont moins grands à Trois-Rivières, et aucun des scénarios climatiques ne conduit à une situation où les niveaux seraient sous le zéro des cartes.

Ces résultats laissent supposer que les changements climatiques n'auraient pas d'impacts significatifs sur le niveau actuel des activités de navigation sur le Saint-Laurent s'ils reproduisent une année hydrologique moyenne. Les mêmes calculs seront repris en prenant cette fois-ci une année de bas niveaux (2001) comme référence (figures 8 et 9). Cette année, quoique à l'extérieur de la période de référence de 30 ans (1961-1990), donne des résultats similaires à une année de bas niveaux incluse dans cette période telle que 1964. Le choix de l'année 2001 repose seulement sur le fait que l'épisode s'est produit récemment et qu'il est dès lors plus facile d'avoir une représentation concrète des impacts qui lui sont associés.

Figure 8 – Niveau d'eau mensuel prévisible à Montréal (Jetée #1) par rapport une année de bas niveaux (2001), selon les quatre scénarios climatiques (chaud et sec; pas aussi chaud et sec; chaud et humide; pas aussi chaud et humide) (source : Lefaiivre, 2005. Adaptation : D'Arcy, 2005)

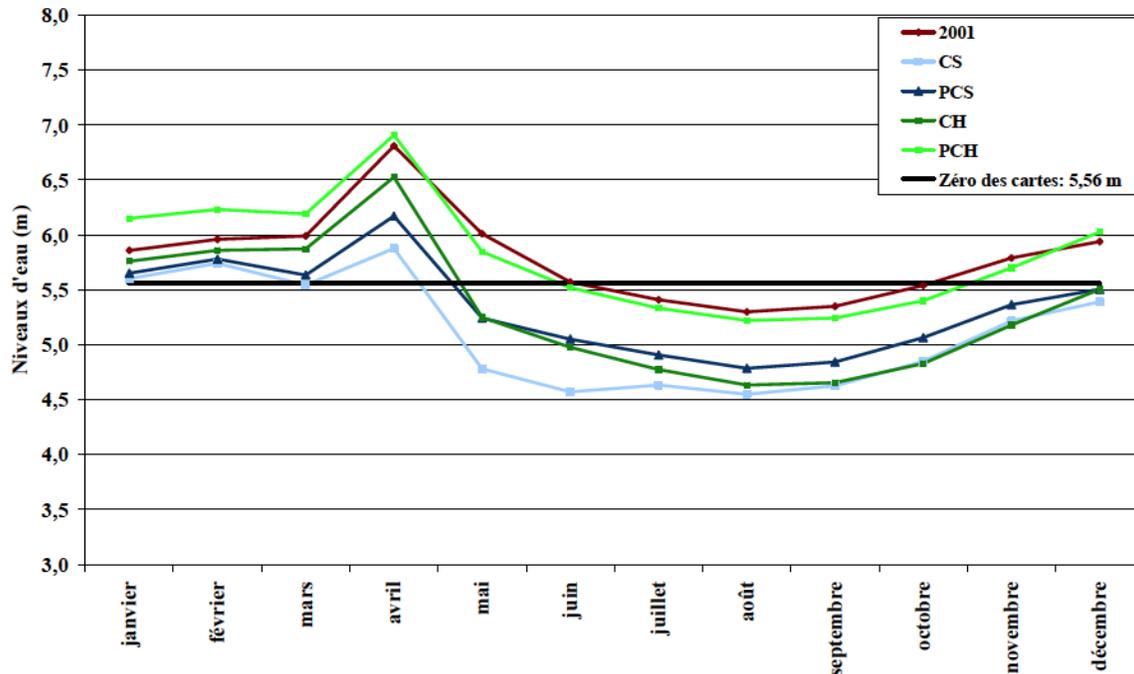
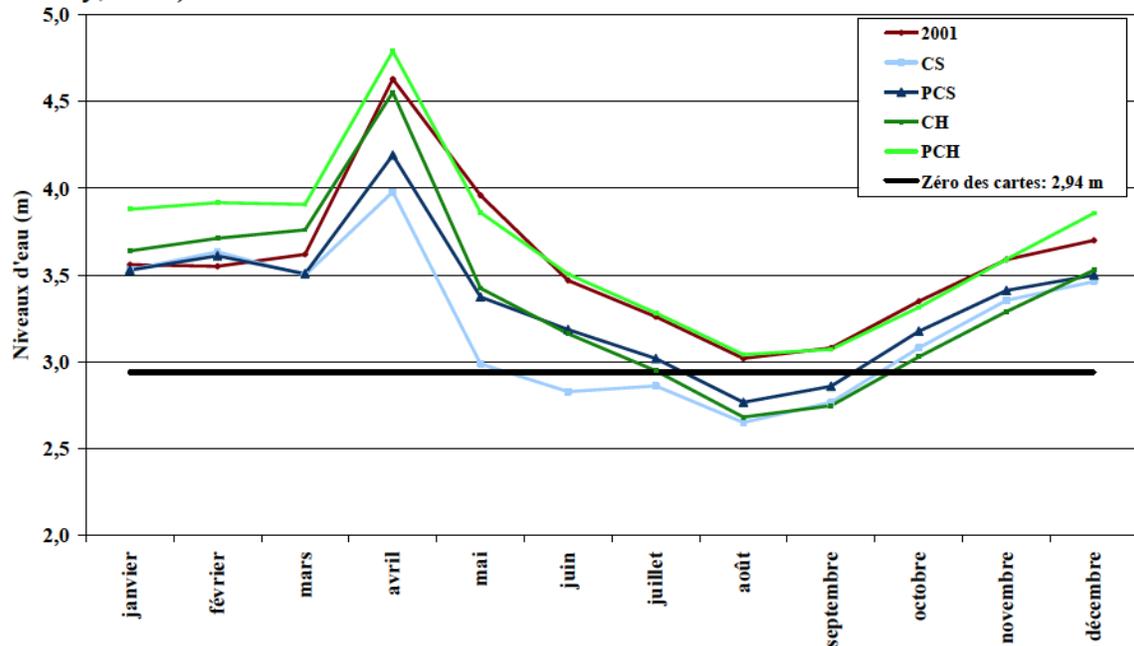


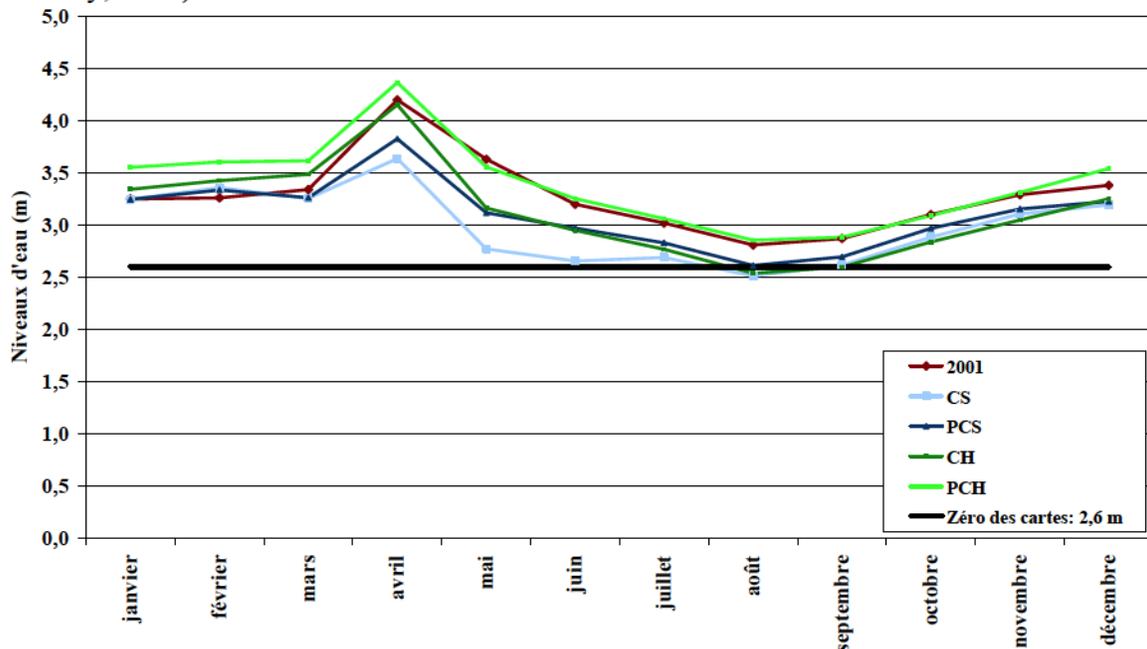
Figure 9 – Niveau d'eau mensuel prévisible à Trois-Rivières par rapport à une année de bas niveaux (2001), selon les quatre scénarios climatiques (chaud et sec; pas aussi chaud et sec; chaud et humide; pas aussi chaud et humide) (source : Lefaiivre, 2005. Adaptation : D'Arcy, 2005)



Les résultats des simulations montrent des effets appréciables sur les niveaux d'eau dans la majorité des scénarios climatiques. Ainsi, les niveaux seraient sous le zéro des cartes au port de Montréal pour la période de mai à décembre. Les scénarios qui font varier la température (CS et CH) donnent les baisses les plus significatives, de près de 1 mètre, et cette diminution s'étendrait sur plusieurs mois consécutifs. Les deux autres scénarios montrent des baisses moins substantielles, mais qui se prolongeraient toutefois dans le temps. Les impacts seraient nécessairement moindres si les années de bas niveaux n'étaient pas successives. Il faudrait voir de quelle façon il serait possible de pratiquer une gestion adaptative au barrage Moses-Saunders pour compenser cette baisse sévère de niveau sur plusieurs mois.

À Trois-Rivières, quelques mois se retrouveraient sous le zéro des cartes, et l'écart le plus grand se produirait au mois d'août avec une diminution de 0,30 mètre dans le scénario CS. La durée et l'amplitude des variations seraient moins sévères à cet endroit, ce qui diminuerait le besoin de recourir à des mesures d'adaptation importantes. L'impact d'une baisse des niveaux d'eau sur le fleuve, quand on utilise l'année de référence 2001, s'arrête à la hauteur de Bécancour (figure 10).

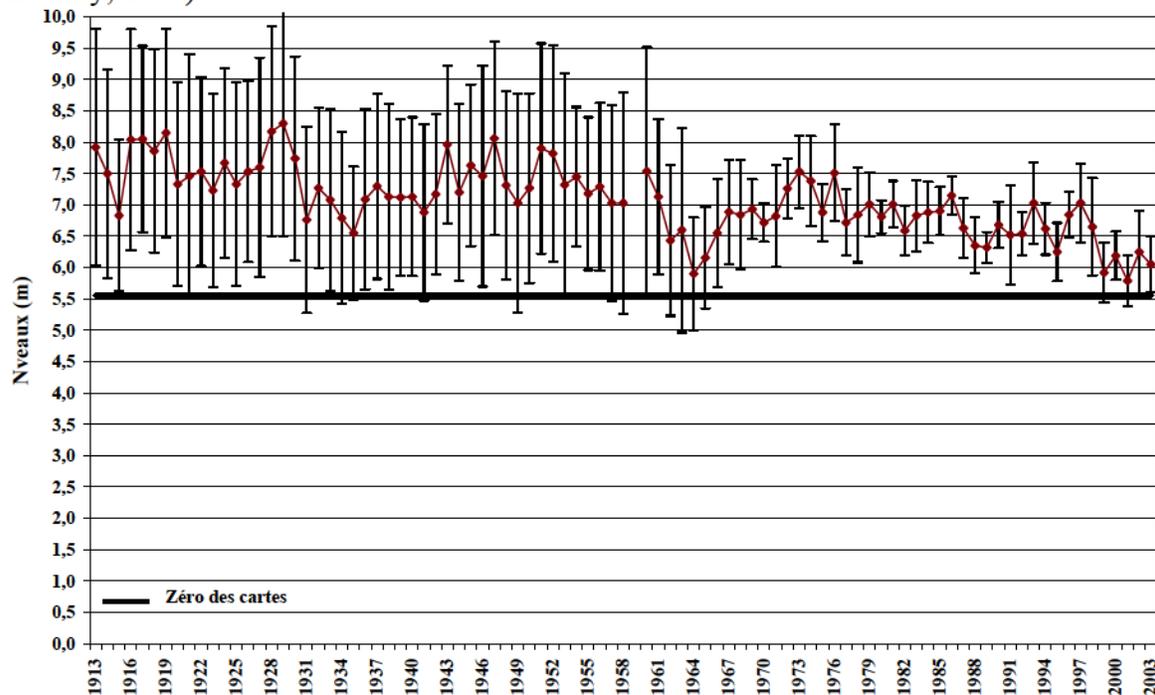
Figure 10 – Niveau d'eau mensuel prévisible à Bécancour par rapport à une année de bas niveaux (2001), selon les quatre scénarios climatiques (chaud et sec; pas aussi chaud et sec; chaud et humide; pas aussi chaud et humide) (source : Lefavre, 2005. Adaptation : D'Arcy, 2005)



La hausse des niveaux marins conjuguée à l'effet des marées dans ce secteur annulerait la baisse des niveaux d'eau.

Les résultats de la modélisation hydraulique ont montré que les impacts sur les niveaux d'eau fluviaux sont étroitement dépendants des conditions hydrologiques qui prédomineront en 2050. Dans le cas où les conditions hydrologiques s'apparenteraient à la moyenne des années 1961-1990, aucun impact ne serait observé sur les activités de navigation, même si les scénarios climatiques prévoient une réduction sensible des apports d'eau. Par contre, quand on simule une année où les niveaux sont bas, les impacts sur la navigation commerciale et de plaisance sont plus appréciables. Cela se répercuterait également sur d'autres secteurs d'activité, notamment l'approvisionnement en eau et le traitement des eaux. Il faut cependant rappeler d'une part que les fluctuations hydrologiques sont un phénomène normal (figure 11) et d'autre part qu'il est très difficile d'établir une probabilité statistique de récurrence de ces épisodes compte tenu du fait que les données passées risquent de ne pas être garantes de celles à venir.

Figure 11 – Variations mensuelles des niveaux d'eau à Montréal (Jetée #1) pour la période 1913-2003 (la barre verticale indique l'écart-type annuel; il faut noter la décroissance de l'écart-type suite à l'entrée en fonction du barrage Moses-Saunders à la fin des années cinquante) (source : Service hydrographique du Canada. Adaptation : D'Arcy, 2005)



En conséquence, même si les modèles prévoient une diminution substantielle des apports d'eau, cette diminution risque de se produire sur une échelle de temps qui permettrait la mise en œuvre d'options d'adaptation. L'impact le plus significatif serait ressenti si plusieurs années de bas niveaux advenaient consécutivement. La situation pourrait devenir critique s'il s'ajoutait une pression anthropique aux impacts des changements climatiques.

La partie suivante présentera quelques stratégies d'adaptation destinées principalement aux besoins des activités de navigation sur le Saint-Laurent.

Partie II

Stratégies d'adaptation

2.1 Contexte

Comme il a été mentionné précédemment, les stratégies retenues ont été nommées à plusieurs reprises, mais n'ont pas fait l'objet d'une étude permettant de mettre en perspective les coûts et impacts de chacune. Cet exercice de comparaison est cependant indispensable pour bien déterminer les stratégies qui s'inscriraient dans les exigences du développement durable. La partie qui suit présentera les différentes options d'adaptation en essayant, dans la mesure du possible, de donner une estimation des coûts de ces options de même que des impacts environnementaux les plus saillants. Il s'agit toutefois d'une appréciation partielle de l'ensemble des coûts et impacts potentiels que pourraient générer un projet particulier.

2.2 Options technologiques et techniques

Deux options seront ici explorées pour estimer les gains qu'elles peuvent permettre en hauteur d'eau. La première est une option technologique, le réseau SINECO, qui pourrait permettre une amélioration des prévisions des niveaux d'eau à long terme de façon à réduire la marge de sécurité que les transporteurs se gardent lors des chargements outre-mer. La seconde est davantage technique et concerne l'équation du squat. Cette équation empirique est appliquée de façon identique à tous les types de navires pour calculer leur degré d'enfoncement lorsqu'ils sont en déplacement. Cette équation n'a cependant pas été vérifiée sur une base scientifique. D'autres options appartenant à cette catégorie pourraient être explorées; le calendrier des travaux de ce projet ne permettait pas cependant de le faire ici.

2.2.1 SINECO

L'acronyme SINECO désigne le Système d'information sur les niveaux d'eaux côtières et océaniques. Le réseau SINECO est un système opérationnel d'observations et de prévisions des niveaux d'eau couvrant le Saint-Laurent de Montréal à Sept-Îles (<http://marees.gc.ca/french/DonneesDisponibles.shtml>). Les principales composantes du réseau sont :

- un réseau d'une vingtaine d'appareils de mesure disposés à des endroits stratégiques le long du Saint-Laurent;

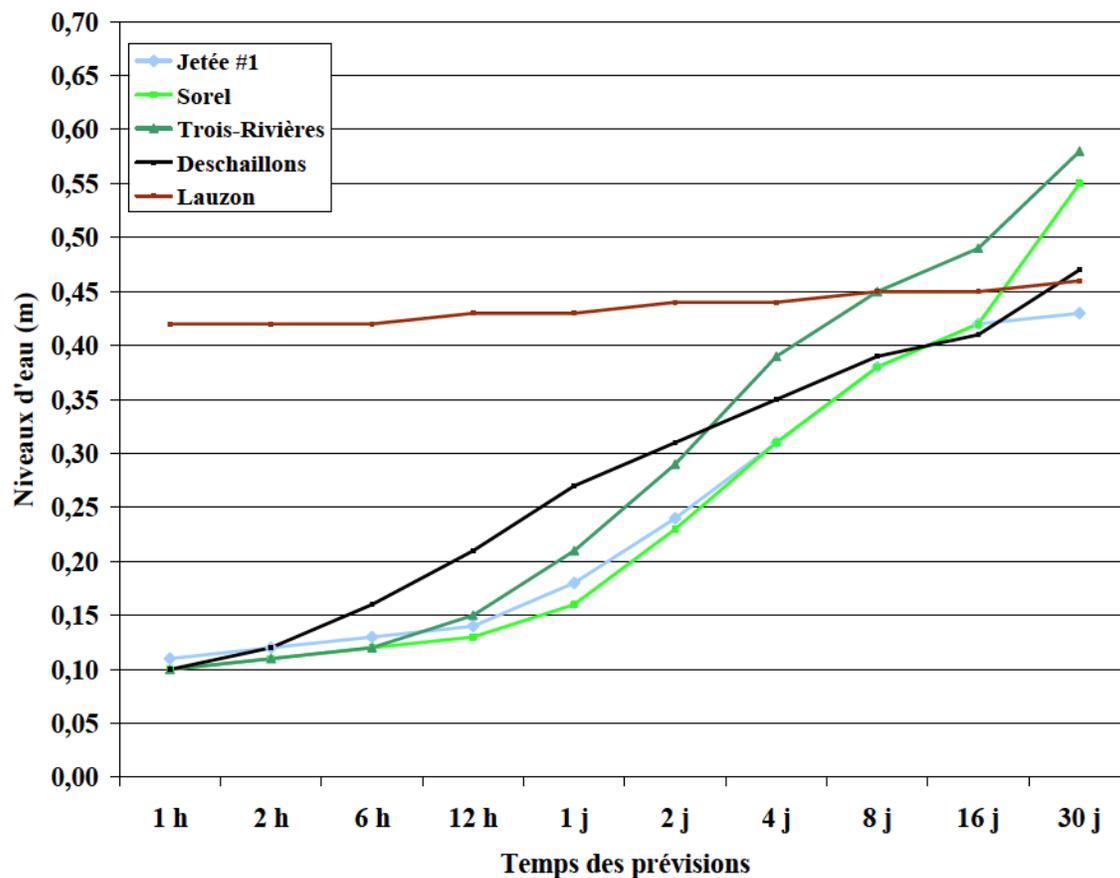
- un système numérique de prévision des niveaux d'eau de 0 à 48 h et de 2 à 30 jours;
- une base de données contenant les données d'observations, de prévisions et de prédictions;
- une interface de visualisation des données (Océanus).

Le réseau SINECO fournit principalement des données sur les niveaux d'eau en temps réel et fait des prévisions sur une période allant jusqu'à 30 jours. Ces prévisions sont utilisées par les compagnies de transport lorsqu'elles font leur chargement outremer. Elles donnent une approximation des niveaux qu'elles rencontreront lorsqu'elles navigueront sur le Saint-Laurent. Cette donnée est importante, car elle permet aux transporteurs d'optimiser leur chargement et d'éviter ainsi d'avoir à délester des navires si les niveaux sont plus bas que prévus. En fonction du temps de transit, les compagnies se gardent une marge de sécurité lors du chargement, marge qui peut varier entre 20 et 30 centimètres. Celle-ci vise essentiellement à compenser les imprécisions des prévisions. Si cette marge pouvait être réduite de façon significative, à 5 ou 10 centimètres par exemple, les compagnies pourraient faire un gain en cargaison. Ainsi, le gain en hauteur d'eau de 15 à 20 centimètres pourrait être utilisé par les transporteurs et appliqué comme stratégie d'adaptation dans le cas d'une fluctuation de cet ordre. Ce gain pourrait éviter un nouvel aménagement du fleuve et assurerait aux transporteurs de conserver leur chargement au niveau actuel. Pour les périodes où les niveaux d'eau ne seraient pas à la baisse, ce gain se traduirait en capacité supplémentaire de chargement pour les transporteurs sans affecter la sécurité du transport fluvial.

La précision des prévisions repose sur une connaissance à long terme du comportement de plusieurs variables, notamment les précipitations, les débits des Grands Lacs et de la rivière des Outaouais, les glaces, les apports des tributaires latéraux, les vents et les marées. Des améliorations ont été apportées au modèle de prévision concernant certaines variables mais elles s'appliquent davantage à la fenêtre 0-2 jours (D. Lefavre, comm. pers.). Malgré ces améliorations, la marge d'erreur demeure substantielle. Des essais menés au port de Montréal entre 1994 et 1996, durant la période libre de glace, ont

montré que l'erreur au trentième jour de la prévision était de 43 centimètres (figure 12). Aucune information n'indique si des essais similaires ont été menés plus récemment et si des améliorations ont été apportées aux prévisions.

Figure 12 – Précision des prévisions des niveaux d'eau dans un intervalle de confiance de 95% pour quelques stations entre Montréal et Québec (les statistiques proviennent de la comparaison de 443 prévisions journalières et des observations entre les mois de mai et de novembre pour la période 1994-1996) (source : D. Lefavre, comm. pers. Adaptation : D'Arcy, 2005)



La figure 12 illustre bien les limites temporelles des prévisions du modèle. Après seulement deux jours, l'erreur la plus faible est d'environ 22 centimètres à Sorel et elle devient supérieure à 30 centimètres après quatre jours. Or, ces valeurs sont au-delà de la marge de sécurité que se conservent les transporteurs. Les prévisions ne peuvent en conséquence être actuellement utilisées comme stratégie d'adaptation. Des progrès appréciables sur le plan des prévisions météorologiques, entre autres, devront être faits

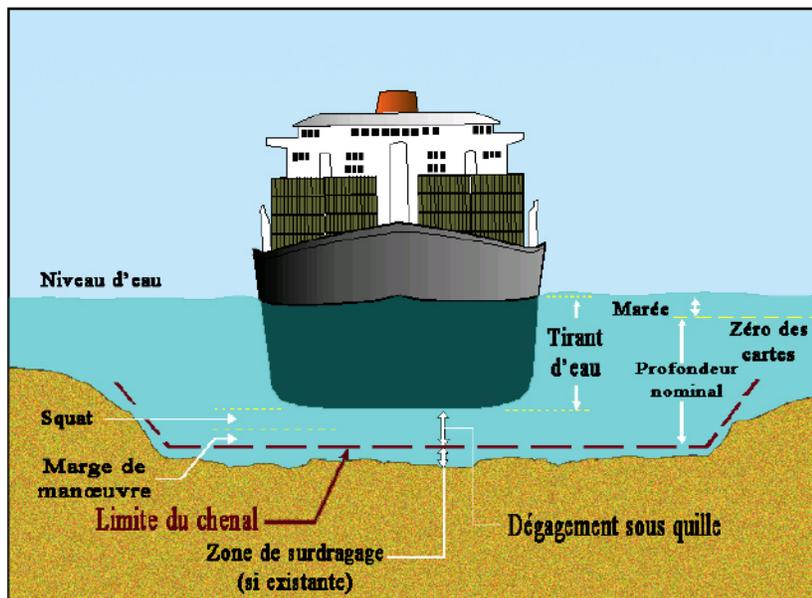
pour que cette option puisse constituer une stratégie d'adaptation relativement aux changements climatiques.

2.2.2 Squat

Le squat est l'augmentation du tirant d'eau d'un navire résultant du déplacement de celui-ci dans l'eau. C'est un phénomène hydraulique par lequel l'eau déplacée crée une augmentation de la vitesse du courant le long de la coque en mouvement, causant ainsi une réduction de pression qui, à son tour, a pour effet de produire une baisse locale du niveau d'eau. Le tout entraîne un enfoncement du navire dans l'eau qui peut être supérieur à 1 mètre dans certaines conditions. Plusieurs facteurs expliquent cet enfoncement, notamment la vitesse du navire, sa largeur et les caractéristiques physiques de la voie de navigation. La forme du lit du cours d'eau, sa largeur, la présence d'îles et de tributaires de même que les jetées sont tous des éléments qui peuvent influencer le squat (Dunker, 2004).

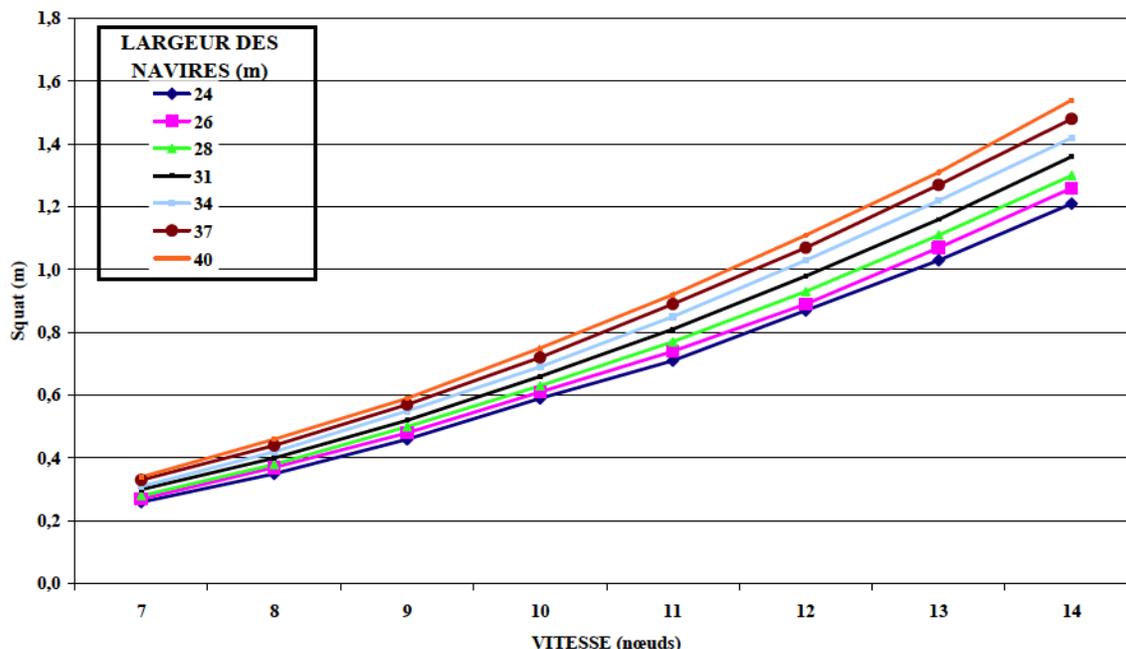
Le squat fait partie des éléments à considérer dans les calculs de dégagement sous quille. Celui-ci vise à maintenir une distance suffisante entre la coque du navire et le fond de l'eau pour assurer une marge de manœuvre sécuritaire dans les voies d'eau navigables.

Figure 13 – Illustration des éléments du dégagement sous quille



Deux des principaux éléments qui influencent le squat sont la largeur du navire et sa vitesse. Pour un navire d'une largeur donnée, un changement de vitesse de 7 à 14 nœuds augmente l'enfoncement un peu plus de 4,5 fois (figure 14).

Figure 14 – Enfoncement des navires (squat) en fonction de la vitesse



La vitesse apparaît ainsi comme un facteur déterminant dans le degré d'enfoncement des navires. Par conséquent, la réduction de la vitesse pourrait constituer une solution d'adaptation aux baisses de niveaux d'eau; toutefois, elle augmenterait, en contrepartie, le délai de livraison de façon considérable.

Dans le Saint-Laurent, la Garde côtière utilise l'équation d'Eryuzlu, conçue au début des années quatre-vingt-dix, pour calculer le squat. Cette équation est conforme aux recommandations issues du rapport conjoint du Comité aviseur permanent sur la navigation internationale (PIANC) et de l'Association internationale des ports et havres (IAPH) et s'applique aux chenaux de navigation restreints en profondeur (PIANC et IAPH, 1997). L'avènement des outils technologiques tels que le DGPS a conduit à reconsidérer les différentes équations qui, pour la plupart, avaient été élaborées de façon empirique, l'objectif étant de vérifier expérimentalement la validité de ces équations et

d'en essayer, au besoin, de nouvelles qui seraient ajustées à l'enfoncement réel des navires. Diverses études ont été entreprises à différents endroits dans le monde (Dunker, 2004; Briggs et al, 2004; Morse et al, 2002), mais les résultats ne sont pas encore concluants. Un des problèmes éprouvés est que certaines équations, dans quelques cas, donnent des valeurs de squat qui sont inférieures à celles mesurées (Briggs et al, 2004). L'utilisation de telles équations pourrait rendre incertaine la marge de manœuvre réelle des navires.

Des études qui impliquent différents types de navires sont en cours sur le Saint-Laurent. Les résultats permettront de vérifier si l'équation appliquée permet une utilisation optimale de la colonne d'eau tout en conservant une marge de sécurité suffisante. Les efforts et sommes investis dans ce domaine doivent être considérés à la lumière de l'importance que représente chaque centimètre pour le chargement des navires. Pour certains types de porte-conteneurs, un centimètre de plus augmente de près de 60 tonnes la capacité de chargement.

2.3 Adaptation du milieu physique

Dans une perspective de comparaison de différentes options d'adaptation, celle de l'aménagement du milieu physique doit aussi être explorée. Historiquement, le Saint-Laurent a connu une série de travaux d'aménagement allant de l'approfondissement du lit fluvial à l'érection de barrages (Beauharnois, Moses-Saunders). Ces travaux d'aménagement ont eu d'importants impacts sur les écosystèmes fluviaux mais, en contrepartie, ils ont contribué à la prospérité économique et sociale de la province et du pays. Malgré tous les inconvénients qu'ils impliquent, il faut reconnaître que, dans les situations qui l'exigent, les ouvrages de régularisation notamment augmentent la souplesse des activités et la capacité d'un réseau à absorber les effets de la variabilité hydrologique (Ressources naturelles Canada, 2002).

Avant d'entreprendre quelque initiative en ce sens cependant, il faudrait assurément augmenter le degré de confiance dans la prévision des changements climatiques et surtout

avoir une meilleure estimation des variations hydrologiques attendues et de leur amplitude.

Deux options d'adaptation du milieu physique seront ici analysées, soit le dragage et la mise en place d'ouvrages hydrauliques.

2.3.1 Dragage

Le dragage, ou prélèvement des sédiments, est pratiqué sur une base régulière pour maintenir les profondeurs nominales (dragage d'entretien) ou pour accroître les profondeurs (dragage de capitalisation). C'est une méthode d'intervention qui est largement appliquée et qui peut être exécutée rapidement. En contrepartie, le dragage modifie le patron d'écoulement fluvial et de transport sédimentaire au sein des cours d'eau en favorisant une concentration des courants dans le centre des chenaux dragués. Cette modification peut causer certaines perturbations des habitats aquatiques riverains (Lalancette et al., 2001). De plus, la contamination éventuelle des sédiments par des substances chimiques ou organiques peut s'avérer un problème critique et onéreux pour les activités de dragage.

Le dragage fait cependant l'objet d'un encadrement réglementaire rigoureux qui vise à atténuer, voire à éliminer, les impacts négatifs qui lui sont associés. C'est particulièrement le cas pour les travaux impliquant de grands volumes de sédiments.

2.3.1.1 Méthodologie et résultats

L'analyse de l'option du dragage sera faite à partir de deux scénarios climatiques qui utilisent une année de faible hydraulicité comme référence, soit 2001. Deux scénarios seront considérés, soit le plus pessimiste, le scénario chaud et sec (CS), et un intermédiaire, le scénario pas aussi chaud et sec (PCS). Le volume de sédiments à draguer et la superficie impliquée seront évalués. Les estimations seront faites pour le secteur Montréal-Bécancour et une présentation cartographique illustrera les endroits où un dragage serait nécessaire (annexe 1). Le tableau 2 présente les valeurs qui ont été utilisées en rapport avec le zéro des cartes.

Tableau 2 – Valeurs des baisses des niveaux d'eau utilisées pour estimer les volumes et la superficie de sédiments à draguer, basées sur les scénarios climatiques qui prennent comme référence l'année 2001 et relativement au zéro des cartes marines

Stations	Scénario CS	Scénario PCS	Zéro des cartes
	(m)	(m)	IGLD85
Montréal (Jetée #1)	-1,01	-0,77	5,56
Varenes	-0,91	-0,73	4,84
Sorel	-0,43	-0,29	3,77
Trois-Rivières	-0,30	-0,17	2,94
Bécancour	-0,09	0,05	2,60

Il faut préciser que la cartographie effectuée est une estimation préliminaire. D'autres travaux seraient nécessaires pour qu'on ait une idée plus juste des quantités réelles de sédiments à draguer. Toutefois, cela indique que l'effort de dragage irait en décroissant de l'amont vers l'aval, à l'exception de quelques secteurs dans le lac Saint-Pierre. En outre, en généralisant quelque peu la caractérisation des sédiments qui avait été effectuée lors du dragage sélectif des hauts-fonds (DSHF) entre Montréal et Cap-à-la-Roche en 1998 et 1999, on estime que la nature des sédiments à draguer aux profondeurs établies selon les scénarios climatiques serait majoritairement dure (argiles consolidées et roches). Le tableau 3 présente les volumes et superficies à draguer selon les scénarios climatiques de même que les coûts approximatifs, lesquels sont basés sur ceux du dragage sélectif des hauts-fonds. Les accès portuaires n'ont pas été inclus dans cette première estimation ni les coûts éventuels de décontamination.

Tableau 3 – Estimation des volumes et superficies à draguer dans la voie navigable selon les scénarios climatiques CS et PCS en référence à l'année 2001 et coûts approximatifs (source : Pêches et Océans Canada, Garde côtière, Gestion des voies navigables, 2005)

Secteur	SCÉNARIOS					
	Volume x 10 ³ (m ³)	CS Aire x 10 ³ (m ²)	Coûts (M\$)	Volume x 10 ³ (m ³)	PCS Aire x 10 ³ (m ²)	Coûts (M\$)
Port de Montréal (10,7 m)	400	650	20	231	424	13
Port de Montréal (à partir de 11,0 m)	330	560	18	185	430	12
Montréal-Sorel (11,3 m)	1 250	2 500	55	660	1 500	30
Lac Saint-Pierre (11,3 m)	295	885	10	230	700	8
Trois-Rivières – Bécancour (11,3 m)	66	230	5	40	70	4
Total	2 341	4 825	108	1 346	3 124	67
Total Sect. 11,3 m	1 611	3 615	70	930	2 270	42
DSHF	191	435	7,8			

* La superficie totale du tronçon Montréal – Bécancour est de 38 161 000 mètres carrés.

Note : Les coûts estimés incluent la mise en dépôt des sédiments mais pas les coûts de décontamination ni ceux de la compensation des pertes en habitat du poisson qui s'ajouteraient à ce total.

Les calculs incluent les secteurs du port de Montréal où les profondeurs maintenues sont inférieures à 11,3 mètres (secteurs maintenus à 10,7 et à 11,0 mètre). Étant donné que le volume de sédiments à draguer dans ces deux secteurs équivaut au tiers du volume total du tronçon Montréal-Bécancour, des options autres que le dragage mériteraient d'être évaluées pour ces endroits. La ligne ombragée du tableau 3 indique les valeurs obtenues en conservant seulement les secteurs maintenus à 11,3 mètres. Les coûts seraient ainsi

réduits à 70 millions de dollars pour le scénario CS et à 42 millions de dollars pour le PCS. La dernière ligne du tableau illustre à titre comparatif les valeurs obtenues lors du dragage sélectif des hauts-fonds. Il faut rappeler que ce dragage visait à approfondir de 11 à 11,3 mètres le chenal de navigation aux endroits où cette profondeur n'était pas atteinte. En conséquence, ce dragage s'apparentait davantage à un dragage d'écrêtement des hauts-fonds.

Cette comparaison permet d'estimer que, pour le scénario le plus pessimiste (CS), le volume de sédiments à prélever serait de près de 8,5 fois supérieur à celui dragué lors du dragage sélectif des hauts-fonds. Il serait environ cinq fois supérieur pour le scénario PCS. Les volumes estimés peuvent donc apparaître considérables, particulièrement pour le scénario le plus pessimiste (CS). Les coûts seraient à peu près du même ordre, soit neuf et cinq fois supérieurs à ceux du dragage sélectif des hauts-fonds. Ces coûts ont par contre été estimés en fonction d'une seule opération d'approfondissement. Si la procédure choisie privilégiait un dragage séquentiel, c'est-à-dire en plusieurs étapes, les coûts seraient plus élevés.

Quand on observe les travaux de dragage qui se font ailleurs dans le monde, on constate que certains impliquent des volumes de sédiments qui sont de loin supérieurs à ceux estimés ici et qu'ils ne sont pas effectués dans le contexte d'une adaptation aux changements climatiques. À titre d'exemple, il s'est dragué en moyenne pour la période 1997-2002, près de 1,5 million de mètres cubes de sédiments annuellement pour maintenir le chenal de navigation de l'estuaire de la rivière Fraser (FREMP, 2002). Le projet d'approfondissement d'un des chenaux d'approche du port de Londres, le chenal Princes, implique l'extraction de quelque 2,5 millions de mètres cubes de matériaux (Port of London Authority, 2004). La seconde phase des travaux d'élargissement et d'approfondissement du fleuve Yangzi en Chine nécessitera l'enlèvement de 7,3 millions de mètres cubes de sédiments sur les 73 kilomètres de longueur de la voie navigable (Dredging News Online, 2005). Aux États-Unis, le Corps des ingénieurs et les compagnies privées de dragage retirent annuellement entre 190 et 230 millions de mètres cubes de matériaux dans les chenaux de navigation agréés par le Congrès (American

Association of Port Authorities, 2003). Il existe également plusieurs projets d'approfondissement dans les ports internationaux à conteneurs pour qu'ils soient en mesure d'accueillir la génération de navires post-panamax. Ces derniers requerront de faire passer la profondeur des chenaux de 13,7 mètres à 16,1 mètres (American Association of Port Authorities, 2005). Ces quelques exemples permettent de mettre en perspective l'option du dragage relativement aux changements climatiques.

2.3.1.2 Aspects environnementaux et sociaux

Un ensemble de lois et de règlements encadre les processus d'évaluation environnementale de tout projet de dragage. Dans le cas d'un dragage de capitalisation, le promoteur doit fournir plusieurs études qui couvrent aussi bien les raisons d'être du projet et les caractéristiques du milieu physique où le dragage sera effectué que les impacts environnementaux et socio-économiques qui peuvent en découler. Les impacts environnementaux des activités de dragage résultent de l'excavation des sédiments, de leur transport ainsi que de leur mise en dépôt. De manière générale, ces impacts consistent en une augmentation de la turbidité de l'eau, une hausse de la concentration des matières en suspension, la dispersion de contaminants et, dans certains cas, une hausse de la demande chimique en oxygène, une baisse de l'oxygène dissous et une dispersion accrue des éléments nutritifs. Sur le plan biologique, on note l'ensevelissement ou la perturbation de la faune benthique, l'étouffement des œufs ou larves de poissons, la perte temporaire ou permanente d'habitats et l'exposition des organismes à des contaminants toxiques. Les activités récréatives et commerciales qui dépendent des ressources biologiques peuvent elles aussi être affectées. Pour faire face à ces impacts, il existe toutefois diverses mesures d'atténuation, dont l'efficacité dépend souvent du contexte propre au milieu concerné (Environnement Canada, 1994).

Les réticences des citoyens à l'égard des activités de dragage tournent autour de la justification même des projets et de leurs impacts sur les écosystèmes. Concernant la justification des projets, leurs réticences reposent généralement sur l'idée que certains armateurs veulent construire des navires plus imposants seulement pour rentabiliser davantage les transits. Cette tendance est notable actuellement pour les ports côtiers qui

veulent accueillir les navires de type post-panamax. Elle s'applique moins cependant dans les ports situés dans les voies d'eau intérieures où l'idée d'utiliser des navires plus petits fait de plus en plus son chemin. Quant aux impacts sur les écosystèmes, les inquiétudes se situent autant sur les plans biologique (modification du milieu) et toxicologique (contamination du milieu) qu'humain (perturbation des secteurs de pêche).

Lors du dragage sélectif des hauts-fonds, la proposition la plus fréquemment avancée était de demander à la Commission mixte internationale de hausser les niveaux d'eau en laissant passer plus d'eau au barrage Moses-Saunders (Les Consultants Jacques Bérubé inc., 1997). Une autre solution souvent proposée est de faire arrêter les navires à fort tirant d'eau dans des ports disposant des profondeurs naturelles suffisantes. Cette option sera décrite un peu plus loin sous l'angle du réaménagement portuaire (section 2.5).

Dans un contexte de changements climatiques, il importe que chaque option soit considérée à la lumière des principes du développement durable. Dans ce contexte, l'option du dragage ne constitue probablement pas la solution idéale si une baisse des niveaux d'eau devenait récurrente. Cependant, elle pourrait s'avérer une option transitoire dans un processus d'adaptation à long terme. Elle devra cependant faire l'objet d'une planification détaillée, et il faudra s'assurer de mettre à contribution tôt dans ce processus tous les intervenants concernés (Groupe de travail sur la gestion intégrée du dragage et des sédiments, 2004).

2.3.2 Ouvrages de régularisation

2.3.2.1 Revue de littérature préliminaire sur les projets d'aménagement fluvial

Dans un premier temps, une revue de littérature a été effectuée pour situer les endroits où les décideurs publics avaient considéré d'ériger des ouvrages de régularisation pour rehausser les plans d'eau pour les besoins de la navigation en rapport avec les impacts des changements climatiques. Que ce soit en Europe, aux États-Unis ou au Canada, la plupart des structures répertoriées visaient principalement à empêcher la sédimentation ou à protéger les rives contre l'érosion (Consultants Ropars, 2005). Le port d'Anvers s'est avéré une exception; des digues longitudinales y ont été construites afin d'optimiser l'écoulement et le maintien des profondeurs dans le chenal navigable. De grandes écluses ont également été érigées à cet endroit pour permettre aux navires de 15,5 mètres d'accéder aux postes à quai (Consultants Ropars, 2005).

En fonction de la proximité des mers et océans, certains ouvrages sont aménagés en vue de se protéger contre les tempêtes de marée qui peuvent provoquer des inondations importantes. On trouve ci-dessous deux exemples de ce type de structure.

À gauche, barrage mobile sur la Tamise situé au sud-est de Londres et érigé pour protéger la ville contre les inondations^a. À droite, barrage de Maeslant, Hollande, en position fermée^b

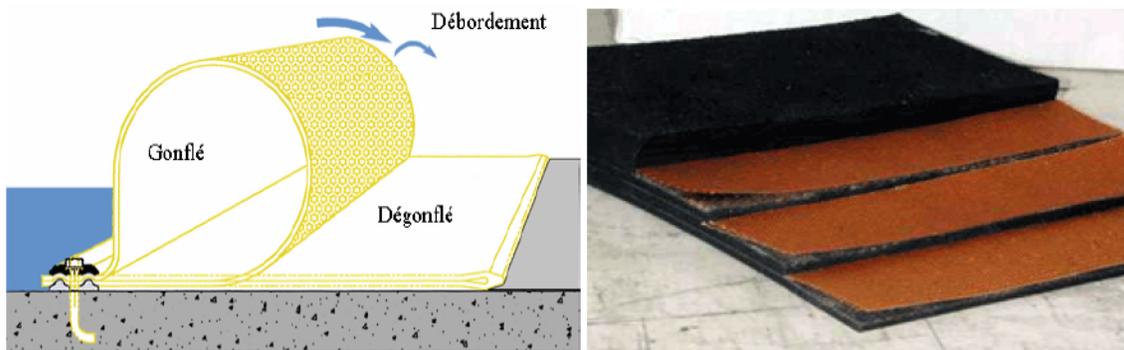


^a <http://www.travellondon.com/templates/attractions/barrier.html>

^b http://www.keringhuis.nl/engels/home_noflash.html

Un autre type de structure qui est exploité depuis les années cinquante est le barrage gonflable. Ce barrage est utilisé à différentes fins, notamment pour rehausser des seuils, créer des lacs artificiels, agir comme obstacle à la remontée des eaux salées dans les estuaires, contrôler les inondations et remplacer des systèmes de vannes (Consultants Ropars, 2005). La figure 15 donne un aperçu du fonctionnement du barrage de même que des matériaux qui le constituent.

Figure 15 – Fonctionnement du barrage gonflable : à gauche, le gonflement se fait par injection d'air; à droite, membranes à couches multiples utilisées^a.



^a http://www.trelleborgqr.com/Content/Product_Flexidam4.asp

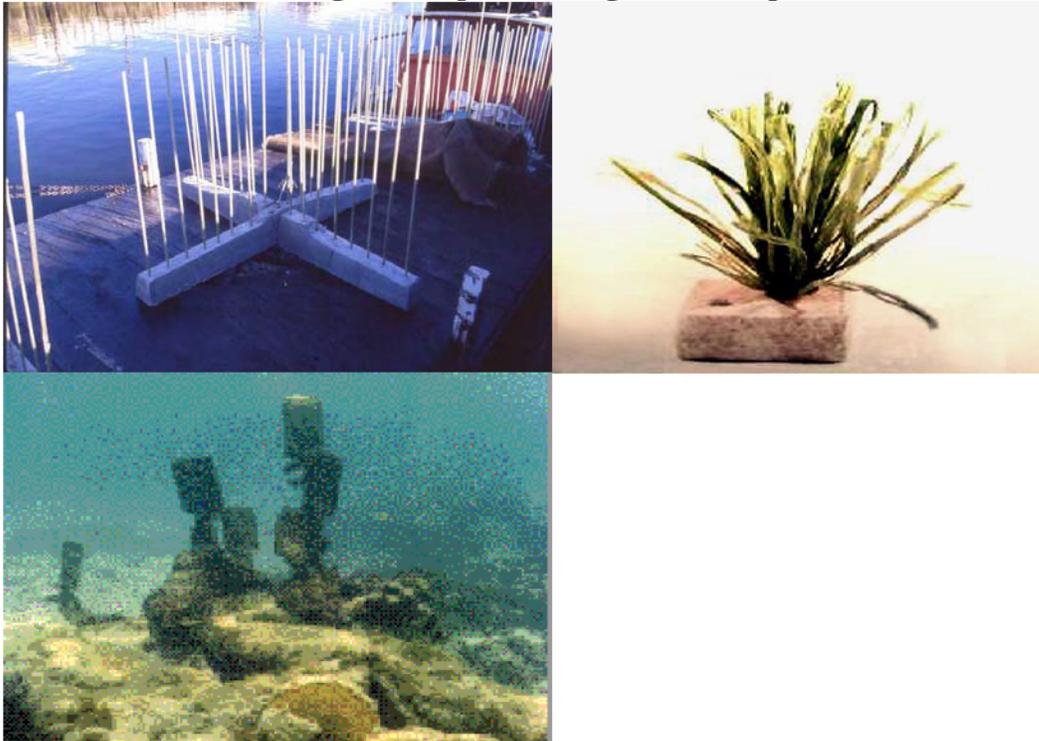
Le principal avantage de ces structures réside dans leur mobilité. Elles peuvent de ce fait être utilisées sur une base ponctuelle, lorsque les événements le requièrent, et libérer par la suite le plan d'eau. Ce sont des options très intéressantes pour la navigation, mais difficilement applicables au Saint-Laurent à cause, entre autres, de ses dimensions et du régime des glaces. Cependant, elles pourraient servir d'inspiration pour de futures solutions adaptées aux conditions du fleuve.

Une autre méthode pour rehausser les niveaux d'eau consiste à augmenter le coefficient de frottement au fond des cours d'eau par différents obstacles. L'écoulement ainsi ralenti provoque une rétention de l'eau en amont. L'augmentation de la rugosité (frottement) du fond peut se faire en remplaçant un fond sablonneux par des pierres ou des galets ou par l'accroissement de la végétation aquatique (Consultants Ropars, 2005). Favoriser la croissance d'algues naturelles peut comporter plus d'inconvénients, à cause de l'envahissement écologique, que d'avantages, et constitue difficilement, de ce fait, une

solution durable. De plus, la période de croissance étant limitée dans le temps, il demeure incertain que l'effet de rehaussement désiré se produira au moment optimal.

Une solution à cet inconvénient serait l'utilisation d'algues artificielles (Consultants Ropars, 2005). Différents modèles ont été conçus (figure 16) pour répondre à des besoins particuliers. L'efficacité de ces plantes artificielles pour relever le niveau d'eau est étroitement dépendante de la superficie et de la hauteur d'eau à couvrir. En outre, ces plantes ont tendance à se dégrader avec le temps, ce qui implique des travaux d'entretien et de remplacement récurrents.

Figure 16– Différents types de plantes aquatiques artificielles utilisées pour rehausser les plans d'eau, prévenir l'érosion des berges ou réduire la sédimentation; récif artificiel en croix^a (en haut à gauche), algues artificielles montées sur un bloc de grès^b (en haut à droite); en bas à gauche unité d'algues artificielles huit mois après son installation : cette unité a commencé à se dégrader, et plusieurs algues ne sont plus à la verticale^c



^a <http://scaphpro.com/recifs.html>

^b Tiré de Schreider et al., 2003.

^c <http://www.unesco.org/csi/pub/source.ero11.htm>

L'utilisation de cette seule option dans le Saint-Laurent ne saurait apporter le rehaussement escompté (Consultants Ropars, 2005). Il faudrait combiner l'option des plantes à une ou plusieurs autres options pour atteindre des résultats concluants.

Cette brève revue de littérature montre d'une part qu'il n'y a pas de stratégie d'adaptation qui ait été proposée pour rehausser les plans d'eau pour les besoins de la navigation. D'autre part, les structures répertoriées sont difficilement utilisables sur le Saint-Laurent, compte tenu de ses caractéristiques hydrologiques et de sa dimension, sans qu'on leur apporte des ajustements majeurs. À moins que la situation ne devienne critique au point qu'on considère comme secondaires les coûts inhérents à l'érection de ces structures sur le fleuve, il appert que les solutions plus traditionnelles, comme la régularisation des débits au lac Ontario et le dragage, peuvent répondre aux besoins anticipés.

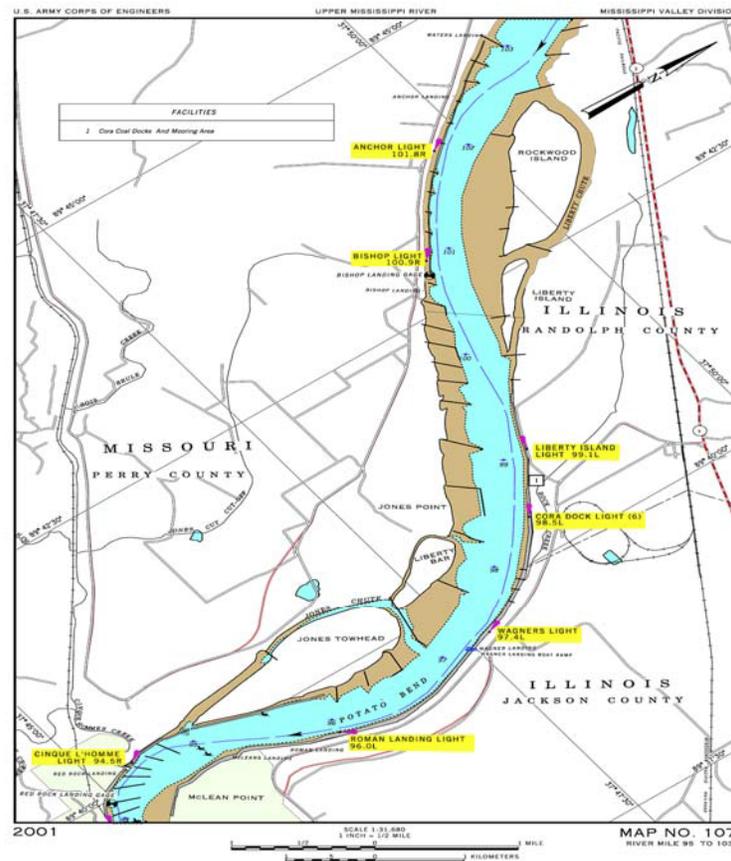
2.3.2.2 Sélection des ouvrages de régularisation pour le Saint-Laurent

Les ouvrages régulièrement mentionnés pour rehausser les plans d'eau pour les besoins de la navigation sont les épis, les digues longitudinales, les seuils, les barrages, les chenaux parallèles de même que les écluses (Consultants Ropars, 2005).

Les épis, ou digues transversales, sont relativement efficaces dans un environnement fluvial pour concentrer l'écoulement dans le chenal principal, stabiliser la géométrie du chenal, limiter les interventions de dragage d'entretien et protéger les berges contre l'érosion. En contrepartie, elles impliquent dans certains cours d'eau une artificialisation très importante, comme l'illustre la figure 17 (Consultants Ropars, 2005).

Les digues parallèles au cours d'eau, ou digues longitudinales, sont principalement destinées à prévenir le débordement lors des crues. Dans le fleuve Fraser (Colombie-Britannique) cependant, ces digues ont été utilisées dans la partie extérieure de l'estuaire pour éviter le déplacement du chenal de navigation et limiter le dragage.

Figure 17 – Digues transversales (en noir) sur les rives de la partie supérieure du Mississippi^a



^a Extrait de la carte nautique 107 – <http://www.mvr.usace.army.mil/navcharts/UMRNavChartsIdx05.asp>

L'érection de seuils est une autre option pour rehausser les niveaux d'eau. Ceux mis en place dans l'archipel des îles de Sorel en 1931 visaient à relever le plan d'eau à Montréal lors des périodes de basses eaux. Ces cinq seuils ont eu l'effet recherché. Les gains furent de 28,5 centimètres à Sorel lors des basses eaux et de 12,5 centimètres à Montréal (Simard, 1983). Le débit dans le chenal de navigation passa de 25 à 80 % par rapport au débit total. Ces seuils étaient cependant soumis à une érosion sévère, étant presque toujours submergés, et leur efficacité fut fortement amoindrie lors des basses eaux de 1964 (Simard, 1983). Les raisons de cette inefficacité sont la détérioration due à l'érosion et l'agrandissement de la section mouillée du chenal de 41 %. Les seuils furent reconstruits en 1965-1966.

Pour parvenir à augmenter le niveau de l'eau de 50 centimètres et plus, la construction de plusieurs seuils serait nécessaire, et ils devraient se situer dans les chenaux secondaires. De plus, il faudrait qu'ils bloquent efficacement la section mouillée du fleuve de façon à vraiment constituer un obstacle à l'écoulement de l'eau. Cela aurait différents impacts tant sur le plan environnemental que sur celui de la restriction aux plaisanciers à ces voies d'eau, car les seuils sont fixes et faits d'enrochement. Le lac Saint-Pierre est un endroit peu propice à l'implantation de structures lourdes compte tenu de ses caractéristiques géotechniques (Consultants Ropars, 2005) et de sa largeur. Certains secteurs en aval du lac pourraient cependant s'avérer plus propres à recevoir ces ouvrages et à optimiser leur efficacité.

Une option de rechange à ces seuils fixes serait des seuils gonflables qui ne seraient utilisés que lors des périodes d'étiage. La complexité de la mécanique de ce type de structure incitera toutefois à limiter leur nombre et à les placer à des endroits relativement près des rives pour que les dispositifs de fonctionnement puissent être accessibles et protégés (Consultants Ropars, 2005).

Une des solutions les plus efficaces pour gérer les niveaux d'eau est la construction d'un barrage. Deux barrages sont en activité en amont de Montréal sur le fleuve soit celui de Moses-Saunders à Cornwall et celui de Beauharnois. Il n'y en a aucun à l'aval. Le secteur le plus favorable à l'implantation d'une telle structure serait à la sortie du lac Saint-Pierre, là où le fleuve se rétrécit (Consultants Ropars, 2005). Ce barrage devrait être muni d'une écluse pour permettre la circulation des navires. Différentes contraintes sont associées à la construction d'un barrage sur le fleuve; elles seront abordées un peu plus loin. Une solution combinant un seuil complet, une écluse et des structures gonflables pourrait faire l'objet d'une étude plus approfondie. Les seuils remplaceraient le barrage et seraient la plupart du temps submergés. Le barrage gonflable pourrait être fixé sur la crête du seuil et déployé lors des périodes d'étiage (Consultants Ropars, 2005).

Au sujet de la faisabilité technique de l'écluse, l'exemple du port d'Anvers (500 m x 68 m) démontre qu'il est possible de construire ce type de structure de grande dimension à

l'aval du lac Saint-Pierre. Cette écluse devrait cependant être couplée à un barrage, compte tenu de la largeur du fleuve à cet endroit (Consultants Ropars, 2005).

Parmi les options énumérées ci-dessus, certaines n'ont pas été retenues pour l'instant, notamment celle qui fait intervenir une modification de la rugosité du fond (enrochement, algues artificielles) et celle des seuils modulables gonflables, compte tenu de l'absence d'information. L'augmentation de la rugosité nécessiterait une intervention massive, en nombre de plantes, dont les conséquences sur l'habitat benthique pourraient surpasser les gains. De plus, l'incertitude demeure au sujet de la capacité de cette solution à relever le niveau d'eau suffisamment pour compenser la perte anticipée (Consultants Ropars, 2005). Concernant les seuils gonflables, plusieurs difficultés associées à cette option la rendent moins pratique. Il faudrait prévoir une ou deux séries de ces seuils en paire pour qu'ils fonctionnent un peu comme une écluse. De plus, au préalable, des digues latérales transversales devraient être mises en place et des seuils de béton coulés dans le fond du fleuve pour servir de support. Une mécanique complexe servant à contrôler le remplissage et la vidange de ces barrages devrait aussi être installée. Les risques de défaillance des systèmes mécaniques, les coûts d'entretien et l'absence d'une garantie de durabilité d'une telle installation, particulièrement sous l'effet des glaces, s'ajoutent à l'incertitude. Finalement, ce type d'ouvrage ne semble pas exister ailleurs dans le monde à cette échelle (Consultants Ropars, 2005).

Les options qui ont donc été retenues pour une première étude sont les suivantes :

- 1- Des digues transversales et longitudinales fermant partiellement la section mouillée du fleuve.
- 2- Un barrage avec écluse.

Elles visent à relever le niveau d'eau de la sortie du lac Saint-Pierre jusqu'à Montréal d'au moins 50 centimètres.

2.3.2.3 Géométrie des ouvrages et emplacement

A) Digues transversales et longitudinales

Les digues transversales qui sont modélisées sont du type seuil en enrochement. Elles concentrent l'écoulement dans le chenal principal lors des périodes de basses eaux et sont submergées lors des périodes de crues (Consultants Ropars, 2005). Elles sont réparties le long du chenal principal et, s'il y a lieu, dans les chenaux secondaires. Des simulations ont été effectuées avec une ouverture des digues à 250 mètres et à 120 mètres. L'ouverture à 120 mètres nécessiterait une gestion particulière du trafic maritime, pour des raisons de sécurité, obligeant le passage d'un seul navire à la fois. Les figures 18, 19 et 20 donnent un aperçu de la géométrie de ces structures.

Figure 18 – Coupe longitudinale d'une série de digues à 250 m (en haut) et à 120 m (en bas) d'ouverture (source : Consultants Ropars, 2005. Adaptation : D'Arcy, 2005)

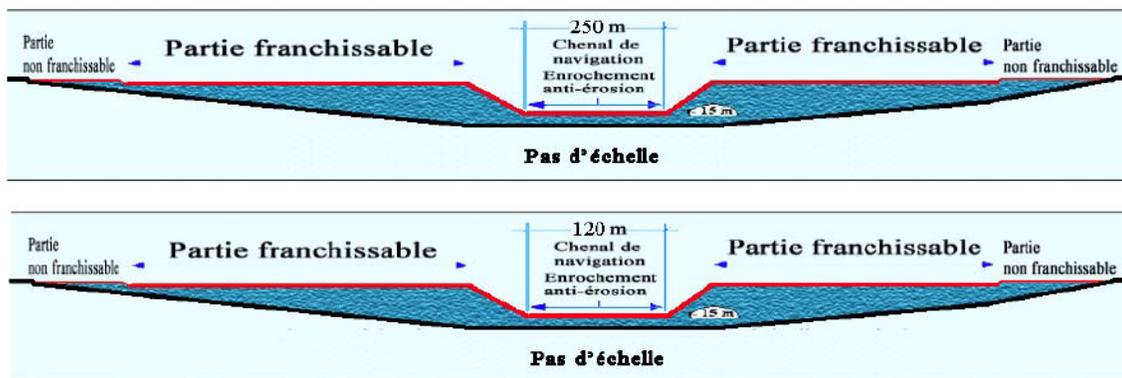


Figure 19 – Coupe transversale des parties non franchissables des digues (source : Consultants Ropars, 2005. Adaptation : D'Arcy, 2005)

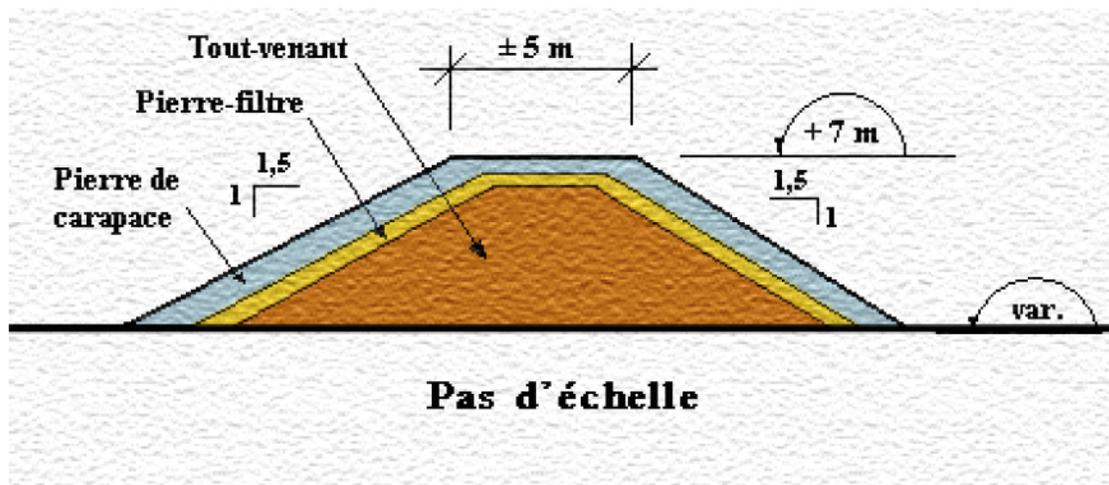
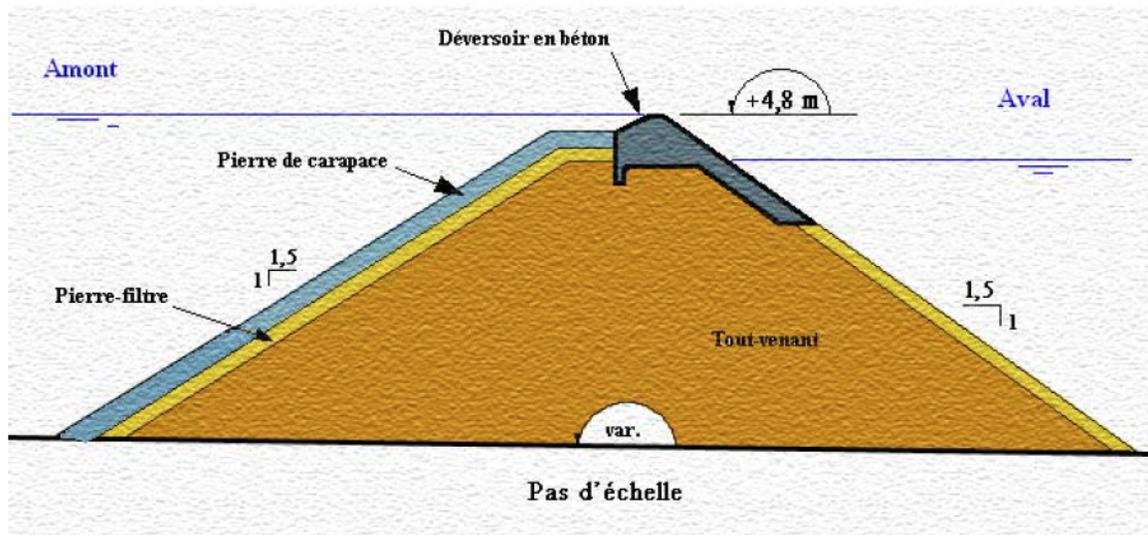


Figure 20 – Coupe transversale des parties franchissables des digues (Source : Consultants Ropars, 2005. Adaptation : D’Arcy, 2005)



Une autre modélisation a été faite avec un ouvrage du même type mais constitué de digues transversales et de digues longitudinales longeant le chenal de navigation sur une longueur de 7 kilomètres et reliées aux digues transversales. Cette section a été conçue en ligne droite pour des raisons de sécurité et restreint par conséquent la largeur de la voie navigable à 120 mètres. Les parois latérales présentent une forte rugosité, étant construites en pierres de carapace de 1 à 3 tonnes (Consultants Ropars, 2005). Les paramètres géométriques de ces digues sont similaires à ceux des digues transversales et la largeur à la base serait d’une cinquantaine de mètres.

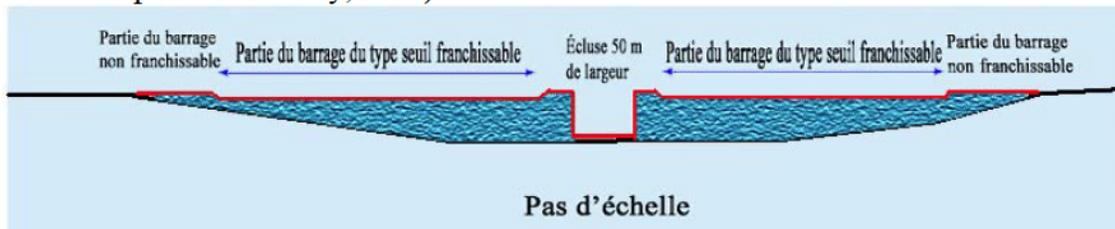
B) Barrage

Tel que mentionné précédemment, le barrage serait combiné à une écluse et serait situé en aval du lac Saint-Pierre, mais en amont du pont Laviolette pour préserver l’effet de rétention d’eau exercé par les piliers du pont (Consultants Ropars, 2005). La construction d’un tel ouvrage serait toutefois très difficile de par la dimension des structures, les conditions naturelles (en particulier en hiver) et le fait qu’il y aura sans doute une interruption temporaire ou un ralentissement important de la navigation le temps de mettre l’écluse en fonction (Consultants Ropars, 2005). Le barrage devrait pouvoir évacuer les glaces lors de la débâcle et limiter les risques d’inondation. Des dispositifs

tels qu'un seuil, des estacades ou des rideaux de bulles devraient donc être mis en place pour que le barrage ne provoque pas d'embâcles (Consultants Ropars, 2005).

Étant donné qu'un barrage est un obstacle infranchissable pour une bonne partie des espèces de la faune aquatique, il devrait inclure à tout le moins des dispositifs qui permettent la libre circulation entre les parties aval et amont. La présence des seuils devrait faciliter cette circulation, quoique d'autres dispositifs, comme les passes migratoires, mériteraient d'être explorés pour limiter au maximum les impacts. La figure 21 illustre la géométrie du barrage.

Figure 21 – Coupe longitudinale du barrage avec écluse (Source : Consultants Ropars, 2005. Adaptation : D'Arcy, 2005)

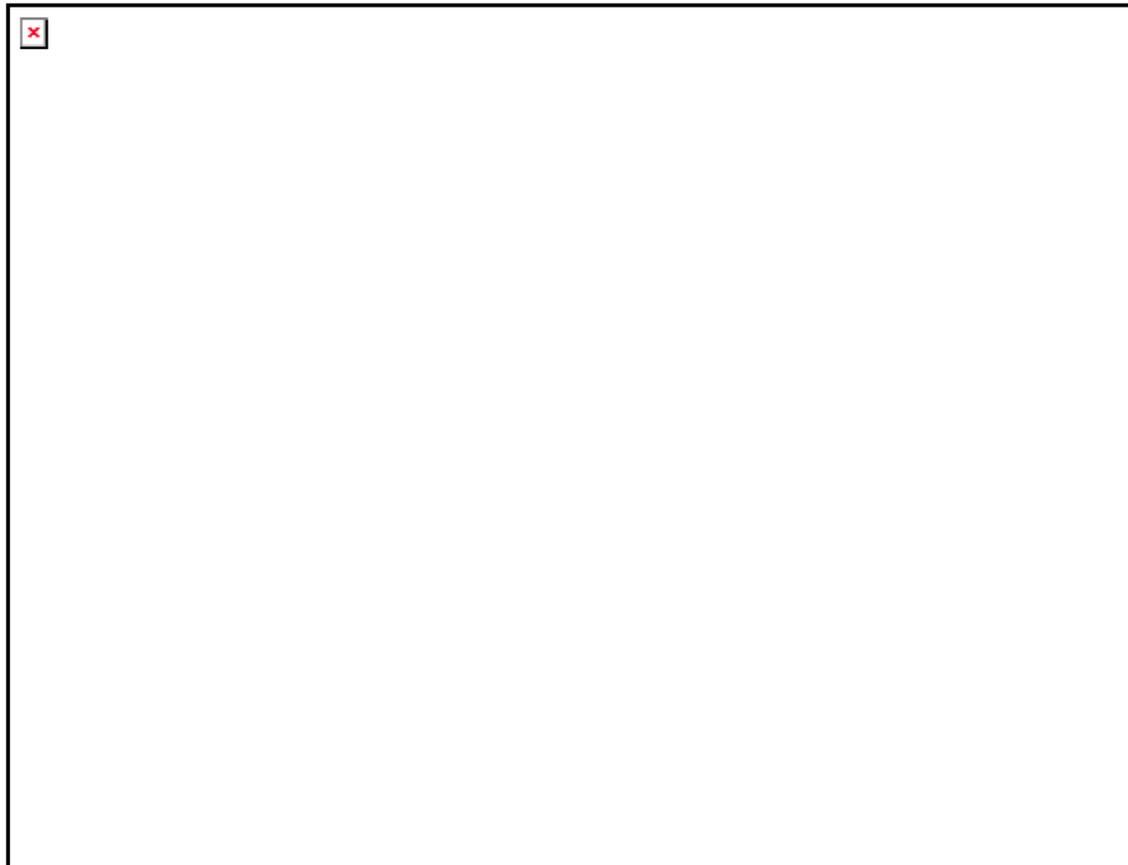


La coupe transversale des parties franchissables du barrage est identique à celle paraissant à la figure 20 ci-dessus.

C) Emplacement des ouvrages

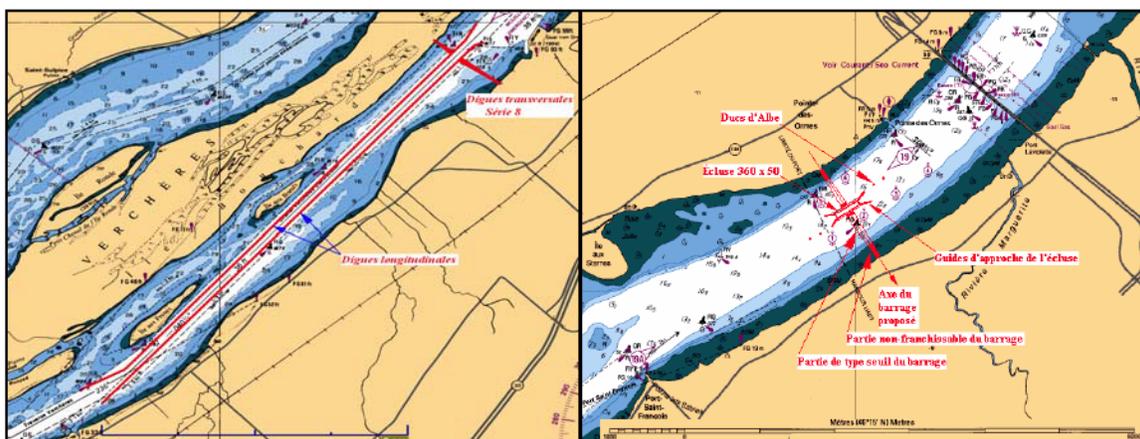
L'emplacement des ouvrages est un élément critique pour optimiser leur rendement tout en minimisant autant que possible les impacts environnementaux. Cinq digues transversales (#1a, 1b, 7, 8 et 9) ont été sélectionnées pour la modélisation, de même qu'une digue longitudinale (#8) et un barrage avec écluse. La figure 22 illustre l'emplacement de ces ouvrages dans le tronçon Montréal-Trois-Rivières. Il est à noter que la digue #1a est située au même endroit que le barrage.

Figure 22 –Emplacement des ouvrages hydrauliques



La figure 23 présente une vue à plus grande échelle de la digue #8 longitudinale et du barrage avec écluse.

Figure 23 –Représentation à plus grande échelle de la digue #8 longitudinale (à gauche) et du barrage avec écluse (à droite) (tiré de Consultants Ropars, 2005)

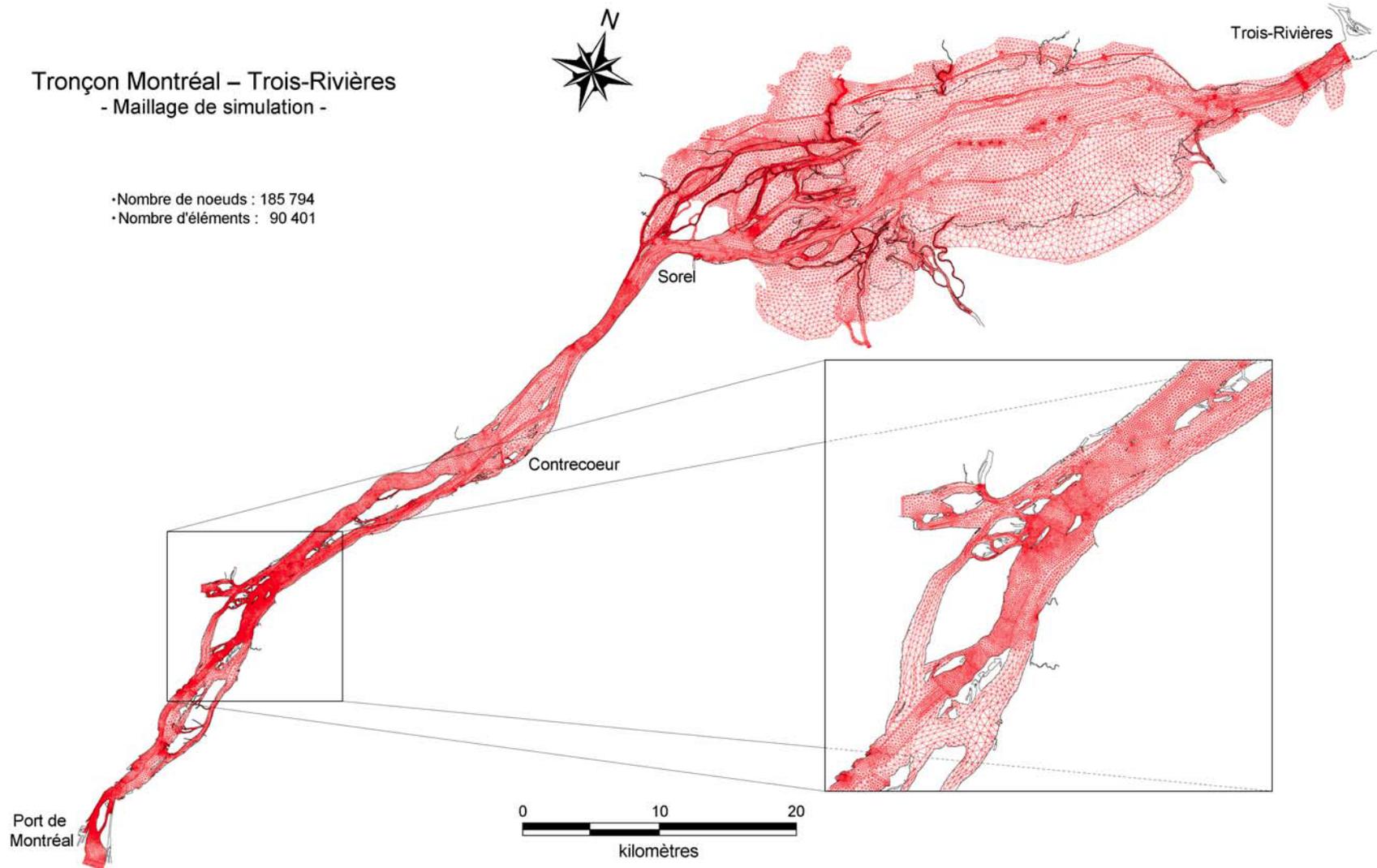


2.3.2.4 Modélisation hydraulique - méthodologie

L'évaluation de l'efficacité relative des ouvrages a été faite par le moyen de simulations numériques effectuées à l'aide du modèle hydrodynamique bidimensionnel Hydrosim conçu à l'INRS-Eau. Le modèle calcule les vitesses d'écoulement de même que les profondeurs d'eau par la méthode des éléments finis. Les simulations mettent à profit le modèle numérique de terrain (MNT) du fleuve élaboré par Environnement Canada (Fortin, 2002; Fortin et al., 2004). La mise en forme des jeux de données géospatiales servant à la confection du MNT se fait avec le logiciel *Modeleur*, également conçu à l'INRS-Eau. D'autres outils ont servi à la confection des ouvrages hydrauliques dont le système d'information géographique *Mapinfo* et le chiffrier *Excel* (Doyon et al., 2005).

Le territoire d'étude sur lequel le modèle est appliqué s'étend sur 130 kilomètres entre le port de Montréal et Trois-Rivières. Le maillage couvrant le secteur est illustré à la figure 24. Il est constitué de 185 794 nœuds et de 90 401 éléments.

Figure 24 – Maillage de simulation couvrant le territoire d'étude (tiré de Doyon et al., 2005)



Les données bathymétriques utilisées proviennent du Service hydrographique du Canada pour les zones profondes et du Service météorologique du Canada – Hydrologie pour les zones peu profondes. L'ensemble du jeu de données a été assemblé par le Service météorologique du Canada. La portion terrestre du territoire d'étude a été obtenue par laser aéroporté (Fortin et al., 2002). Le modèle numérique d'élévation en résultant donne une représentation exhaustive du territoire d'étude (figure 25).

La rugosité des différents matériaux détermine la valeur locale du coefficient de frottement de Manning dans le modèle hydrodynamique (Doyon et al., 2005). La figure 26 illustre la carte des rugosités qui en résulte, présentée sous forme de coefficients de frottement (n de Manning), et qui est appliquée dans le modèle hydrodynamique. Il est à noter qu'on a assigné aux secteurs couverts de végétation un coefficient de frottement identique (Doyon et al., 2005).

L'implantation des ouvrages hydrauliques dans le modèle est une étape très délicate car cela requiert de définir la jonction entre l'ouvrage lui-même et le lit du fleuve. L'objectif est de s'assurer qu'en chacun des points du maillage, seule la cote d'élévation la plus haute entre la digue et la profondeur fluviale est conservée (Doyon et al., 2005). L'annexe 2 donne un aperçu des étapes de conception et d'implantation des ouvrages dans le modèle.

Le calibrage des paramètres du modèle hydrodynamique a été basé sur les événements hydrauliques des printemps 1996 et 1999. Ces événements représentent respectivement des épisodes de hautes et de basses eaux (Morin et al., 2001). La validation des résultats s'est faite par le contrôle des niveaux d'eau sur l'ensemble du territoire d'étude.

Les figures 27 et 28 comparent les niveaux d'eau obtenus par simulation à ceux mesurés pour les deux événements hydrauliques.

Figure 25 – Modèle numérique d'élevation du territoire d'étude (tiré de Doyon et al., 2005)

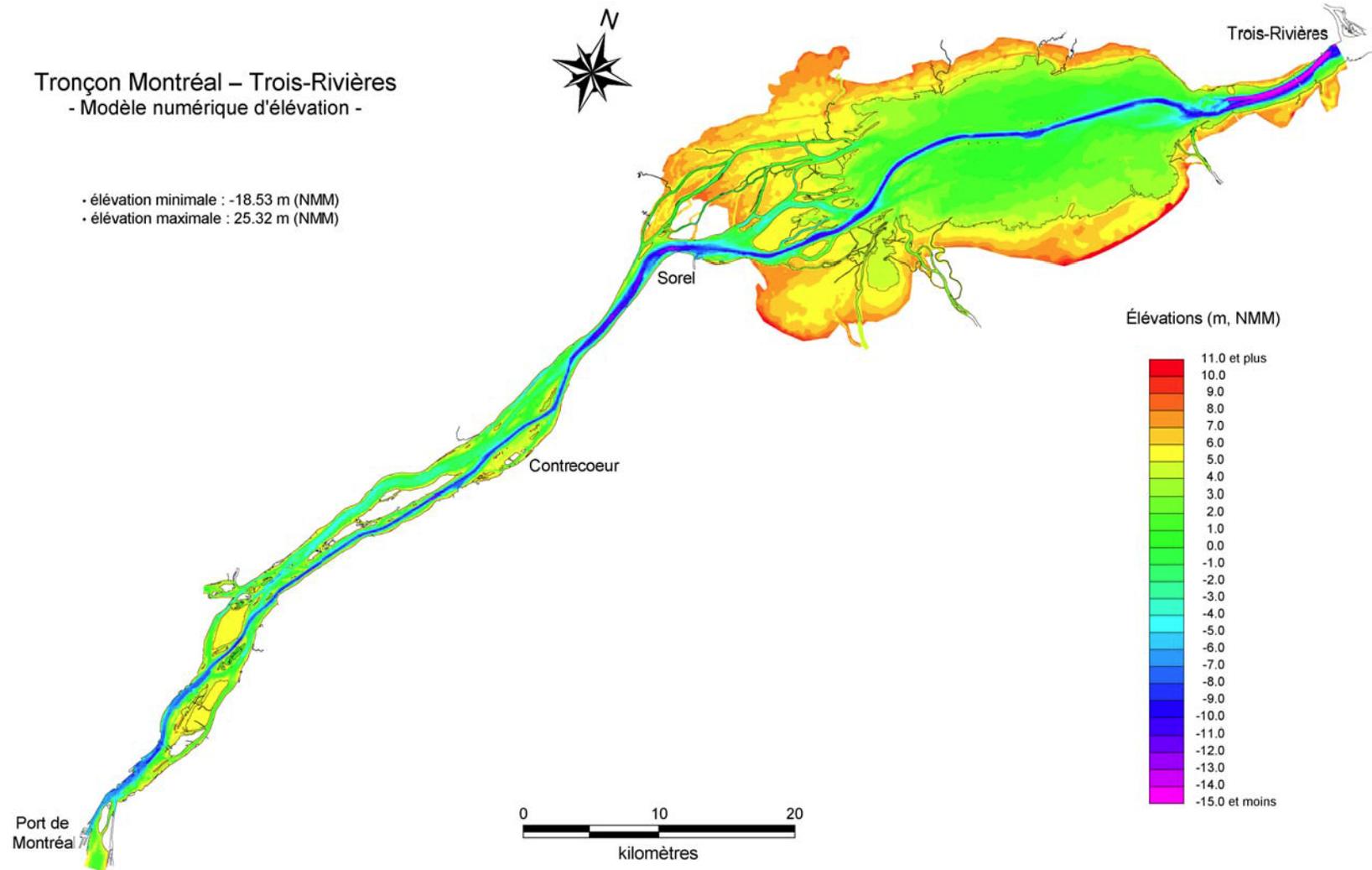


Figure 26 – Carte de la rugosité hydraulique (coefficient de frottement) du territoire d'étude (tiré de Doyon et al., 2005)

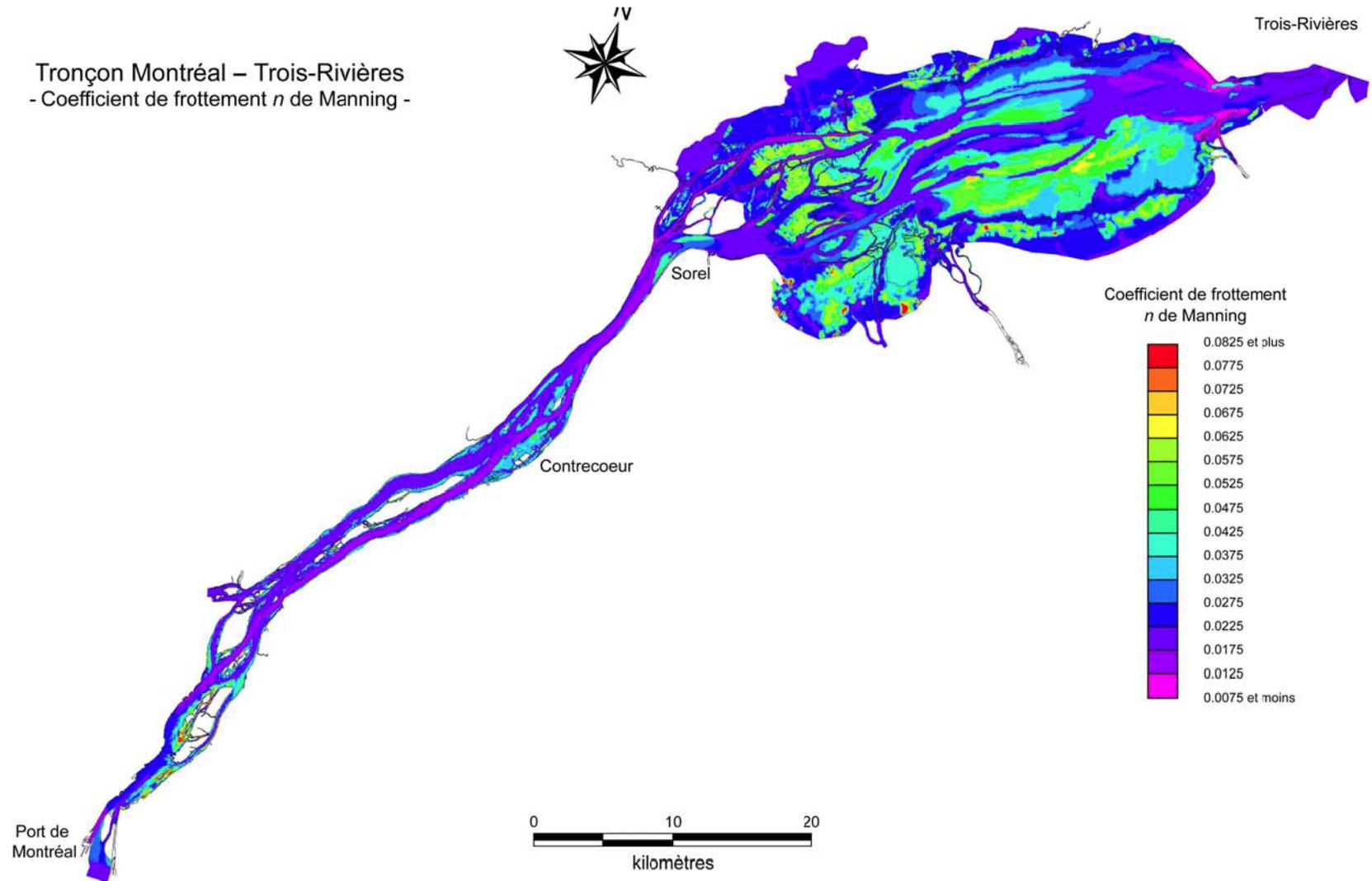


Figure 27 – Profils de la pente d'eau mesurée et de celle obtenue par simulation pour l'évènement hydraulique du printemps 1996 utilisé pour le calibrage (tiré de Morin et al., 2001)

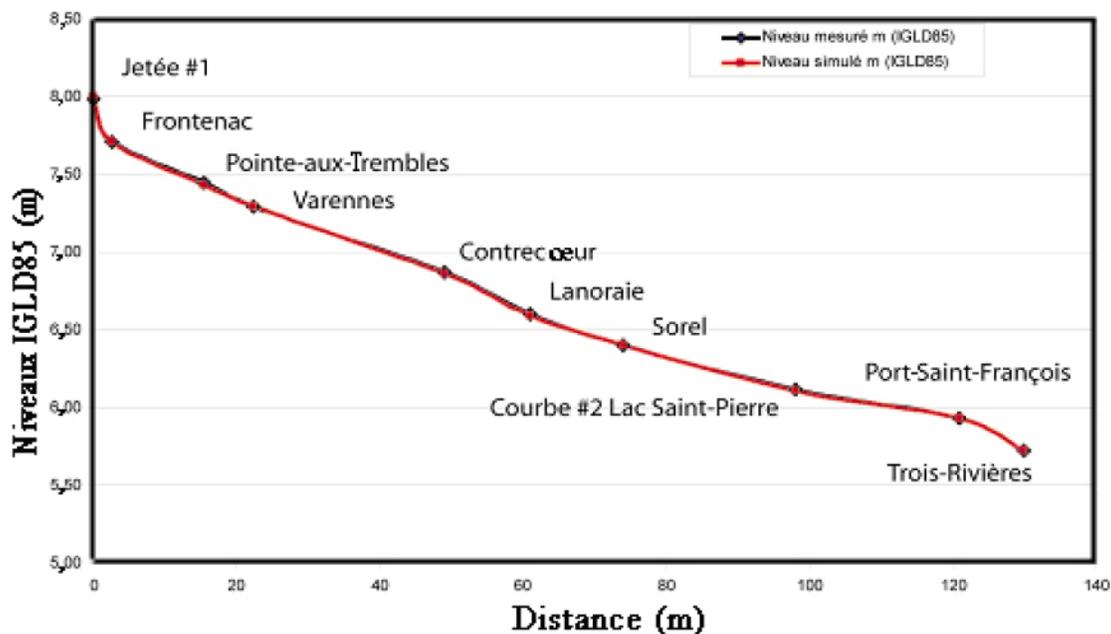
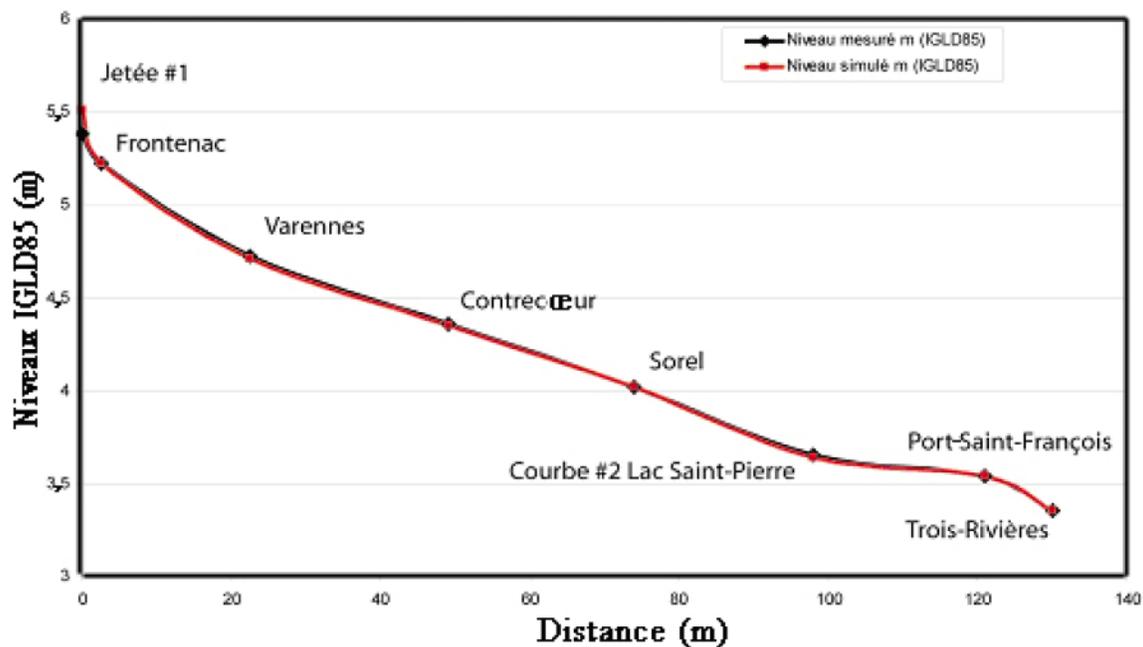


Figure 28 – Profils de la pente d'eau mesurée et de celle obtenue par simulation pour l'évènement hydraulique du printemps 1999 utilisé pour le calibrage (tiré de Morin et al., 2001)

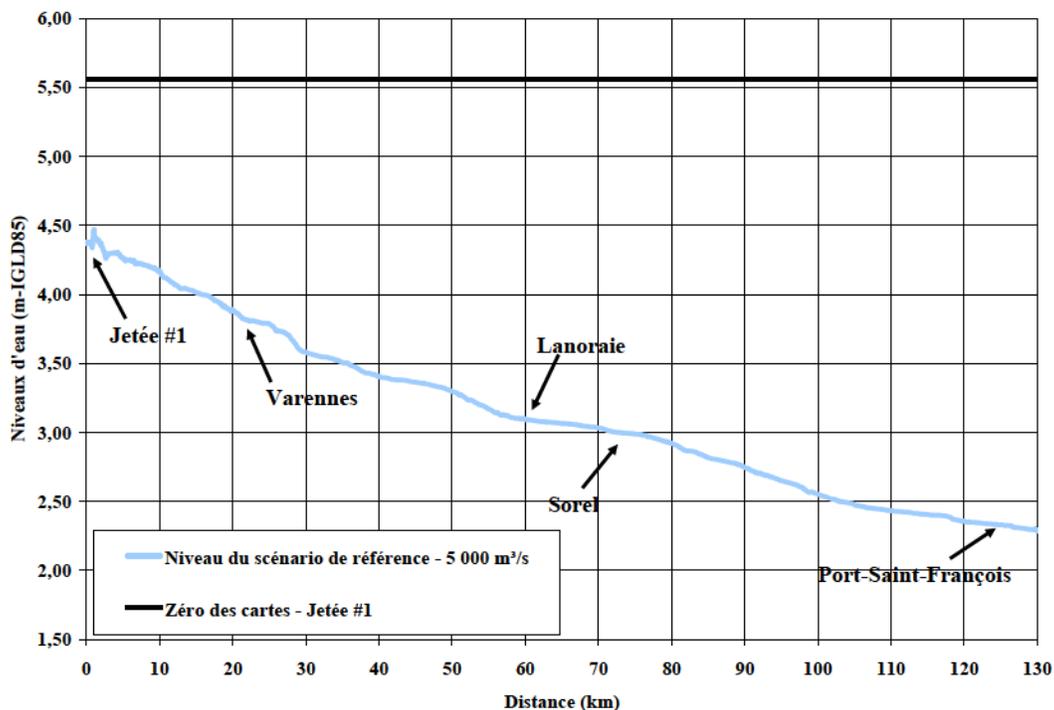


Les différences entre les niveaux mesurés et obtenus par simulation sont systématiquement inférieures à 2 centimètres pour l'ensemble des stations. Le modèle reproduit adéquatement la ligne d'eau de ce tronçon pour une gamme de valeurs de débits se situant à Sorel entre 7 600 et 14 500 mètres cubes par seconde (Doyon et al., 2005).

2.3.2.5 Modélisation hydraulique – résultats

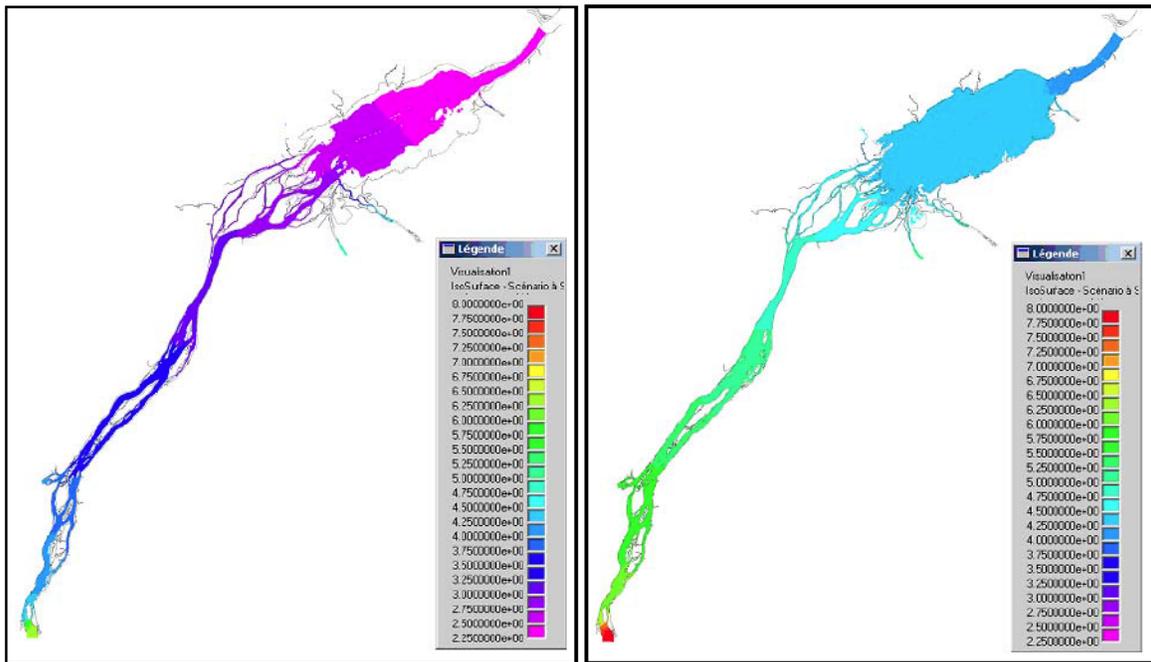
L'objectif initial était de simuler l'impact hydraulique des changements climatiques avec un débit de référence de 5 000 mètres cubes par seconde à Sorel. Cette simulation a produit une baisse du niveau d'eau d'un peu plus de 1 mètre sous le zéro des cartes (5,56 m) à Montréal. Cette diminution est conforme aux résultats obtenus par Lefavre pour le scénario le plus pessimiste (CS) illustré à la figure 8. La figure 29 présente la distribution spatiale des niveaux d'eau entre Montréal et Trois-Rivières selon ce débit de référence.

Figure 29 – Niveaux d'eau obtenus par simulation entre Montréal et Trois-Rivières selon le scénario de référence de 5 000 m³/s à Sorel (Adapté de Doyon et al., 2005)



L'efficacité des ouvrages hydrauliques à rehausser le plan d'eau pourra ainsi être évaluée pour des scénarios climatiques moyens (50 cm) et extrêmes (1 m). Deux éléments sont à prendre en compte relativement à la modélisation. D'une part, le débit de 5 000 mètres cubes par seconde équivaut à une diminution de 20% du débit minimal reconstitué et se situe, en conséquence, à l'extérieur de la plage de valeurs à partir desquelles se sont faits les calibrages. Ce type d'extrapolation est cependant une pratique courante pour évaluer les impacts des événements hydrauliques extrêmes du fait que les données pour estimer ces impacts sont inexistantes (Doyon et al., 2005). D'autre part, le scénario de référence est simulé avec un MNT caractérisé par la présence de plantes aquatiques dont la hauteur et la distribution sont basées sur les conditions habituellement observées durant les mois d'étiage prononcé. La récurrence d'un débit de 5 000 mètres cubes secondes calculée à partir des débits moyens journaliers et hebdomadaires du fleuve pour la période 1960-1998 serait d'environ 4 000 et 10 000 ans respectivement (Morin et Bouchard, 2001). Toutefois, la plage de temps sur laquelle l'estimation de la récurrence est basée de même que la faible probabilité que les conditions climatiques à venir soient similaires à celles ayant eu cours dans le passé, incitent à considérer cette estimation avec circonspection. La figure 30 compare le débit du scénario de référence avec le débit moyen enregistré à Sorel.

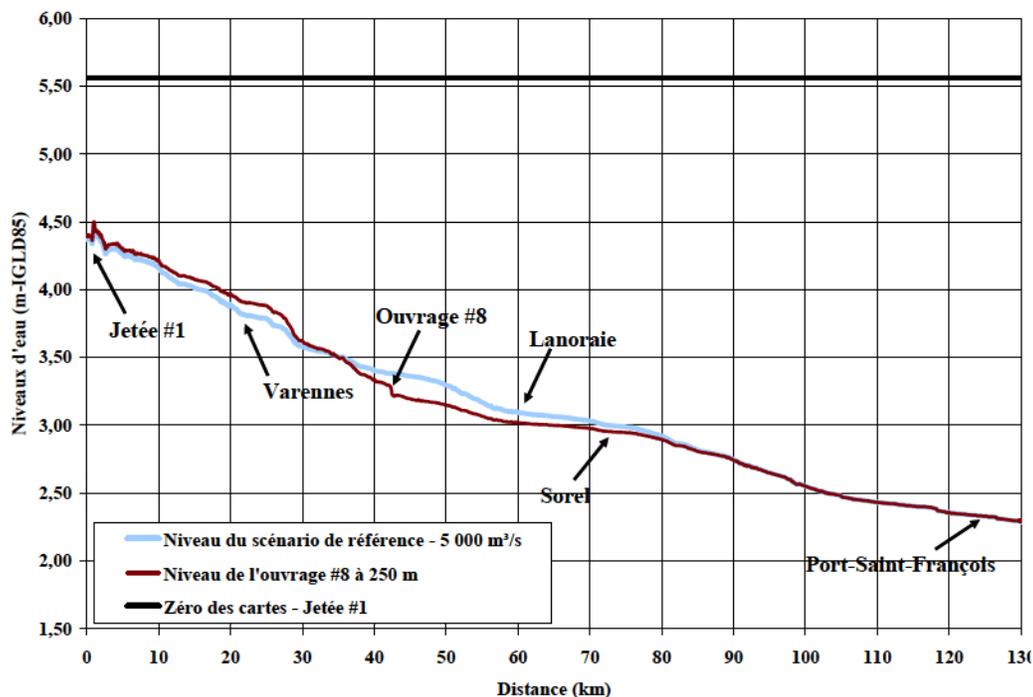
Figure 30 – Comparaison des niveaux d'eau obtenus selon le scénario de référence avec un débit de 5 000 m³/s à Sorel (à gauche) avec ceux obtenus avec un débit moyen de 9 500 m³/s (tiré de Doyon et al, 2005)



La comparaison entre la situation de référence et les conditions hydrologiques moyennes permet d'estimer la perte en habitats aquatiques qui adviendrait selon le scénario le plus pessimiste relativement aux changements climatiques. En fait, la superficie aquatique perdue équivaldrait pour le tronçon Montréal–Trois-Rivières à 160 kilomètres carrés, dont 131 kilomètres carrés pour le lac Saint-Pierre uniquement. La superficie du lac Saint-Pierre entre Sorel et Port-Saint-François est de 387 kilomètres carrés. C'est donc le tiers du domaine aquatique du lac Saint-Pierre qui serait ainsi asséché, et cela toucherait particulièrement les milieux humides.

Les premières simulations ont été effectuées avec la digue #8 à une ouverture de 250 mètres (figure 31).

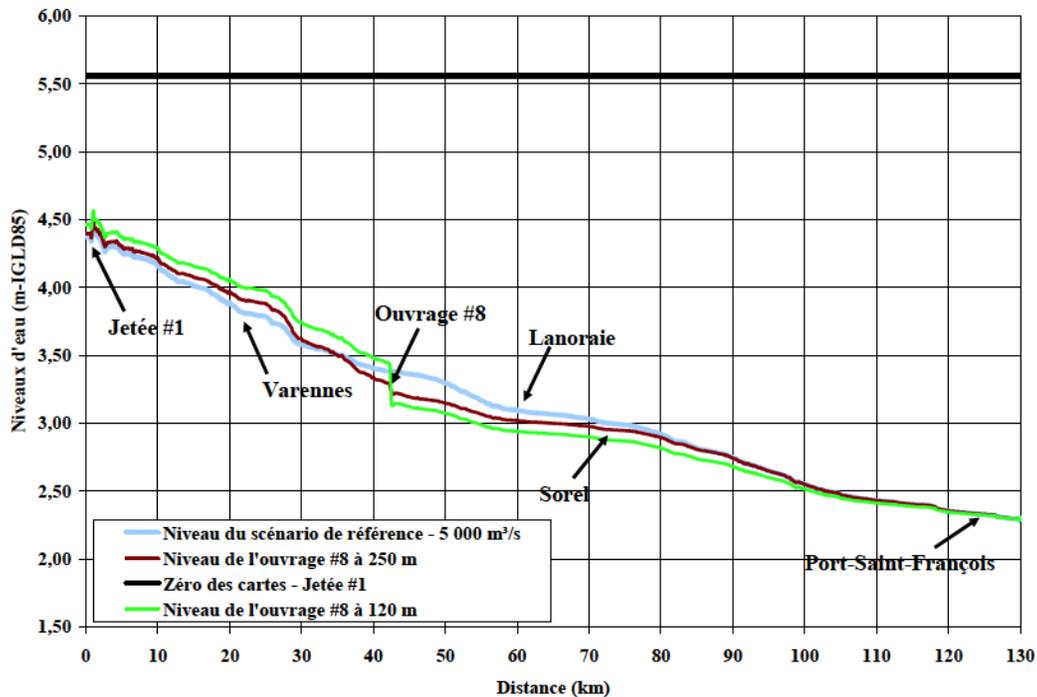
Figure 31 - Niveaux d'eau obtenus entre Montréal et Trois-Rivières selon le scénario de référence de 5 000 m³/s à Sorel avec l'ouvrage #8 à une ouverture de 250 m (source : Doyon et al., 2005. Adaptation : D'Arcy, 2005)



La figure 31 illustre qu'une digue seule avec une ouverture de 250 mètres ne parvient pas à rehausser significativement le niveau d'eau à Montréal. Les gains sont en fait à peu près nuls et, en plus, une dépression se produit en aval de l'ouvrage, diminuant le niveau d'eau de plus de 10 centimètres par rapport au niveau de référence. Cette dépression, qui s'échelonne sur une distance de près de 40 kilomètres, serait causée par l'accélération de l'écoulement qui se produit à la hauteur du rétrécissement causé par la digue et qui provoque un appel d'eau (Consultants Ropars, 2005).

Compte tenu de ce faible gain, les simulations ont porté sur le même ouvrage, mais en réduisant l'ouverture de la digue à 120 mètres.

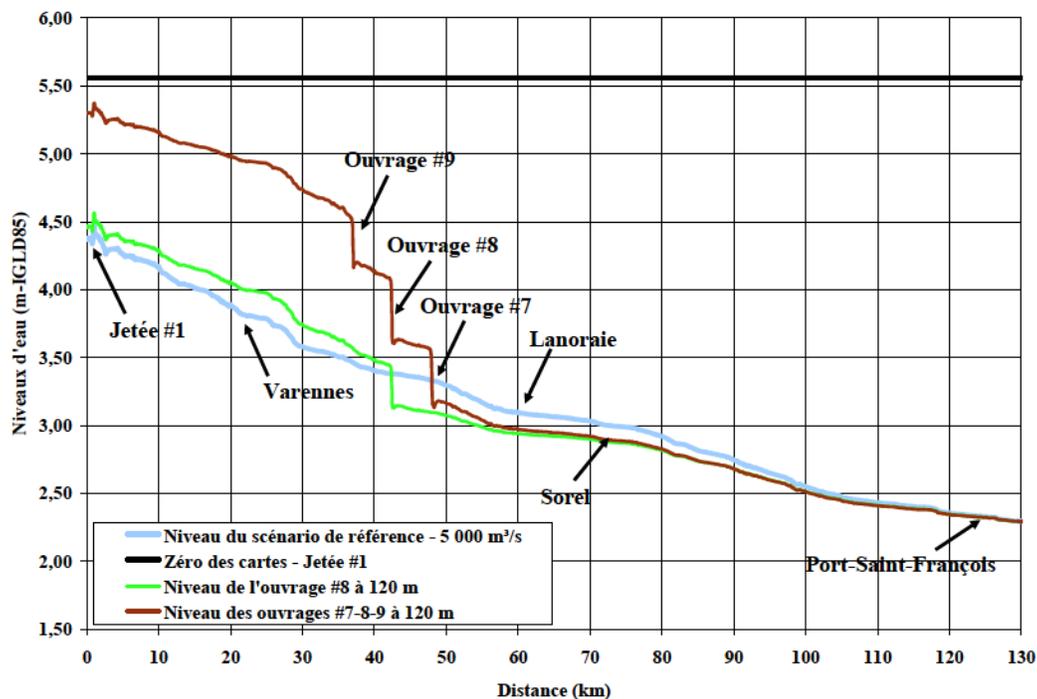
Figure 32 - Niveaux d'eau obtenus entre Montréal et Trois-Rivières selon le scénario de référence de 5 000 m³/s à Sorel avec l'ouvrage #8 à une ouverture de 120 m (source : Doyon et al., 2005. Adaptation : D'Arcy, 2005)



La figure 32 présente les résultats obtenus avec la digue #8 à une ouverture de 120 mètres en comparaison de ceux obtenus avec une ouverture de 250 mètres. Le gain est plus notable quand on rétrécit l'ouverture, mais il ne se situe qu'autour de 10 centimètres à Montréal. En contrepartie, la dépression en aval de l'ouvrage est plus grande que précédemment et s'étend sur plus de 60 kilomètres. L'objectif de rehausser le plan d'eau d'une cinquantaine de centimètres n'est donc pas atteint avec ces ouvrages individuels.

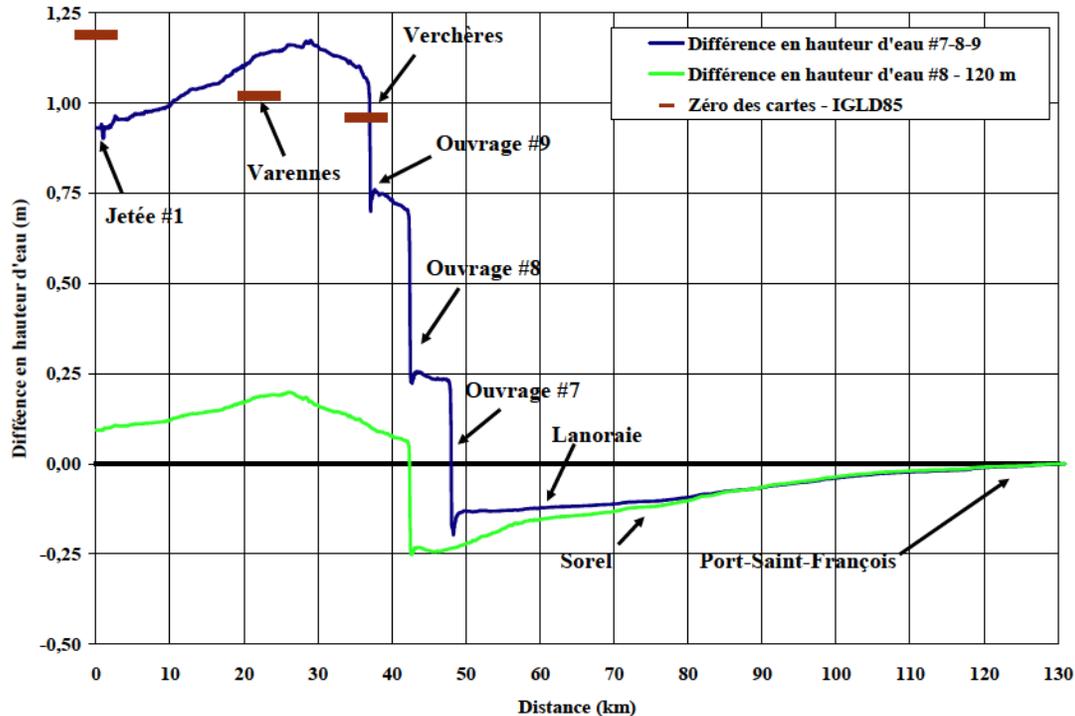
Afin de mesurer l'effet de synergie de plusieurs digues successives, une simulation a été effectuée avec les digues #7, 8 et 9 (figure 33). Les digues principales le long de la voie navigable ont une ouverture de 120 mètres, alors que les digues secondaires ont été considérées comme des obstacles à l'écoulement (Consultants Ropars, 2005).

Figure 33 - Niveaux d'eau obtenus entre Montréal et Trois-Rivières selon le scénario de référence de 5 000 m³/s à Sorel avec les ouvrages #7, 8 et 9 à une ouverture de 120 m (source : Doyon et al., 2005. Adaptation : D'Arcy, 2005)



Le relèvement des niveaux d'eau que permet cette succession de digues est très significatif et atteint un peu plus de 90 centimètres à Montréal par rapport au scénario de référence. Il ne manque plus qu'une vingtaine de centimètres pour atteindre le zéro des cartes. L'effet de rehaussement n'est cependant pas identique avec chacun des ouvrages, comme en témoigne la figure 34.

Figure 34 – Différence en hauteur d'eau obtenue avec les ouvrages successifs #7, 8 et 9 à 120 m et avec l'ouvrage #8 à 120 m (le zéro des cartes correspondant à la différence en hauteur d'eau pour les stations Jetée #1, Varennes et Verchères est aussi illustré; la hauteur d'eau 0 équivaut à la ligne de base sans ouvrages) (source : Doyon et al., 2005. Adaptation : D'Arcy, 2005)



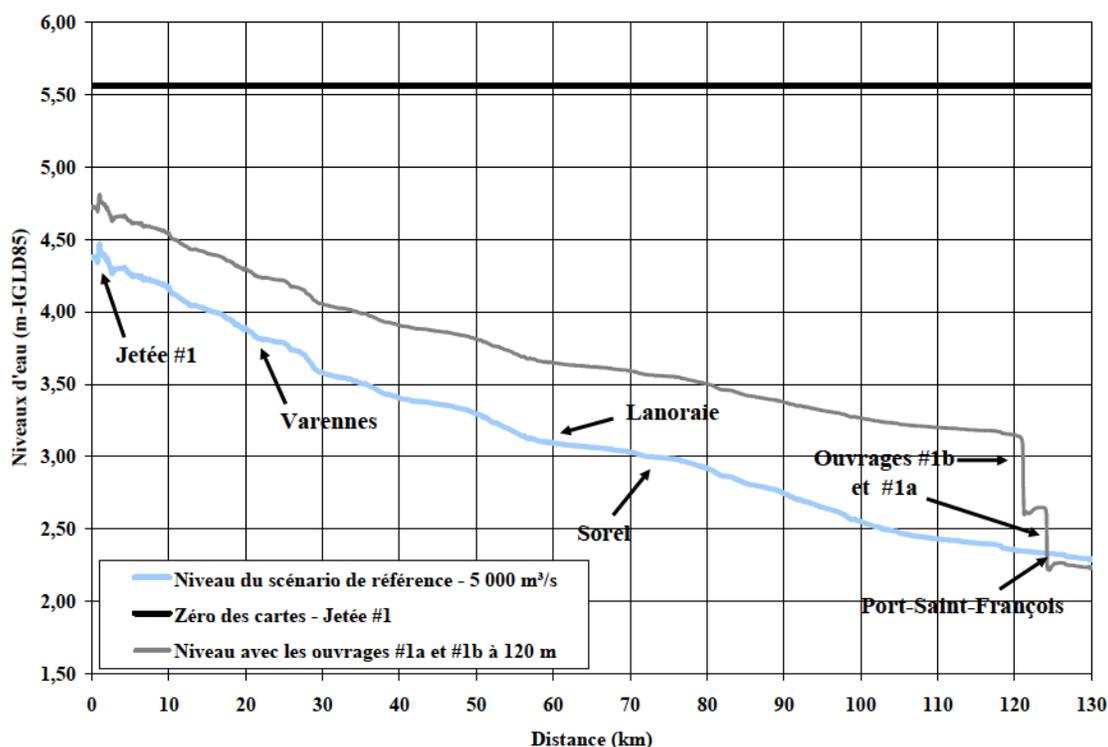
Les gains obtenus avec les ouvrages #7, 8 et 9 seraient individuellement de 25, de 50 et de 40 centimètres respectivement si l'on prend comme référence le point maximal atteint en amont de Verchères. Il diminue graduellement à la hauteur de la Jetée #1 à Montréal pour atteindre un peu plus de 90 centimètres à cet endroit. Il est intéressant de noter que les gains obtenus surpassent le zéro local des cartes à Varennes et à Verchères pour diminuer progressivement par la suite. Ce rehaussement maximal est également observé au même endroit avec l'ouvrage #8 seul. L'atteinte de ce point culminant dans ce secteur pourrait s'expliquer par l'effet conjugué de l'arrivée de la rivière des Prairies dans ce secteur et de la présence de l'archipel de Verchères, qui, sans aucun doute, exerce un effet de rétention de l'eau.

Ce gain cumulatif de 90 centimètres à la Jetée #1 illustre l'efficacité de l'utilisation de trois digues successives. Ce gain serait suffisant pour faire face à cet endroit à un

scénario climatique comme le PCS (-0,77 m) et à la limite au CH (-0,93 m). Le secteur en aval des ouvrages n’obtiendrait cependant pas de bénéfices. L’appel d’eau en aval de l’ouvrage #7 ne serait pas résorbé, même s’il diminuerait de quelques centimètres par rapport à celui produit avec l’ouvrage #8 seul.

Deux séries de digues transversales successives (#1a et 1b) ont été modélisées à la sortie du lac Saint-Pierre dans le but de vérifier l’application du concept précédent (figure 35).

Figure 35 - Niveaux d’eau obtenus entre Montréal et Trois-Rivières selon le scénario de référence de 5 000 m³/s à Sorel avec les ouvrages #1a et 1b à une ouverture de 120 m (source : Doyon et al., 2005. Adaptation : D’Arcy, 2005)

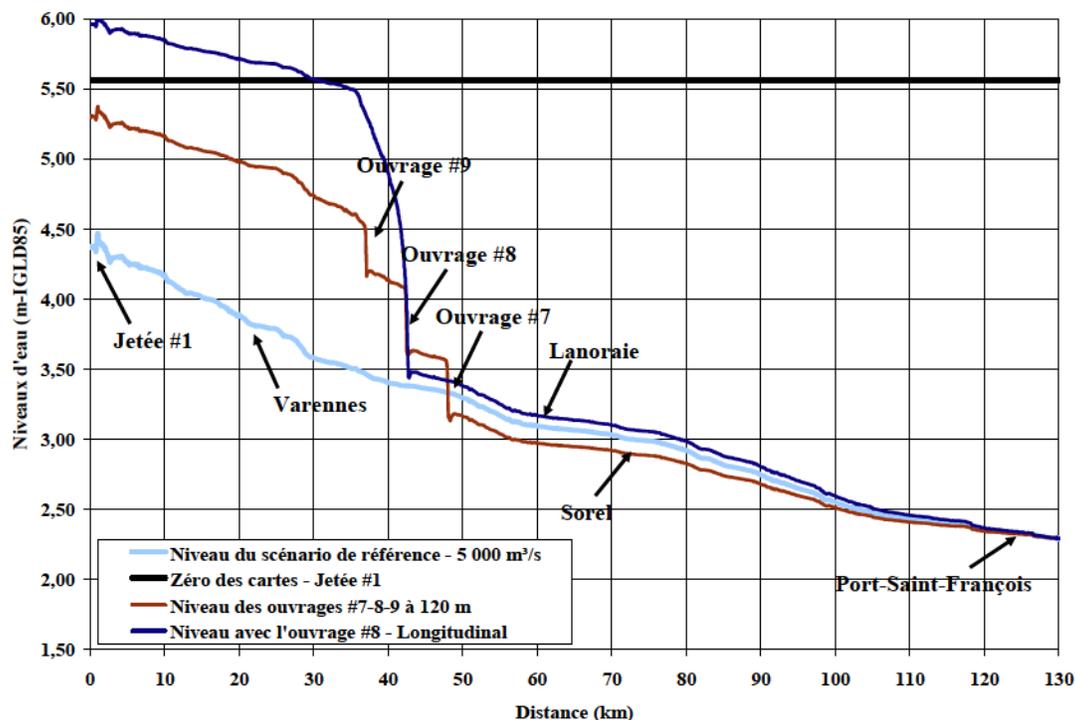


La combinaison de deux digues rapprochées dont l’ouverture n’est pas alignée permet un relèvement significatif du plan d’eau en amont des ouvrages (Consultants Ropars, 2005). Le gain à la hauteur de l’ouvrage 1b est de 75 centimètres, alors qu’il se situe autour de 35 centimètres à la Jetée #1. Ce gain est considérable compte tenu de la distance qui sépare les digues de Montréal. La baisse des niveaux à l’aval des ouvrages est toujours présente (environ 10 cm), mais les conséquences sont moindres à cet endroit compte tenu

des profondeurs disponibles (Consultants Ropars, 2005). De plus, ce secteur apparaît comme stratégique du fait qu'il permet le rehaussement des niveaux pour l'ensemble du domaine affecté entre Trois-Rivières et Montréal. Cependant, le non-alignement de l'ouverture des ouvrages pourrait impliquer une manœuvre particulière pour les navires.

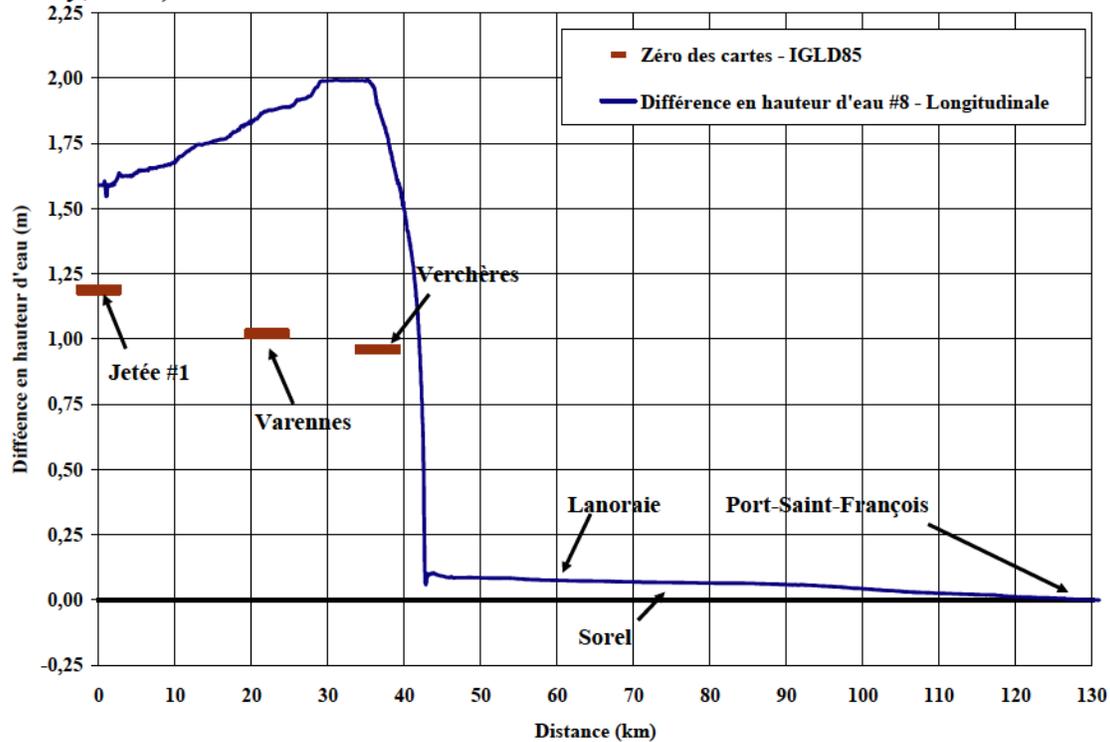
La simulation impliquant l'ouvrage #8, version digue longitudinale, visait à restreindre fortement l'écoulement en appliquant une rugosité très élevée sur les parois du chenal ainsi créé. Cela permettait de vérifier si le ralentissement de l'écoulement entre les deux digues longitudinales, grâce à la rugosité, réduirait l'effet d'accélération observé entre les digues transversales seules (Consultants Ropars, 2005). La modélisation a pris en compte l'obstacle créé par la série de digues transversales #8 en complément de l'effet des digues longitudinales de près de 7 kilomètres chacune. Les résultats présentés à la figure 36 démontrent l'efficacité de ces ouvrages pour relever les niveaux d'eau.

Figure 36 - Niveaux d'eau obtenus entre Montréal et Trois-Rivières selon le scénario de référence de 5 000 m³/s à Sorel avec l'ouvrage #8, version digues longitudinales (source : Doyon et al., 2005. Adaptation : D'Arcy, 2005)



Le gain maximal est de 2 mètres et il est atteint entre Varennes et Verchères (figure 37). Il décroît par la suite pour se situer à environ 1,6 mètre à Montréal. Un autre résultat intéressant de cette simulation est que les niveaux d'eau en aval de l'ouvrage sont également relevés d'environ une dizaine de centimètres.

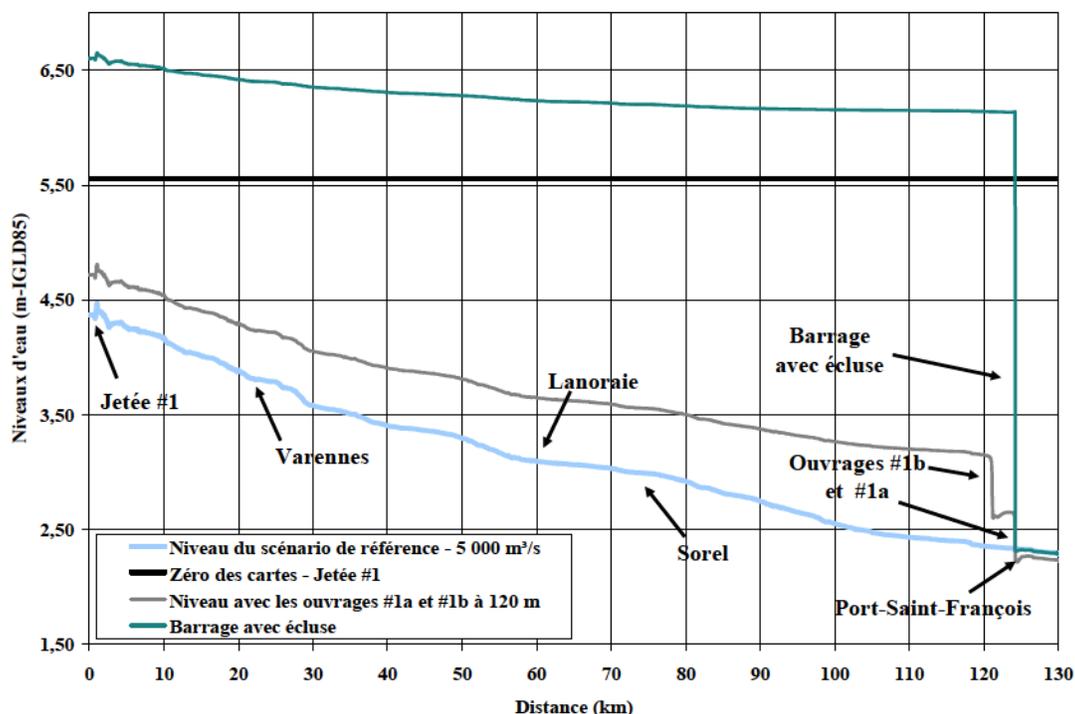
Figure 37 – Différence en hauteur d'eau obtenue avec l'ouvrage #8, version digues longitudinales, à 120 m (le zéro des cartes correspondant à la différence en hauteur d'eau pour les stations Jetée #1, Varennes et Verchères est aussi illustrée; la hauteur d'eau 0 équivaut à la ligne de base sans ouvrages) (source : Doyon et al., 2005. Adaptation : D'Arcy, 2005)



La raison du relèvement des niveaux en aval reste à déterminer, mais il se pourrait que la forme en diffuseur choisie pour les extrémités des digues combinée à la forte rugosité des parois du canal y soit pour quelque chose (Consultants Ropars, 2005). Il serait intéressant de vérifier l'efficacité de ces digues longitudinales à la sortie du lac Saint-Pierre et de trouver la longueur nécessaire pour relever les niveaux d'eau d'environ 1 mètre à Montréal (Consultants Ropars, 2005).

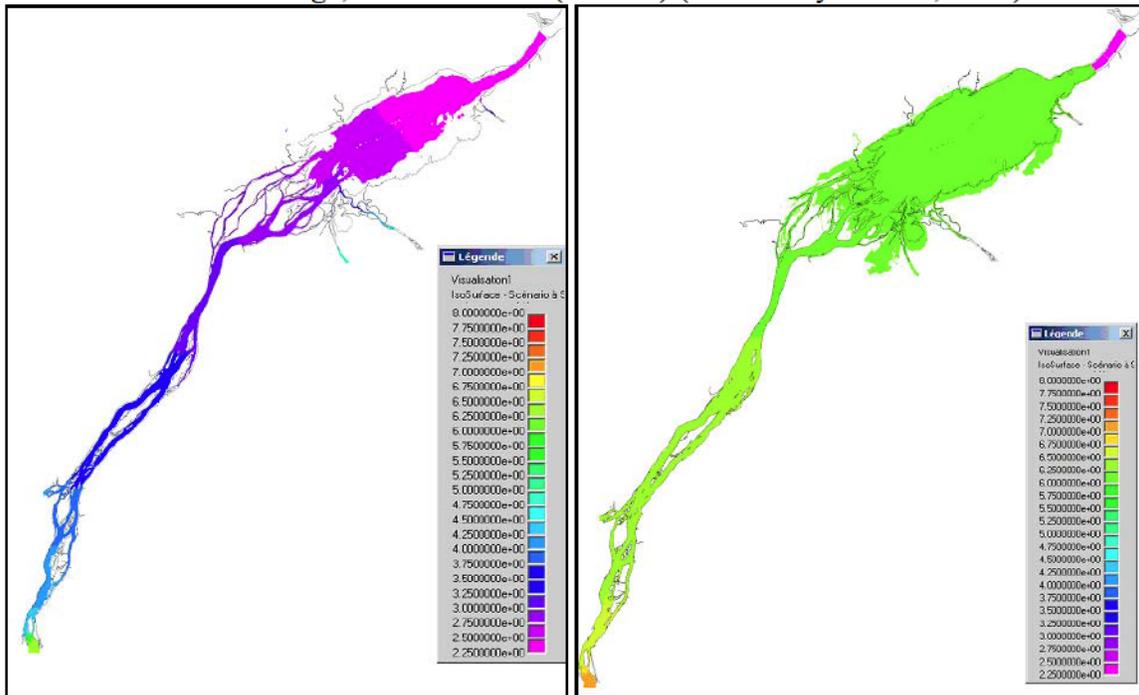
La dernière simulation a été effectuée avec un barrage avec écluse situé un peu en amont du pont Lavolette à Trois-Rivières. Les parties franchissables du barrage (figure 20) se présentent comme un seuil en deux parties, dont les longueurs sont de près de 415 et de 520 mètres respectivement pour les côtés nord et sud du barrage. L'élévation de la crête de ce seuil a été fixée en première approximation à +3,6 mètres (niveau moyen des mers). La figure 38 illustre les résultats obtenus.

Figure 38 - Niveaux d'eau obtenus entre Montréal et Trois-Rivières selon le scénario de référence de 5 000 m³/s à Sorel avec le barrage avec écluse (source : Doyon et al., 2005. Adaptation : D'Arcy, 2005)



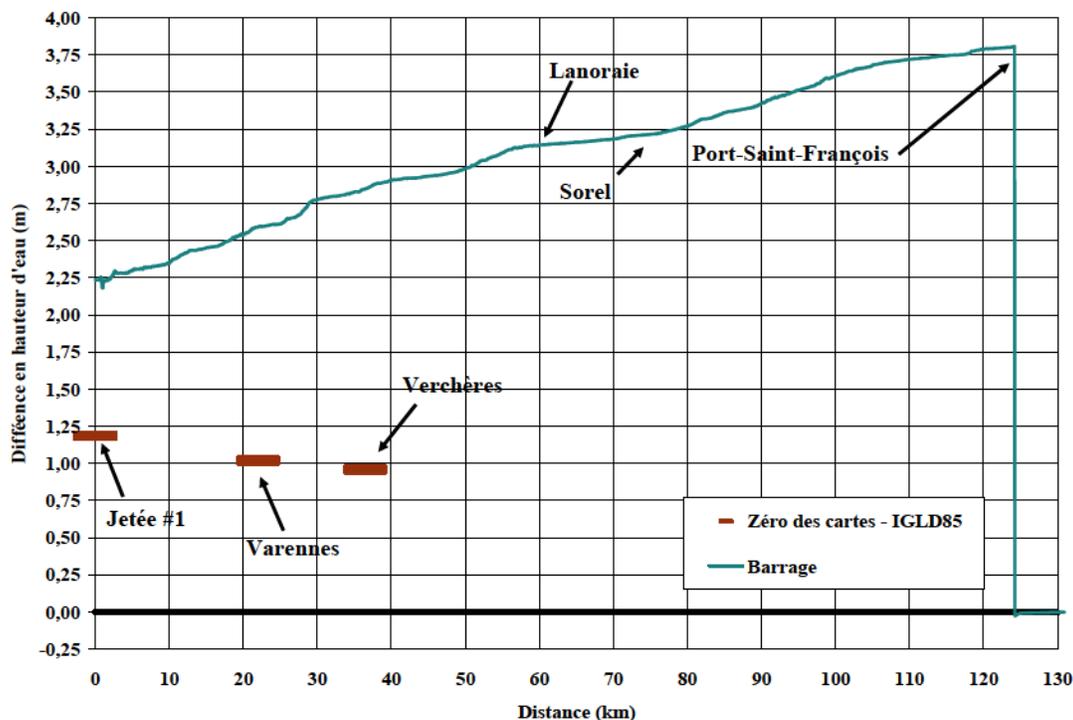
Le gain directement en amont de l'ouvrage est d'environ 3,80 mètres, alors qu'il atteint 2,25 mètres à la Jetée #1 (figure 40). Les niveaux ont donc été relevés d'un peu plus de 1 mètre à Montréal relativement au zéro des cartes, ce qui donnerait une marge de manœuvre fort appréciable aux navires. En fait, la cote du seuil franchissable du barrage est probablement trop élevée, et des simulations supplémentaires seraient nécessaires pour l'ajuster à un niveau optimal (Consultants Ropars, 2005). La figure 39 donne un aperçu de la superficie reconquise par rapport au scénario de base. Les eaux vont au-dessus de la ligne de rivage au lac Saint-Pierre; cet envahissement causerait d'ailleurs l'inondation de quelques habitations de villégiateurs et de certaines infrastructures sur les rives.

Figure 39 – Comparaison des niveaux d'eau obtenus avec le scénario de référence, à un débit de 5 000 m³/s à Sorel (à gauche), avec les niveaux d'eau obtenus lors de la simulation avec le barrage, au même débit (à droite) (tiré de Doyon et al., 2005)



Ces premières modélisations ont permis de confirmer que l'implantation d'ouvrages hydrauliques à certains endroits stratégiques dans le fleuve serait en mesure de relever le plan d'eau à Montréal à un niveau suffisant pour faire face aux scénarios climatiques les plus pessimistes. Plusieurs autres simulations seraient toutefois nécessaires pour que les impacts associés à ces ouvrages soient mieux connus. Le temps a fait défaut pour procéder aussi à une simulation simultanée d'ouvrages hydrauliques en aval et en amont du lac Saint-Pierre.

Figure 40 – Différence en hauteur d'eau obtenue avec le barrage (le zéro des cartes correspondant à la différence en hauteur d'eau pour les stations Jetée #1, Varennes et Verchères est aussi illustré; la hauteur d'eau 0 équivaut à la ligne de base sans ouvrages) (source : Doyon et al., 2005. Adaptation : D'Arcy, 2005)



Ces essais pourraient permettre une combinaison d'ouvrages qui produirait des gains équivalents à celui du barrage, mais dont les conséquences sur l'écosystème fluvial seraient moindres. Car, il faut le rappeler, un barrage constitue un obstacle à la migration dans le fleuve et, si cette option était retenue, il faudrait que la conception de l'ouvrage puisse permettre la libre circulation des espèces. La combinaison des digues transversales et longitudinales en aval du lac Saint-Pierre pourrait s'avérer une solution prometteuse car, en plus de ne pas constituer une barrière difficile à franchir, elles ne requièrent pas de mécanique délicate (surtout dans les glaces) ni d'opérateur (Consultants Ropars, 2005). D'autres options devraient aussi être étudiées au regard des avancements technologiques.

Des estimations préliminaires du coût des ouvrages hydrauliques ont été effectuées et sont présentées au tableau 4. Plus de détails sur les caractéristiques des ouvrages sont fournis à l'annexe 3.

Tableau 4 – Estimation des coûts pour les ouvrages hydrauliques (tiré de Consultants Ropars, 2005)

OUVRAGES HYDRAULIQUES	COÛTS (M\$)
Série de digues #1a	50,3
Série de digues #1b	57,2
Série de digues #7	50,4
Série de digues #8	50,4
Série de digues #9	50,4
Série de digues #8 – longitudinales	35,9 par km
Barrage avec écluse	469,6

M\$: Millions de dollars canadiens.

Les estimations sont basées sur des évaluations approximatives de la quantité des matériaux nécessaire, les coûts unitaires de 2005, les modes de construction possibles, les équipements actuellement existants de même que sur d'autres considérations techniques. Les coûts pour les mesures de compensation environnementale, les audiences publiques, les études diverses nécessaires compte tenu de la nature sensible de ce projet n'ont pas non plus été inclus (Consultants Ropars, 2005), ni ceux pour l'exploitation et l'entretien des ouvrages. C'est donc une estimation sommaire du coût de base des ouvrages, qui permet d'avoir un aperçu relatif du montant des dépenses à prévoir.

2.3.2.6 Modélisation hydraulique – impacts

A) Écosystèmes et ressources en eau

Le cadre de ce projet ne permettait pas de procéder à une analyse détaillée des impacts environnementaux de chacun des ouvrages et de la baisse même des niveaux d'eau. Les grandes lignes de ces impacts seront ici présentées, mais il faut garder à l'esprit que, si de

telles options étaient envisagées, des études en bonne et due forme devraient indubitablement être menées.

Les impacts environnementaux sont d'au moins deux ordres : d'une part, ceux causés par une baisse substantielle des niveaux d'eau telle qu'elle est illustrée par le scénario chaud et sec (CS) et, d'autre part, ceux liés à l'érection des ouvrages hydrauliques. Dans le premier cas, la baisse des niveaux d'eau et des débits causerait des dommages significatifs tant aux écosystèmes du Saint-Laurent qu'à la qualité de l'eau. Une diminution des volumes d'eau augmente la concentration des éléments chimiques (polluants et éléments nutritifs) à cause de la moins grande capacité de dilution de l'eau. Cela a pour effet de détériorer la qualité du milieu aquatique. Une baisse des débits modifie la capacité de transport sédimentaire d'un cours d'eau et entraîne une augmentation de la sédimentation des particules. De nouvelles zones d'accumulation de sédiments se forment et altèrent la dynamique des écosystèmes.

Les pertes en habitats aquatiques dans le tronçon Montréal–Trois-Rivières seraient majeures. Le lac Saint-Pierre, qui fait partie des réserves de la biosphère de l'UNESCO, subirait des changements considérables en ce qui concerne la superficie qu'occuperaient les milieux humides et leur composition. Actuellement, les milieux humides couvrent environ 8 000 hectares de ce territoire et constituent une richesse biologique importante pour la faune et la flore. Plusieurs oiseaux migrateurs (800 000) s'y arrêtent lorsque la plaine inondable est submergée au printemps et la plus importante héronnière en Amérique du Nord, 5 000 individus, est située aux abords du lac. L'archipel du lac Saint-Pierre compte une cinquantaine d'îles, et le lac supporte une pêche commerciale dont les captures tournent autour de 565 tonnes en moyenne annuellement (comm. pers., Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, 2006). Les sites de frayères sont en conséquence très nombreux autour du lac et dans les tributaires s'y déversant. Enfin, les chances de survie des espèces en péril présentes au lac Saint-Pierre risqueraient d'être compromises.

Les facteurs naturels qui régissent la diversité des communautés de poissons sont la présence d'habitats variés et de bonne qualité, les fluctuations des niveaux d'eau et les conditions hydrodynamiques (Painchaud et Villeneuve, 2003). Ces facteurs naturels seraient tous modifiés de façon importante par des changements climatiques sévères, et les conséquences sur le milieu aquatique en amont de Trois-Rivières pourraient dans certains cas s'avérer extrêmement perturbatrices.

Les plaisanciers éprouveraient aussi des problèmes sérieux pour accéder de façon sécuritaire aux marinas. L'écart acceptable entre les niveaux d'eau minimaux et maximaux a été établi pour les plaisanciers du lac Saint-Pierre entre 4,25 et 5,25 mètres, alors qu'il se situe entre 6 et 10 mètres dans le secteur Montréal-Contrecoeur (Connelly et al., 2005). Les pertes possibles en jours-navigation varieraient selon les mois et les niveaux d'eau enregistrés. Selon le scénario CS à Sorel pour l'année de référence 2001, la baisse des niveaux d'eau sous le zéro des cartes (3,77 m, IGLD85) varierait entre 10 à 40 centimètres pour les mois de mai à octobre. Pour une baisse de 10 centimètres, les pertes en jours-navigation au lac Saint-Pierre varieraient entre 2 500 (octobre) et 10 000 (juillet), alors qu'elles oscilleraient entre 2 500 (octobre) et 11 000 (juillet) pour une baisse de 40 centimètres (Connelly et al., 2005). La valeur économique nette perdue a été située pour une baisse de 10 centimètres entre 0,5 et 1,8 million de dollars, et entre 0,5 et 2,5 millions de dollars pour une baisse de 40 centimètres. Ces pertes seraient encore plus considérables dans le secteur de Contrecoeur. Le dragage est souvent le moyen auquel ont recours les exploitants de marinas pour faire face à une situation d'étiage sévère. Cette solution est toutefois coûteuse et nécessite des travaux récurrents, au point où les exploitants de marinas se sont questionnés sur la pertinence économique de maintenir leurs activités. Les coûts d'exploitation dus aux mesures d'atténuation passent du simple au double lors des années de bas niveaux d'eau (Connelly et al, 2005).

Dans le cas de l'option des ouvrages hydrauliques pour rehausser le plan d'eau, les impacts environnementaux seraient importants, quoique d'amplitude différente selon les ouvrages. Le barrage avec écluse serait sans contredit l'option qui exercerait le plus de pression sur les écosystèmes. L'état actuel des connaissances indique que les barrages

ont, pour la plupart, plusieurs impacts négatifs sur les écosystèmes. Ces impacts sont complexes, variés et diffèrent selon les cas. Cette complexité rend difficile une certaine généralisation et une prédiction détaillée des changements qui résulteraient de la construction d'un barrage, selon la World Commission on Dams (2000). Cette commission a classé les impacts environnementaux en trois catégories :

- les impacts de *premier ordre* consistent en des conséquences physiques, chimiques et géomorphologiques entraînées par le fait de bloquer une rivière et d'altérer la distribution naturelle et la périodicité de l'écoulement;
- les impacts de *second ordre* consistent en des changements de la productivité primaire des écosystèmes, incluant des effets sur la flore et la faune riveraines et ripariennes de même que sur les habitats en aval, comme les marais;
- les impacts de *troisième ordre* consistent en une altération de la faune telle que les poissons causée par l'effet des impacts du premier ordre (obstacle à la migration) ou du second ordre (diminution de la disponibilité en plancton).

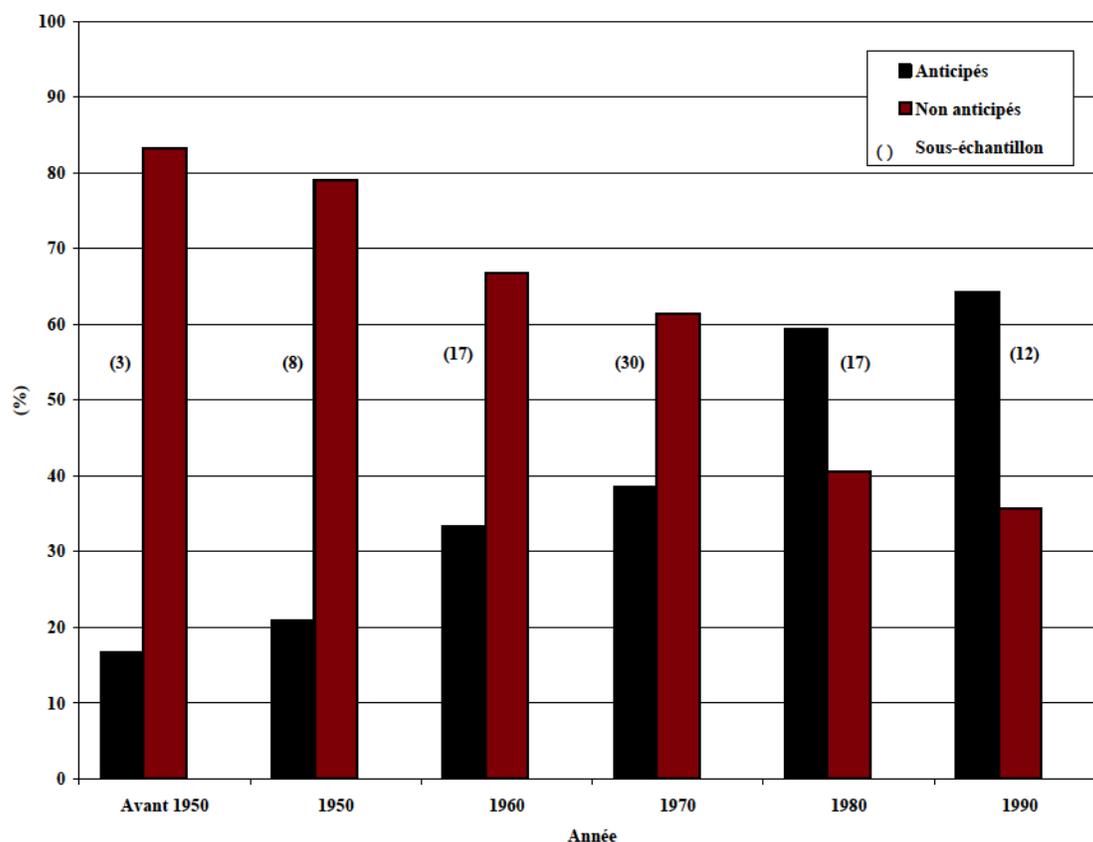
De plus, la modification de l'écosystème fluvial peut conduire à un changement du cycle biochimique naturel. La formation d'un réservoir par le barrage interrompt le libre écoulement du carbone organique des bassins versants vers l'aval et provoque le pourrissement de la végétation terrestre inondée, augmentant ainsi les émissions de gaz à effet de serre tels que le méthane et le dioxyde de carbone, qui contribuent aux changements climatiques (World Commission on Dams, 2000). Dans plusieurs cas, il a été observé que les barrages ont conduit à la perte irréversible d'espèces et d'écosystèmes. L'altération de la distribution naturelle de l'écoulement et de sa périodicité compromet la dynamique des rivières. Le développement des habitats et la présence de différentes espèces dans les rivières naturelles sont fonction du cycle d'écoulement de celles-ci, du type et de la quantité de sédiments en mouvement et du type de matériel qui compose le lit et les rives. C'est la dynamique de l'alternance des périodes de forts et de faibles débits qui est l'élément constituant des rivières et de

l'intégrité de leurs écosystèmes et non la dynamique stable des conditions moyennes engendrées par le contrôle exercé par les exploitants de barrage (World Commission on Dams, 2000). Le régime d'écoulement s'avère ainsi être la pierre angulaire des écosystèmes aquatiques en aval. La durée de la période de crue et sa fréquence sont des éléments critiques pour la survie des communautés fauniques et floristiques vivant en aval. De faibles épisodes de crue peuvent agir comme un signal déclencheur pour la migration des poissons et des invertébrés. La plupart des systèmes fluviaux non régulés sont composés d'un réseau de communautés biologiques complexes qui se sont adaptées aux fluctuations naturelles des débits. Cette composition peut être très différente dans les conditions d'écoulement stables des rivières régulées (World Commission on Dams, 2000).

La réduction du transport des sédiments et des éléments nutritifs vers l'aval du barrage a des impacts directs sur le profil du chenal, la plaine inondable et la morphologie des deltas et provoque la perte d'habitats pour les poissons et les autres espèces. Comme il a été mentionné précédemment, un barrage constitue un obstacle physique entre l'amont et l'aval. Il en résulte une interruption des mouvements migratoires des espèces, une modification de la composition faunique et même, dans certains cas, la disparition d'espèces (World Commission on Dams, 2000). Un suivi environnemental effectué au lac Saint-François confirme ces observations. La diversité des communautés de poissons avait été négativement affectée à la suite de l'érection des barrages hydroélectriques (Painchaud et Villeneuve, 2003). Les raisons en seraient la suppression des voies migratoires et la stabilisation des niveaux d'eau. La mesure d'atténuation la plus répandue pour corriger cette perturbation a été l'intégration de passes migratoires dans les structures des barrages. L'efficacité de cette mesure est cependant bien relative, et dans bien des cas elle n'a pas conduit aux résultats escomptés (World Commission on Dams, 2000). Un dernier point à considérer avec les barrages est qu'ils peuvent générer des impacts cumulatifs lorsque plusieurs ouvrages sont situés sur un même cours d'eau. Les pertes en écosystèmes et en qualité des ressources s'amplifient avec le nombre d'ouvrages.

Même si le bilan des impacts environnementaux associés à la construction de barrages n'apparaît pas très reluisant, des progrès substantiels ont été faits avec le temps pour les anticiper et y faire face. Une vérification de 87 barrages à travers le monde faite par la World Commission on Dams a révélé qu'environ 60 % des impacts environnementaux étaient non anticipés avant la construction des ouvrages pour les années précédant 1970. Cette tendance s'est inversée depuis, comme l'illustre la figure 41.

Figure 41– Impacts environnementaux anticipés et non anticipés pour un échantillon de 87 projets (les chiffres à côté des barres représentent le nombre de projets sous-échantillonnés) (source : World Commission on Dams, 2000. Adaptation : D'Arcy, 2005)



L'anticipation des impacts ne les réduit pas. Toutefois, elle offre un cadre de référence aux planificateurs pour qu'ils soient en mesure de trouver des solutions plus favorables aux écosystèmes.

Les impacts environnementaux des autres ouvrages hydrauliques devraient être estimés de façon plus précise. Même si l'ampleur de ces ouvrages est moindre que celle du barrage, ils constituent néanmoins un obstacle à l'écoulement à leur échelle. De plus, la concentration de l'écoulement dans une ouverture de 120 mètres dans le cas des digues transversales, accélère le courant et peut le rendre infranchissable pour certaines espèces. Il y aurait donc lieu de faire encore plusieurs analyses pour trouver le design optimal des ouvrages, tant sur le plan de l'efficacité à rehausser le plan d'eau que sur celui de la capacité à engendrer le moins d'impacts environnementaux possible.

Finalement, d'autres impacts à considérer ont trait au mouvement des glaces sur le Saint-Laurent. Ce mouvement des glaces serait modifié par l'érection d'ouvrages, ce qui augmenterait le risque d'embâcles, de nuire à la circulation des navires et de causer des inondations. Il serait important d'étudier la hauteur d'eau atteinte lors des événements de débâcles pour ajuster l'élévation des seuils franchissables à un niveau qui permettrait le libre passage des glaces (Consultants Ropars, 2005). Les effets sur la stabilité du couvert de glace au lac Saint-Pierre, qui est maintenu par des estacades, devraient aussi être l'objet d'une attention particulière.

B) Impacts sociaux et harmonisation des usages

L'impact social le plus sérieux de la construction d'ouvrages hydrauliques, et particulièrement des barrages, est l'inondation des terres, qui oblige à un déplacement des populations. Dans le tronçon Cornwall–Trois-Rivières, environ 6 000 habitations ont été inventoriées et sont situées dans la plaine inondable centennale du Saint-Laurent (Doyon et al., 2005). La majorité d'entre elles, soit 90 %, sont des résidences familiales. En se basant sur les relations niveaux–dommages élaborées pour l'étude internationale du lac Ontario et du fleuve Saint-Laurent, Doyon et al. (2005) ont estimé qu'environ 11 habitations seraient légèrement inondées en présence d'un barrage en amont de Trois-Rivières et d'un débit de référence de 5 000 mètres cubes par seconde à Sorel. Les résidences concernées sont toutes situées autour du lac Saint-Pierre et concentrées dans quatre municipalités (Doyon et al., 2005). Comme il a été mentionné précédemment, la cote d'élévation actuelle des seuils du barrage simulé semble trop élevée. Un ajustement

de cette cote pourrait réduire, sinon éliminer, les risques d'inondations et, surtout, les risques pour la sécurité des personnes et l'intégrité des biens.

Un second impact social est lié aux activités de pêche commerciale et récréative qui se pratiquent sur le lac Saint-Pierre. Dix-neuf permis commerciaux sont actuellement alloués, à dix-sept pêcheurs. La moyenne des captures, toutes espèces confondues, pour la période 1994-2004 a été de 565 tonnes pour une valeur économique d'environ 1,5 million de dollars (comm. pers., ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, 2006). La pêche récréative est pratiquée à l'année et se divise, pour les besoins des statistiques, en pêche en eau libre et en pêche hivernale (sur la glace). La première a occupé 35 950 jours-personnes en 2003, pour des dépenses totales de 1 313 041 \$ (BCDM Conseil inc., 2005a). Les captures représentent, toutes espèces confondues, un peu moins de 45 tonnes (Daigle et al., 2005a). La pêche hivernale représentait 58 800 jours-personnes, pour des dépenses de 931 920 \$ (BCDM Conseil inc., 2005b). Le nombre total de captures dépassait les 160 000 poissons pour la perchaude, le brochet et le doré (Daigle et al., 2005b). La valeur économique annuelle globale des pêches commerciale et récréative tourne autour de 4 millions de dollars pour la région du lac Saint-Pierre. Une modification de la composition de la faune ichthyenne à la suite de la construction d'ouvrages hydrauliques en aval du lac pourrait fragiliser l'économie de toute cette région.

La modification de la qualité esthétique du paysage est un autre impact social à considérer. Des structures imposantes comme les barrages ne contribuent pas nécessairement à la valorisation du paysage. Dans la mesure du possible, les ouvrages hydrauliques dont la majeure partie de la structure est submergée devraient être privilégiés.

Une harmonisation de l'implantation et de l'exploitation des ouvrages avec les plans d'aménagement des municipalités riveraines devrait aussi être considérée, tant sur le plan de la valorisation des plans d'eau que des conditions de sécurité et de salubrité à proximité des rives.

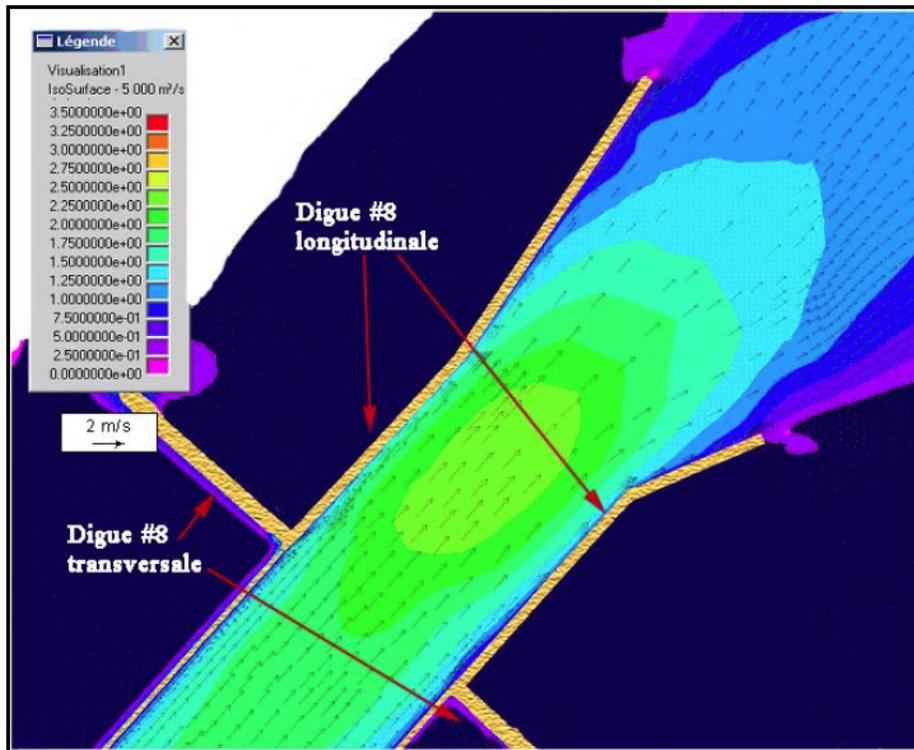
C) Impacts relatifs au trafic et la sécurité maritime

Tous les scénarios étudiés comportaient des contraintes de navigation pour le trafic commercial et de plaisance. Une circulation à sens unique devrait fort probablement être imposée lorsque les navires franchiraient les digues transversales à ouverture de 120 mètres. Cette pratique ralentirait le trafic maritime sur le fleuve et pourrait même l'arrêter occasionnellement lorsque le nombre de navires deviendrait trop important. Ce serait sans doute le cas avec le barrage avec écluse. Ce ralentissement n'aurait vraisemblablement pas d'impacts significatifs pour les transports de longue durée, de 30 à 40 jours, mais pourrait en avoir pour ceux dont la durée tourne autour d'une dizaine de jours. Parmi les impacts anticipés, on compte la perte de la priorité au port de destination et l'ajout d'un temps d'attente.

Dans le tronçon Québec-Montréal, on estime qu'il passe environ un navire à l'heure. Cette moyenne n'est toutefois pas représentative de la réalité, car la densité du trafic est concentrée particulièrement dans la période d'ouverture de la Voie maritime (avril à décembre). Elle indique cependant que le Saint-Laurent est encore très loin d'un point de congestion et qu'un ralentissement, si le trafic se maintient au niveau actuel, est peu probable.

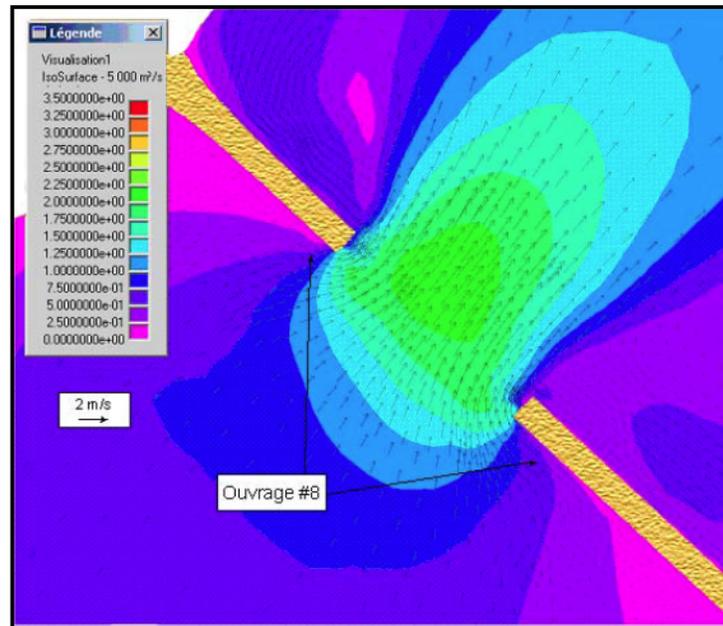
L'augmentation de la vitesse du courant dans les sections rétrécies par les digues transversales et longitudinales pourrait rendre plus difficile la manœuvre des navires et accroître les risques d'accident (Consultants Ropars, 2005). La vitesse moyenne du courant dans le tronçon fluvial en amont de Trois-Rivières est de 0,30 mètre par seconde (0,58 nœud) et atteint 0,60 mètre par seconde (1,16 nœud) dans le chenal de navigation (Centre Saint-Laurent, 1996). Ces valeurs augmentent sensiblement avec la crue printanière. La concentration de l'eau dans l'ouvrage #8 longitudinal donne une vitesse de courant d'environ 2,0 mètres par seconde (3,88 nœuds), soit un peu plus de 3 fois supérieure à la vitesse moyenne (figure 42). Même si cette valeur apparaît élevée, elle n'est pas exceptionnelle sur le Saint-Laurent fluvial.

Figure 42 – Vitesses obtenues pour un débit de 5 000 m³/s à Sorel au sortir de l’ouvrage #8 longitudinal avec une ouverture de 120 m (source : Doyon et al., 2005. Adaptation : D’Arcy, 2005)



Le courant atteint des vitesses variant entre 2,05 mètres par seconde (4 nœuds) et 2,57 mètres par seconde (5 nœuds) dans certains secteurs en aval de Trois-Rivières (Pêches et Océans Canada, 1997). La principale différence réside dans la largeur du chenal de navigation, qui est actuellement de 245 mètres, alors qu’il serait de 120 mètres à l’intérieur des limites de l’ouvrage. Des conditions particulières pourraient être mises en place pour assurer une manœuvre sécuritaire des navires. Par exemple, le chenal de la Voie maritime, dont la largeur minimale à l’extérieur des écluses est de 137 mètres, a été conçu pour soutenir un débit maximal de 8 800 mètres par seconde sans excéder la vitesse de manœuvre pour les navires, qui est de 1,22 mètre par seconde (2,37 nœuds) (Groupe responsable du Plan d’étude sur le fleuve Saint-Laurent et le lac Ontario, 1999). Sans être transposable aux conditions hydrologiques qui auraient cours dans l’ouvrage #8, cette mesure de contrôle de la vitesse du courant dans la Voie maritime indique qu’il faudra porter une attention particulière à cette question, d’autant plus que la vitesse de 2

Figure 44 - Vitesses obtenues pour un débit de 5 000 m³/s à Sorel au sortir de l'ouvrage #7 avec une ouverture de 120 m (source : Doyon et al., 2005. Adaptation : D'Arcy, 2005)



Une solution de rechange pour les chenaux secondaires serait d'utiliser des barrages gonflables qui ne seraient en fonction que dans les périodes d'étiage sévère.

En résumé, il faudra parvenir à répondre à la question suivante : est-ce que le choix de ne pas intervenir dans le milieu physique aura des impacts environnementaux plus grands ou moindres que le choix d'intervenir?

2.4 Modification de la configuration des navires

L'option de changer la configuration des navires repose sur l'idée que le Saint-Laurent a été modifié, avec le temps, pour accueillir des navires ayant des gabarits toujours plus imposants et qu'il faudrait peut-être, dorénavant, prévoir adapter les navires aux conditions physiques actuelles du fleuve. La profondeur nominale maintenue dans le tronçon Trois-Rivières–Montréal est actuellement de 11,3 mètres. Une baisse de niveaux d'eau liée aux changements climatiques se traduirait par une diminution de la hauteur d'eau disponible pour les navires. Cette diminution équivaldrait à une perte en chargement et en revenu. À titre d'exemple, une réduction de 30 centimètres dans le

tirant d'eau disponible correspond à une perte en chargement de 114 conteneurs équivalents vingt pieds (EVP) pour un navire ayant une capacité de 1 800 conteneurs (Groupe de travail technique sur la navigation commerciale, 2005). En attribuant une valeur moyenne de 2 000\$ à chaque conteneur, on obtient une perte en revenu totaliserait près d'un quart de million de dollars par navire.

Afin de maintenir la rentabilité d'un transit, il faudrait que la modification de la configuration structurale des navires puisse préserver la capacité de chargement optimale. Deux éléments structuraux peuvent ainsi être modifiés, excluant le tirant d'eau, pour atteindre cet objectif, soit la longueur et la largeur.

La plus récente génération de navires qui transite sur le Saint-Laurent est adaptée à la profondeur nominale du fleuve pour la navigation. La longueur de ces navires atteint 294 mètres pour un tirant d'eau de 10,78 mètres. La capacité nominale de transport de ces navires est de 4 400 conteneurs (EVP). Cet allongement des navires a changé le rapport longueur-largeur de sorte que les pressions exercées sur la coque, lorsque les navires sont en haute mer, peuvent endommager celle-ci. De plus, la réduction de la manœuvrabilité dans les courbes du fleuve oblige, pour des raisons de sécurité, à imposer une circulation à sens unique à certains endroits. Ces contraintes laissent supposer qu'en matière de longueur, la limite semblerait atteinte sur le Saint-Laurent.

Du côté de la largeur, l'option demeure encore à explorer. Dans un contexte de changements climatiques cependant, l'élargissement devrait aller de pair avec une réduction du tirant d'eau des navires pour compenser la perte en hauteur d'eau.

L'élargissement de la structure d'une flotte de navires doit être fait en conformité avec les recommandations qui encadrent la conception des chenaux de navigation. L'Association internationale permanente des congrès de navigation a publié les premières recommandations sur la dimension des chenaux dans les années soixante. Ces recommandations touchaient davantage le développement des ports situés en eaux

profondes et elles ont évolué avec l'avancement des connaissances sur les plans technique et technologique (PIANC et IAPH Working Group, 1997).

L'application de ces lignes directrices s'est traduite par la détermination de plusieurs paramètres pour la conception d'un chenal sécuritaire, notamment des paramètres relatifs à la conception des navires, aux caractéristiques physiques du cours d'eau, au pilotage, à la planification du trafic, à la sécurité, à l'environnement, etc. Le chenal de navigation du Saint-Laurent a été conçu en se basant sur ces recommandations.

En ce qui a trait à la largeur totale d'un chenal, l'équation suivante sert de référence :

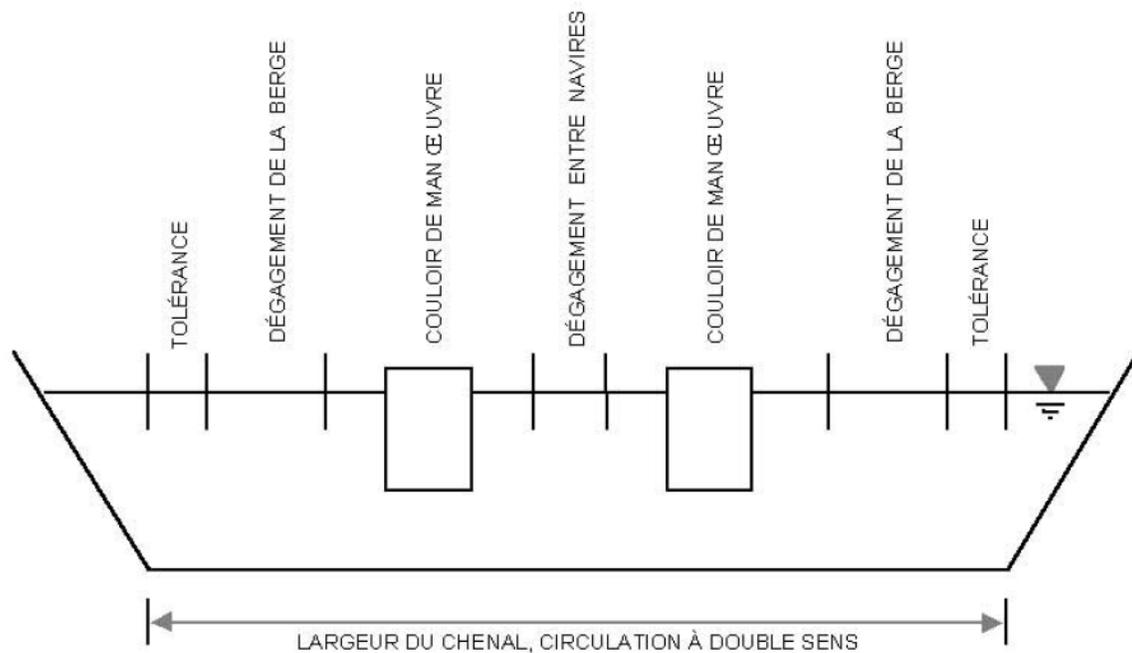
$$\text{Largeur totale} = \text{largeur de conception} + \text{tolérances}$$

La largeur de conception est la somme des largeurs nécessaires pour tenir compte des éléments suivants :

- manœuvre normale du navire;
- Interactions hydrodynamiques entre les navires qui se croisent et se dépassent dans un chenal à double sens;
- compensation pour vents de travers et courants transversaux;
- compensation pour la succion de la berge;
- aides à la navigation (comprenant le service des pilotes).

Les tolérances sont les largeurs additionnelles nécessaires pour tenir compte du glissement et de l'érosion de la berge, du transport et du dépôt des sédiments et du type de matériau dont est composée la berge (http://www.ccg-gcc.gc.ca/mns-snm/main_f.htm). La figure 45 donne un aperçu des paramètres de conception d'un chenal à double sens.

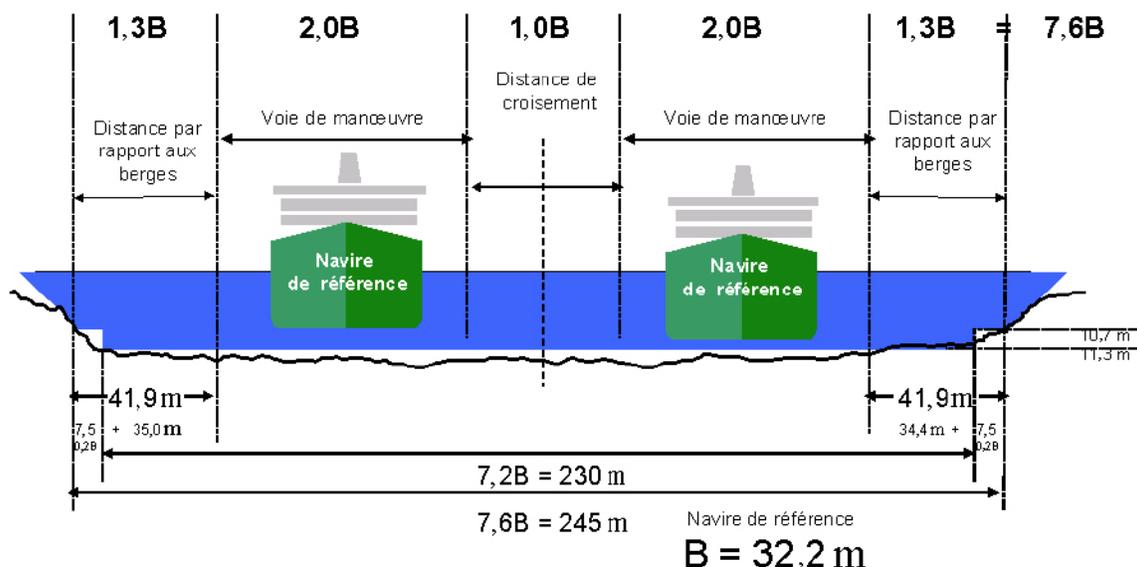
Figure 45 – Composantes de la largeur d'un chenal (tiré de http://www.ccg-gcc.gc.ca/mns-smm/main_f.htm)



Ces critères assurent une navigation sécuritaire tout en maintenant des marges de manœuvre suffisantes pour faire face aux imprévus. La largeur actuelle du chenal de navigation entre Québec et Montréal est de 245 mètres. Cette largeur permet la circulation à double sens de navires de type panamax (32,2 m de largeur). La figure 46 illustre le calcul des éléments de distance à considérer lors de la conception d'un chenal à double sens.

Autoriser le passage de navires plus larges nécessiterait la révision des normes de conception du chenal et peut-être aussi de celles de gestion du trafic (multiplication des secteurs à sens unique). Cela pourrait ralentir la circulation et possiblement ajouter certains délais de livraison pour les transporteurs de courte distance.

Figure 46 – Conception du chenal de navigation du Saint-Laurent (1,3B signifie 1,3 x 32,2 m, B représente la largeur du navire de référence (B = 32,2 m) utilisé sur le Saint-Laurent) (tiré de la Garde côtière canadienne, Gestion des voies navigables, 2004)



Les avancées technologiques et électroniques pourraient cependant s'avérer d'une aide considérable pour la gestion du trafic. Déjà, plusieurs données pour la navigation sont obtenues et transmises en temps réel, et l'amélioration dans ce domaine est continue. Cette information pourra éventuellement contribuer à réduire les risques de la navigation et conduire à une révision des normes de conception des chenaux. Il est certain que plusieurs études seront nécessaires avant d'arriver à ce point, mais cette possibilité ne doit pas être exclue en termes des stratégies d'adaptation.

Pour les transporteurs, faire construire une nouvelle flotte de navires à gabarit plus large et à tirant d'eau plus faible peut s'avérer une opération coûteuse. Par exemple, les coûts pour la construction d'un porte-conteneurs d'environ 4 000 EVP se situent entre 55 et 60 millions de dollars américains actuellement et ils sont continuellement à la hausse à cause de la forte demande dans ce secteur. Ces coûts constitueraient un investissement considérable pour les armateurs si cette nouvelle flotte, compte tenu de ces dimensions, ne pouvait être utilisée sur d'autres cours d'eau. Dans un contexte d'échanges économiques croissants où le maritime sera de plus en plus mis à contribution pour le transport des marchandises outre-mer, la flexibilité d'une flotte, c'est-à-dire sa capacité à

naviguer sur le plus grand nombre possible de voies navigables, deviendra probablement un critère décisionnel important pour les armateurs. La présence de structures telles que des écluses sur plusieurs voies navigables mondiales peut apparaître comme un facteur limitant pour cette option.

2.5 Réorganisation des activités portuaires

L'option de réorganiser les activités portuaires s'inscrit elle aussi dans la perspective d'adapter la navigation aux conditions hydrologiques du Saint-Laurent. Étant donné que plusieurs des navires à fort tirant d'eau se dirigent jusqu'au port de Montréal et que le tronçon le plus à risque pour les baisses de niveaux d'eau est situé entre Trois-Rivières et Montréal, il apparaît légitime de se questionner sur la possibilité que ces navires arrêtent dans les ports qui sont à l'abri de ces fluctuations. Ce questionnement doit cependant s'ouvrir sur les différents aspects économiques, environnementaux et sociaux qui sont en jeu et sur les conséquences qui leur sont associées.

L'activité maritime n'est pas étrangère au développement économique de Montréal et au statut de métropole canadienne qui était le sien jusqu'à récemment. C'est au cours du XIX^e siècle que Montréal a réussi sur le plan administratif, à briser le monopole que détenait Québec et qui lui assurait le contrôle du pilotage, du chenal de navigation et des équipements portuaires du lac Saint-Louis jusqu'au golfe (Lasserre, 1980). En parvenant à exercer son autorité de Portneuf jusqu'aux limites provinciales en amont et en profitant de l'avènement des bateaux à vapeur plus puissants, Montréal fut mieux placée pour défendre ses intérêts. Des campagnes de promotion furent entreprises pour permettre des travaux d'approfondissement du chenal afin que les plus gros navires puissent se rendre jusqu'à Montréal. Ces travaux, qui débutèrent dès 1850, marquèrent le transfert graduel des activités maritimes de Québec vers Montréal. Ainsi, en 1851, Québec accueillait 1 194 navires alors que Montréal n'en recevait que 275. Près de quatre-vingt-dix ans plus tard, Québec n'était plus la destination que de 394 navires alors que Montréal dépassait le cap du millier (Lasserre, 1980).

Depuis, les activités du port de Montréal n'ont cessé de progresser au point qu'il est devenu une plaque tournante pour le transport des marchandises, et particulièrement pour les échanges internationaux. La situation géographique de Montréal, le développement du créneau des conteneurs et celui du service intermodal ont permis au port de se positionner comme un lieu stratégique pour les transporteurs maritimes et ont contribué à son essor économique. C'est à partir de cette toile de fond que la réorganisation des activités portuaires doit être étudiée.

Les scénarios de réorganisation portuaire retenus considèrent un transfert partiel des volumes de marchandises du port de Montréal vers Québec, Trois-Rivières, Bécancour ou une combinaison de ces ports. Certaines caractéristiques des ports méritent d'être précisées d'emblée pour mieux mesurer les implications de ces scénarios.

A) Caractéristiques des ports de Montréal, de Québec et de Trois-Rivières

La position géographique de Montréal permet aux transporteurs d'outre-mer d'accéder, par voie d'eau, à l'intérieur du continent nord-américain sans que les navires aient à faire d'escales entre le port d'origine et celui de destination. C'est un avantage économique et concurrentiel de grande importance. Cet emplacement stratégique, conjugué à la spécialisation du port dans le domaine des conteneurs, a fait de ce dernier une plaque tournante pour les échanges commerciaux entre les pays d'Amérique du Nord et d'Europe. Même si des lignes maritimes relient Montréal à plus de cent pays à travers le monde, la majorité des échanges commerciaux, soit 95 % en 2002, a eu lieu entre les pays d'Europe du Nord et de la Méditerranée et le centre du Canada, le Midwest et le Nord-Est américain (Port de Montréal, Rapport annuel, 2002). L'instauration d'un service de transport intermodal intégré n'est pas étrangère au succès et à la croissance économique du port de Montréal.

L'administration portuaire exploite son propre réseau ferroviaire, qui compte 100 kilomètres de voies ferrées et qui dessert la majorité des postes à quai. Ce service à quai permet d'éviter les transbordements intermédiaires qui contribuent à l'augmentation des coûts de livraison. Ce réseau ferroviaire est relié à ceux du Canadien National et du

Canadien Pacifique. Près de 45 trains, d'une longueur d'environ 1,7 kilomètre en moyenne, partent chaque semaine pour se rendre dans les grands centres urbains de l'Ontario et du Midwest. Au départ de Montréal, le transport d'un conteneur prend 10 heures par train pour se rendre jusqu'à Toronto, 25 heures pour aller à Détroit et en un peu plus de 30 heures pour atteindre Chicago. En fait, le trajet Montréal-Chicago par train est plus court de 122 kilomètres que celui de New York-New Jersey-Chicago. Près de 60 % du trafic en conteneurs manutentionné au port de Montréal est acheminé par voie ferroviaire (<http://www.port-montreal.com>).

L'autre portion des marchandises est acheminée par camions et, encore une fois, Montréal profite d'une situation privilégiée, car elle est située à proximité des grands axes routiers canadiens et nord-américains. Quelques vingt-cinq compagnies de transport routier s'occupent de la livraison des conteneurs au Québec, en Ontario et dans le Nord-Est américain.

Il importe de souligner que le nombre de conteneurs vides qui transitent par le port de Montréal est très faible (8,5 % en 2003) si on le compare avec New York (30 %) ou Halifax (15 %). Les routes vers Montréal représentent ainsi un avantage économique pour les transporteurs par rapport à d'autres ports (Rioux et al., 2005).

Les infrastructures disponibles pour les plus grandes lignes maritimes internationales consistent notamment en quatre terminaux à conteneurs couvrant près de 80 hectares, deux terminaux multifonctionnels, des grues à forte capacité de levage et des rampes spéciales pour le trafic routier. Le port a réussi à manutentionner plus de 1 million de conteneurs par année depuis l'an 2000, à l'exception de 2001 où il était légèrement sous ce chiffre. En 2004 il a atteint 1,2 million de conteneurs, ce qui représente près de 11 millions de tonnes de marchandises.

Tableau 5 – Nombre d’emplois, chiffre d’affaires et valeur des actifs aux ports de Montréal, de Québec et de Trois-Rivières (adapté de Rioux et al., 2005)

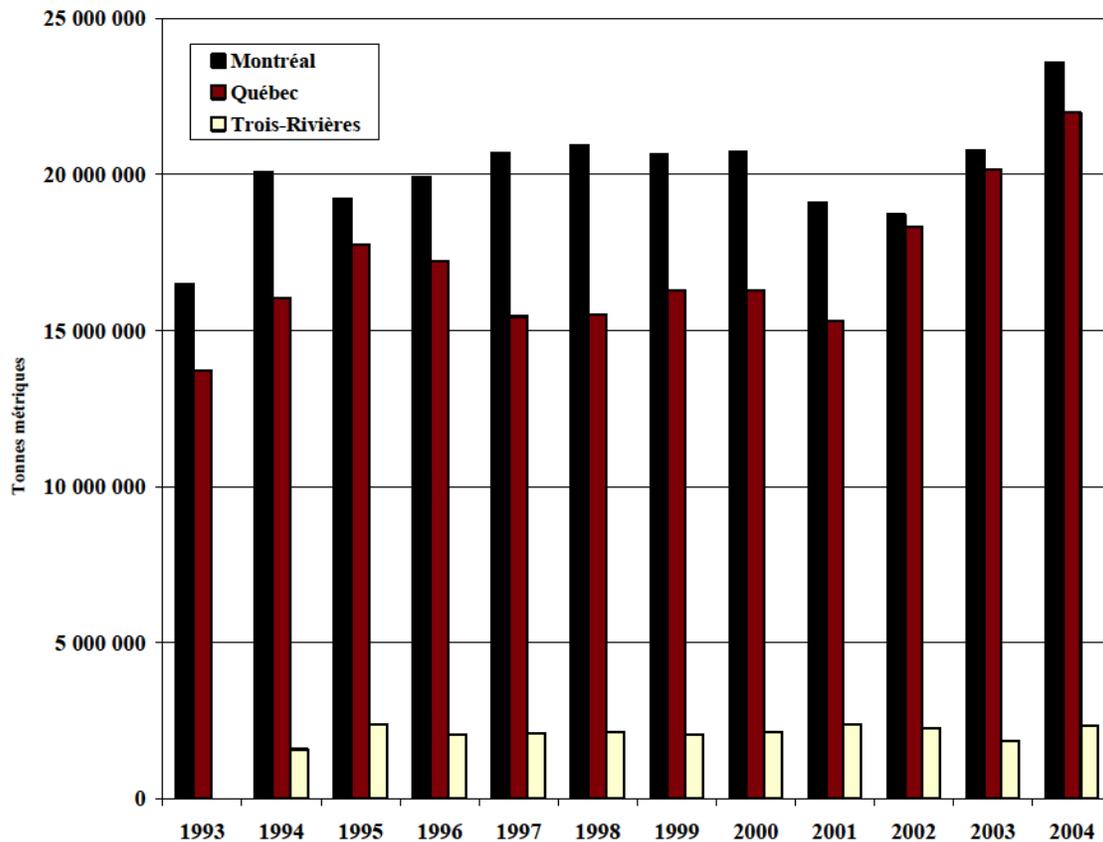
	Montréal	Québec	Trois-Rivières
Emploi ^a			
- Administration portuaire	325	60	6
- Débardeurs et vérificateurs	1 000	100	50
Total	1 325	160	56
Revenu brut ^b (M\$)	65,2	13,2	3,5
Valeur des actifs (M\$)	297	125	40

^a Les débardeurs et vérificateurs ne sont pas des employés de l’administration portuaire mais de l’Association des employeurs maritimes.

^b Données de 2003. Les produits financiers ne sont pas inclus.

En ce qui concerne les marchandises manutentionnées, les ports de Montréal et de Québec présentent des profils assez similaires, et les quantités manutentionnées y demeurent généralement entre 15 et 25 millions de tonnes par année (figure 47, tableau 6). Au port de Québec, près des deux tiers du tonnage sont constitués de produits pétroliers manutentionnés à la raffinerie d’Ultramar à Saint-Romuald. Pendant les années 2001 à 2003, le trafic mensuel variait approximativement entre 5 et 40 navires à Trois-Rivières, 40 et 110 à Québec et 50 à 220 à Montréal.

Figure 47 – Tonnage manutentionné aux ports de Montréal, de Québec et de Trois-Rivières pendant la période 1993-2004 (données : Rioux et al, 2005. Adaptation : D'Arcy, 2005)



Sur le plan des infrastructures, il a été mentionné ci-dessus que le port de Montréal possédait quatre terminaux à conteneurs couvrant près de 80 hectares. Si on exclut le terminal de Bickerdike, dont la profondeur minimale est de 8,8 mètres, les trois autres terminaux ont une profondeur minimale de 10,7 mètres. D'autres installations sont consacrées aux marchandises non conteneurisées, à savoir les céréales, les vracs solides et liquides et les produits pétroliers.

Les activités portuaires à Québec sont effectuées dans quatre secteurs distincts : trois sur la rive nord (Beauport, l'Estuaire et l'Anse-au-Foulon), et un sur la rive sud (quais privés d'Ultramar) où sont manutentionnés presque tous les volumes pétroliers (Rioux et al, 2005). Trois terminaux sont spécialisés dans le vrac liquide et un, qui a un hangar de 45 000 tonnes, est réservé aux différents minerais et concentrés. Le terminal céréalier de

Bunge Canada, l'un des plus importants actifs du port, n'est pas exploité à son maximum à cause du transfert vers les ports de l'Ouest canadien des produits céréaliers des Prairies. En excluant le secteur de l'Estuaire, où plusieurs quais ont des profondeurs inférieures à 10 mètres à marée basse, et un à la Pointe-à-Carcy qui est dans la même situation, les autres quais offrent des profondeurs allant de 10 à 16,7 mètres.

Tableau 6 – Synthèse de quelques caractéristiques structurantes des ports de Montréal, de Trois-Rivières et de Québec basée sur l'année 2003 (tiré de Rioux et al, 2005)

	Montréal	Trois-Rivières	Québec
Marchandises (tonnes)	20 780 294	1 864 000	20 200 000
Entreprises de camionnage	25	12	20
Investissements 25 dernières années (M\$)	384	35	150
Croisières (passagers)	33 427	300	59 000
Débardeurs- vérificateurs	850 150	50 S.O.	100 S.O.
Conteneurs (EVP)	1 108 837	S.O.	200
Agences maritimes	46	6	9

Le port de Québec, situé à 1 400 kilomètres à l'intérieur de l'Amérique du Nord, est considéré comme un port en eau profonde et peut accueillir des navires ayant jusqu'à 150 000 tonnes de capacité. Le réseau ferroviaire qui le dessert est relativement accessible et développé. Trois compagnies font affaire avec les autorités du port, soit le Canadien National, les Chemins de fer Québec-Gatineau et le Chemin de fer Charlevoix. Les Chemins de fer Québec-Gatineau travaillent en étroite collaboration avec le Chemin de fer Saint-Laurent et Hudson pour communiquer avec les marchés en Amérique du Nord. À la différence de Montréal, où le ferroviaire joue un rôle majeur dans le transport des marchandises, à Québec, 84 % des marchandises manutentionnées sont transportées par camion (Rioux et al, 2005).

Au port de Trois-Rivières, les principales activités sont orientées vers la manutention de marchandises générales, particulièrement les produits forestiers, et les vracs liquides et solides. Les profondeurs d'eau aux quais sont semblables à celles du port de Montréal (Rioux et al, 2005).

Les activités portuaires sont principalement orientées vers la desserte de la région immédiate. Un seul chemin de fer y est présent, soit les Chemins de fer Québec-Gatineau. Cela semble suffire aux besoins actuels, mais une augmentation des volumes transbordés pourrait vite conduire à un problème de congestion. Environ la moitié des marchandises à cet endroit sont transportées par camion (Rioux et al, 2005). Certains autres détails relatifs au port de Trois-Rivières sont présentés dans les tableaux 5 et 6 ainsi qu'à la figure 47.

B) Compétitivité portuaire

Compte tenu de sa spécialisation dans le domaine des conteneurs, le port de Montréal n'est pas sur ce plan en compétition avec les autres ports du Saint-Laurent. En fait, Montréal est le seul port à disposer d'installations spécialisées nécessaires à la manutention des conteneurs. Il est aussi le seul à être desservi par des lignes régulières de compagnies maritimes transportant des conteneurs entre l'Europe du Nord et certaines régions de l'Amérique du Nord (Rioux et al, 2005). Son atout majeur par rapport aux autres ports réside dans son réseau de transport intermodal intégré.

Montréal joue également un rôle important pour la desserte intérieure. Environ 40 % des marchandises non conteneurisées manutentionnées à Montréal proviennent des autres ports québécois ou sont destinées à ceux-ci. De façon générale, le port de Montréal occupe près du tiers du trafic maritime sur le Saint-Laurent (Rioux et al, 2005). À cet égard, il semblerait plus approprié de parler de complémentarité entre les différents ports québécois que de véritable compétition.

Malgré sa situation à environ 1 600 kilomètres à l'intérieur du continent, Montréal est considéré comme un port de la côte atlantique et, dans ce contexte, ses compétiteurs sont

les ports de Charleston, de Norfolk, de New York-New Jersey, de Baltimore, de Philadelphie et d'Halifax (USACE, 2001). Le principal avantage de Montréal sur ses concurrents réside dans le temps total de transit d'un navire. Le rapport de l'USACE estime qu'il est au minimum d'un jour inférieur à celui des autres ports de la côte atlantique. Au chapitre du nombre de conteneurs manutentionnés, le tableau 7 nous indique que Montréal se situait au troisième rang des ports de la côte atlantique en 2004.

Tableau 7 – Conteneurs manutentionnés en 2004 dans les principaux ports de la côte atlantique

Port	Conteneurs (EVP)
New York-New Jersey ^a	3 163 197
Charleston ^a	1 421 251
Montréal ^b	1 226 296
Norfolk ^a	1 206 034
Halifax ^c	525 553
Baltimore ^a	354 180
Philadelphie ^a	132 223

^a http://www.marad.dot.gov/MARAD_statistics/

^b <http://www.port-montreal.com>

^c <http://www.portofhalifax.ca/>

Le port de Montréal a particulièrement développé la niche de l'Europe (95,5 % de son volume en 2001) et, sur ce plan, son plus proche compétiteur est le port de New York-New Jersey (tableau 8).

Tableau 8 – Marchandises conteneurisées manutentionnées dans les ports de l'Amérique du Nord en 2001 par régions d'origine et de destination, en millions de tonnes (tiré de O'Keefe, 2003)

Port	Europe	Moyen-Orient et Afrique	Asie et Océanie	Amérique centrale et du Sud	Total
Long Beach, CA	0,81	0,09	22,19	0,67	23,76
Los Angeles, CA	1,16	0,29	19,92	0,69	22,06
New York-New Jersey	7,91	1,55	7,01	2,90	19,38
Vancouver, BC	0,13	0,08	9,57	0,30	10,08
Charleston, SC	4,69	0,86	2,68	1,66	9,89
Montréal, QC	8,02	0,29	0,05	0,04	8,40
Oakland, CA	1,12	0,10	6,91	0,16	8,29
Houston, TX	4,10	1,00	0,51	2,17	7,78
Norfolk, VA	3,42	0,62	2,55	0,90	7,49
Savannah, GA	1,49	0,55	4,39	0,53	6,96
Seattle, WA	0,17	0,04	6,23	0,10	6,53
Miami, FL	1,20	0,13	0,74	3,83	5,91
Tacoma, WA	0,01	0,10	4,68	0,00	4,79
Halifax, NS	2,18	0,38	0,95	0,40	3,91

Les liens intermodaux avec les transports ferroviaire et routier sont des éléments clés dans la compétitivité d'un port. Ils sont de plus en plus à la base de la logistique des entreprises qui confient leur chaîne d'approvisionnement (approvisionnement, transport des produits et entreposage) à des tiers. Cette approche, comprise comme le service porte-à-porte, pose les ports comme un maillon de cette chaîne et transforme les lignes régulières en entreprises de logistique intermodale. Les entreprises peuvent ainsi s'assurer que les gains obtenus en mer ne seront pas perdus au sol (Rioux et al, 2005).

Le port de Montréal a développé un système de transport intermodal qui le place parmi les ports les plus efficaces en Amérique pour les liaisons navire-rail-camion. L'idée d'une réorganisation des activités portuaires comme option d'adaptation aux changements climatiques doit être regardée à la lumière de cette efficacité. Est-il possible de transférer une portion des activités du port de Montréal vers un autre port du Saint-Laurent tout en préservant cette efficacité et particulièrement l'activité économique qui y est intimement associée? À quels coûts?

C) Options du scénario de la réorganisation portuaire

Le déménagement du trafic portuaire englobe différents aspects qui surpassent les considérations purement techniques. Cela implique notamment :

- **L'emplacement des clients.** Une marchandise livrée à Québec pour un client situé à Montréal entraînera un transport et des coûts supplémentaires. Une réduction substantielle de la marge bénéficiaire des transporteurs pourrait devenir un élément suffisant pour que ces derniers acheminent leurs marchandises à destination autrement qu'en passant par le Saint-Laurent.
- **La conjoncture économique.** À l'instar des autres modes de transport, le maritime est étroitement lié à la santé des économies nationales. Une récession économique, en Europe particulièrement, causerait probablement un déclin du trafic maritime dans le Saint-Laurent sans que les coûts de transport y jouent un rôle.
- **L'expertise de la main d'œuvre.** Un port complexe comme celui de Montréal a développé avec le temps une expertise de gestion qu'il est difficile d'acquérir à court terme.
- **Le rôle d'un port comme maillon dans une chaîne d'approvisionnement.** La qualité des liaisons avec les autres modes de transport est un facteur déterminant pour respecter le service juste-à-temps et réduire les coûts de livraison (Rioux et al, 2005).

Les options retenues font l'objet d'une évaluation des coûts économiques directs (pour l'essentiel liés aux infrastructures) et de certains impacts environnementaux et sociaux d'un transfert partiel de conteneurs (400 000 EVP) et de vrac de Montréal vers Québec, Trois-Rivières ou Bécancour. Une combinaison de choix entre ces différents ports sera aussi explorée. L'ensemble des variables relatives à un réaménagement des activités portuaires ne pouvait être pris en compte dans le cadre de ce projet. Ainsi, il importe de souligner qu'un transfert partiel des activités risque de faire perdre les économies d'échelle obtenues avec un volume particulier de marchandises, notamment avec les liens ferroviaires. De plus, un poste à quai de 600 mètres ne pourrait accueillir plus d'un navire à la fois (deux si les navires ne sont pas trop longs), et cela ralentirait

considérablement les activités de transbordement. Finalement, il a été supposé par exemple que la main d'œuvre serait disponible dans le port d'accueil ou que les exploitants de terminaux avaient les capacités financières de déménager les équipements nécessaires ou d'en acquérir de nouveaux (Rioux et al, 2005). Ces points, et d'autres comme la capacité des infrastructures routières et ferroviaires à supporter le transport d'un volume supplémentaire substantiel de marchandises, mériteraient d'être étudiés plus en profondeur. C'est donc sur l'aspect des coûts directs que l'attention a été portée. Le tableau 9 décrit les scénarios analysés. Il faut noter que les scénarios se sont limités aux ports situés dans le secteur fluvial qui disposaient d'une profondeur d'eau suffisante et des terrains pour accueillir les infrastructures nécessaires au réaménagement. Les ports situés en milieu estuarien ou marin, comme Sept-Îles, n'ont pas été retenus parce que des études plus poussées devraient être menées pour qu'on puisse estimer les avantages relatifs pour les transporteurs de transborder à cet endroit plutôt qu'à Halifax ou dans les ports de la côte est américaine.

Tableau 9 – Description des scénarios de réaménagement portuaire (tiré de Rioux et al, 2005)

SCÉNARIOS	DESCRIPTION	IMPLICATIONS
Option 1 Trois-Rivières	<ul style="list-style-type: none"> - Transbordement des conteneurs sur des trains et camions vers leur destination finale. - Même chose pour les marchandises non conteneurisées et les vracs. 	<ul style="list-style-type: none"> - Construction d'un quai rectiligne de 600 m en palplanche. - Construction d'un entrepôt de vracs de 55 000 t. - Aménagement d'un terrain de 20 ha pour manutentionner 400 000 EVP.
Option 2 Québec	Même que scénario 1.	Même que scénario 1.
Option 3 Combinaison* Trois-Rivières et Québec	<ul style="list-style-type: none"> - Conteneurs à Québec. - Vracs à Trois-Rivières. 	
Option 4 Combinaison Trois-Rivières et Bécancour	<ul style="list-style-type: none"> - Vracs à Trois-Rivières. - Conteneurs à Bécancour. 	Ce scénario concentre tout le trafic dans la région de Trois-Rivières et élimine le problème d'acquisition de terrains à Trois-Rivières.
Option 5 Transport des conteneurs vers Montréal par cabotage	<ul style="list-style-type: none"> - Transport des conteneurs par barge de Québec, de Trois-Rivières ou de Bécancour. 	Ce scénario implique un transbordement au premier port de destination et un autre à Montréal avant que la marchandise soit acheminée par camion ou train.

* Cette option alloue à chaque port le trafic qui lui impose le moins de contraintes.

Les investissements nécessaires aux ports d'accueil sont fonction des quantités de marchandises qui auraient à être déplacées. Les capacités d'accueil sont généralement suffisantes et ne requièrent pas d'investissements dans le cas d'un transfert partiel qui implique les céréales et les vracs liquides et solides. Le problème émerge avec les conteneurs, pour lesquels des investissements substantiels seraient nécessaires. Dans le cas d'un transfert de 35 % du trafic de conteneurs (env. 400 000 EVP), les autorités portuaires de Québec ont signalé qu'elles pourraient développer le service, mais que cela devrait se faire en concertation avec Montréal. À Trois-Rivières, ce scénario impliquerait

l'expropriation d'une partie du centre-ville, ce qui apparaît vraisemblablement irréalisable. C'est pourquoi il faudrait, dans ce cas, se tourner vers le port de Bécancour (Rioux et al, 2005).

Différentes sources de données ont été utilisées pour calculer les coûts d'investissement, notamment le port de Vancouver (projet d'agrandissement pour augmenter sa capacité de 400 000 EVP), le port de Montréal, le projet Terminal Ithaque au port de Sept-Îles et des discussions avec des experts de Travaux publics et Services gouvernementaux Canada. À titre indicatif et pour donner une meilleure idée des éléments qui sont à considérer dans la construction d'un terminal à conteneurs, voici quelques données provenant du projet au port de Vancouver :

- Remplissage d'un site de 20 hectares pour les activités et l'entreposage de conteneurs;
- Construction d'un quai de 420 mètres de longueur pour créer un nouveau poste d'amarrage;
- Construction d'un poste de sortie pour les camions;
- Construction d'un poste d'amarrage pour les remorqueurs incluant un quai flottant et un chenal dragué à 6,5 mètres;
- Prolongement du chenal de 350 mètres et dragage à une profondeur de 16 mètres;
- Construction de 23 000 pieds additionnels de voies ferrées;
- Installation d'un système d'éclairage;
- Achat de trois grues pour décharger les navires;
- Dragage de 3,6 millions de mètres cubes de sédiments pour les aménagements;
- Etc.

Le coût total pour ces aménagements est estimé, en première analyse, entre 200 et 250 millions de dollars (Rioux et al, 2005). Comme il a été mentionné précédemment, seuls les coûts directs de nos scénarios, à savoir les coûts du quai et de l'aménagement d'un site de 20 hectares pour l'entreposage des conteneurs, ont été estimés. Les coûts pour

l'équipement (grues), la construction d'un édifice ou d'autres types d'aménagements n'ont pas été pris en considération. Les coûts pour le dragage n'ont pas non plus été pris en compte à cause des multiples incertitudes entourant cette question.

La technique de construction privilégiée est un quai en palplanche d'acier avec une protection cathodique contre la rouille. Cette technique est bien connue et elle permet d'obtenir des bornes d'amarrage solides. Sa durée de vie varie entre 25 et 50 ans. Elle est également moins coûteuse que celles sur pilotis ou en caisson. Les estimations de base ont été faites pour un quai de 600 mètres de longueur pouvant accueillir deux porte-conteneurs de 4 000 EVP, avec un niveau d'eau de 12 ou 16 mètres et une élévation de +8 mètres. L'option à 16 mètres revient à 48 millions de dollars, à quoi il faut ajouter 24 millions pour les 8 mètres additionnels, pour un total de 72 millions de dollars. Les coûts d'aménagement pour entreposer les 400 000 conteneurs sur un terrain de 20 hectares sont estimés, selon les données du port de Vancouver, à 90 millions de dollars, soit environ 450 \$ le mètre carré. Cela implique le remplissage du terrain, les dalles de béton, les réseaux d'eau et d'égouts et l'électricité (Rioux et al, 2005). En incluant les coûts d'aménagement connexes (clôture, éclairage, etc.) d'environ 20 millions de dollars et ceux relatifs aux imprévus (env. 10 %), on obtient le montant de base qui oscille autour de 200 millions de dollars. Il devra néanmoins être ajusté aux conditions économiques de chaque port (tableau 10).

Tableau 10 – Synthèse des coûts unitaires directs pour chacun des ports (tiré de Rioux et al, 2005)

Éléments	Québec	Trois-Rivières	Bécancour
Acquisition du terrain (\$/m ²)	25	80	8
Construction d'un quai rectiligne de 600 m, de 16 m de profondeur et de 8 m de hauteur (\$/m) ^a	131 667 ^b	131 667	131 667
Aménagement du terrain (\$/m ²)	495 ^b	495	495
Entrepôt (\$/m ³)	440	440	440
Coût de construction d'une route simple (\$/km) ^c	1 500 000	1 500 000	1 500 000
Coût de construction d'une autoroute (\$/km) ^c	7 000 000	7 000 000	7 000 000
Coût de construction d'une voie ferroviaire (\$/km) ^c	492 000	492 000	492 000

^a N'inclut pas les coûts de compensation environnementale.

^b Comprend les imprévus.

^c Ministère des Transports du Québec. Ces coûts sont établis d'après une moyenne.

En appliquant ces estimations aux différentes options analysées, nous obtenons les coûts approximatifs pour un transfert partiel du trafic (tableau 11).

Tableau 11 – Synthèse des estimations des coûts directs (M\$) pour un transfert partiel du trafic de Montréal vers un autre port du Saint-Laurent fluvial – scénarios impliquant 400 000 EVP (tiré de Rioux et al, 2005)

Éléments des coûts	SCÉNARIOS				
	Québec	Trois-Rivières	Combinaison des deux ports Québec Conteneurs	Trois-Rivières Vracs	Combinaison Trois-Rivières (vracs) et Bécancour (conteneurs)
Construction d'un quai rectiligne de 600 m (sans dragage) ^a	79	52,8	79	---	52,8
Coût du terrain (s'il y a lieu)	5	16 ^b	---	---	1,6
Aménagement pour conteneurs	99	99	99	---	99
Autres aménagements (clôture, électricité, etc.) ^c	20	20	20	---	20
Voies ferroviaires dans la zone portuaire	50	50	50	---	50
Entrepôt	7	7	---	7	7
TOTAL	260	244,8	248	7	230,4
			255		

^a La différence de coût entre Québec et Trois-Rivières s'explique par la profondeur d'eau plus élevée à Québec (secteur Beauport).

^b N'inclut pas les coûts d'expropriation.

^c Données provenant du projet de Terminal Ithaque.

Les coûts directs ne donnent qu'un aperçu relatif de l'ensemble des coûts qui peuvent être associés à ce genre d'opération. Les coûts indirects ajoutent à la dépense et ils peuvent équivaloir aux coûts directs. Par exemple, si nous conservions le même ratio qu'à Montréal pour l'acheminement des marchandises à leur destination finale, soit 60 % par train et 40 % par camion, il est probable qu'il faudrait apporter des améliorations au réseau ferroviaire entre Québec et Montréal soit par l'ajout d'une voie ferrée, soit autrement. Il en coûterait environ 125 millions de dollars pour ajouter une voie ferrée entre Québec et Montréal, et cette estimation n'inclut pas les coûts des études environnementales ni les autres coûts relatifs à un projet de cette envergure. En ce qui a trait au transport routier, le même ratio se traduirait par l'acheminement de 160 000 conteneurs par ce mode soit l'équivalent d'environ 450 conteneurs par jour. Ces chiffres n'incluent que les marchandises importées au Canada et non celles que nous exportons. Le nombre de camions qui circulent au port de Montréal quotidiennement (entrées et sorties) tourne autour de 1 500 actuellement. Si le tiers des activités étaient déplacées à Québec, c'est près de 500 camions supplémentaires qui circuleraient quotidiennement sur le réseau routier de la vieille capitale. La pression exercée sur le réseau routier urbain serait considérable, et des travaux d'aménagement seraient nécessaires pour donner un accès rapide aux autoroutes. En moyenne, les coûts de construction d'une route simple s'élèvent à 1,5 million de dollars du kilomètre et ceux d'une autoroute, à 7 millions de dollars du kilomètre. L'estimation initiale (coûts directs) grimperait facilement de quelques centaines de millions de dollars, seulement pour mettre le réseau routier à niveau. De plus, l'aménagement du réseau devrait se faire dans l'optique d'éviter les conséquences sociales telles que les engorgements et embouteillages urbains. Ce ne serait sûrement pas chose facile dans une ville comme Québec où une bonne partie des infrastructures portuaires sont situées dans la vieille ville. Cette précaution impliquerait fort probablement des coûts supplémentaires. L'impact social de cette pression routière serait rapidement ressenti et s'accentuerait davantage si le nombre de conteneurs transbordés devait augmenter. Le financement des routes et autoroutes est déjà problématique, et on parvient difficilement à maintenir un entretien adéquat. Choisir d'augmenter l'élément qui contribue majoritairement à la détérioration du réseau ne sera sûrement pas une option facile à envisager pour les autorités publiques.

D) Le cabotage

Une autre façon de transporter les marchandises jusqu'à Montréal serait d'utiliser des navires à plus faible tirant d'eau qui ne seraient pas affectés par la baisse des niveaux d'eau. Plusieurs avantages environnementaux sont liés à cette option, notamment le fait qu'elle entraîne moins de pollution de l'air, de bruit et de poussière que les autres modes de transport. En outre, le cabotage évite les pressions supplémentaires sur les réseaux routier et ferroviaire de même que les problèmes de cohabitation avec le voisinage immédiat. Enfin, en construisant une flotte adaptée à la Voie Maritime, on pourrait acheminer, en saison, les marchandises à destination des ports des Grands Lacs directement vers ces centres ce qui éviterait un transbordement à Montréal. Les délais pour un trajet direct risqueraient toutefois d'être plus longs qu'avec un transbordement à Montréal. Certains désavantages sont par contre liés à cette option. Elle implique plusieurs manutentions (transbordements) des conteneurs et augmente ainsi les coûts pour le transporteur. Actuellement, les frais de transbordement sont de près de 190 \$ par conteneur en moyenne. Au total, trois transbordements seraient nécessaires pour acheminer un conteneur à Montréal, à savoir un déchargement et un chargement à Québec, et un autre déchargement à Montréal. Cette manutention seule ajouterait des frais de 380 \$ par conteneur, sans compter les coûts d'utilisation des quais (présentement autour de 8 000 \$ pour deux jours), d'acquisition d'équipements (grues), d'entreposage et les autres coûts inhérents à cette opération. Des délais additionnels de quelques jours seraient aussi à prévoir pour ces manutentions. L'acquisition de barges ou de navires adaptés au transport des conteneurs serait également nécessaire. Dans le cas des barges, il n'est pas assuré qu'on puisse les utiliser dans les glaces. Cela dit, même si cette option implique plusieurs contraintes économiques, elle ne doit pas être exclue, car elle offre l'avantage de maintenir le transport par voie d'eau même dans les scénarios de changements climatiques pessimistes. Il serait néanmoins approprié, dans l'éventualité où cette option serait étudiée plus en profondeur de revoir la façon dont la charge des coûts supplémentaires pourrait être distribuée.

E) Avantages et inconvénients des scénarios

Dans le contexte de cet inventaire des options permettant au transport maritime de faire face, en gardant essentiellement un même degré de développement global, à des bas niveaux durables sur le Saint-Laurent, la réorganisation des activités portuaires se présente comme une option pouvant apporter des éléments réels et importants de solution, mais aussi des inconvénients difficiles à neutraliser, du moins à court terme. Ces avantages et ces inconvénients d'une réorganisation tiennent à divers aspects du transport maritime et diffèrent selon les scénarios évoqués.

Le déplacement des marchandises s'inscrit dans une dynamique d'ensemble appelée chaîne d'approvisionnement (Rioux et al, 2005). La principale caractéristique de cette chaîne réside dans la fluidité du transport des marchandises. Sur ce point, le port de Montréal détient un avantage majeur par ses liens multimodaux et par le fait qu'il est desservi par deux compagnies majeures de chemin de fer, ce qui n'est le cas ni pour Québec ni pour Trois-Rivières (Rioux et al, 2005).

Le tableau 12 compare qualitativement les options analysées sous l'angle des variables économique, sociale et environnementale, tandis que le tableau 13 présente une synthèse de quelques impacts directs du réaménagement. Quelques précisions doivent cependant être faites au préalable pour l'interprétation des données (Rioux et al, 2005) :

- À Trois-Rivières, le déménagement des conteneurs fait face à des contraintes majeures en matière de superficies disponibles pour l'entreposage et l'aménagement d'une gare de triage. Un agrandissement ne pourrait se faire que par l'expropriation d'une partie considérable du centre-ville, ce qui apparaît peu réaliste.
- Les arguments pour convaincre à court terme un transporteur de déménager vers un autre port ne sont pas nombreux. D'une part, l'échelle de temps dans laquelle les changements climatiques sont attendus est à l'extérieur du cadre de planification habituel. L'entrepreneur hésitera, de façon légitime, à investir des sommes considérables pour déplacer ses infrastructures, alors

que l'incertitude est encore grande quant à l'ampleur, à la fréquence et à la durée des impacts des changements climatiques.

- La présence d'un transporteur dans un corridor de transport est une décision d'affaires. Ne pouvant déterminer à l'avance quelle sera la croissance du corridor commercial Amérique du Nord-Europe, les transporteurs useront de prudence avant de planifier un quelconque déménagement. De plus, le coût de transport et la qualité des services sont des variables déterminantes pour la localisation d'un transporteur. Ce sont elles qui l'inciteront à demeurer sur le Saint-Laurent ou à trouver un nouvel endroit.
- Finalement, le déplacement partiel du trafic maritime de Montréal vers un autre port implique, à des degrés très différents selon les scénarios, des coûts environnementaux et sociaux qui devront être considérés attentivement. Ainsi, même si les impacts environnementaux aquatiques seraient restreints, ceux subis par les domaines terrestre et atmosphérique risqueraient de croître à cause d'une utilisation plus intensive des transports routiers et ferroviaires. Ce transfert modal augmenterait, entre autres, les émissions des gaz à effet de serre, ce qui ne s'inscrit pas dans les perspectives du développement durable.

Tableau 12 – Comparaison des scénarios sur la base d'aspects économiques, sociaux et environnementaux (adapté de Rioux et al., 2005)

	Trois-Rivières	Québec	Trois-Rivières et Québec	Trois-Rivières et Bécancour	Cabotage
Connexions routières	<p>Le coût de maintenance du réseau augmentera à cause d'un usage plus intensif.</p> <p>Le réseau impose des restrictions de charges en période de dégel.</p>	<p>Augmentation de la circulation sur les boulevards Champlain et de la Capitale occasionnant des problèmes de congestion.</p> <p>S'ajoute aux deux éléments du scénario de Trois-Rivières.</p>	<p>Même impact que les deux premiers scénarios, mais de moindre envergure.</p>	<p>Même impact que les deux premiers scénarios, mais de moindre envergure.</p>	<p>Évite l'impact sur le réseau.</p>
Connexions ferroviaires	<p>Une seule compagnie majeure dessert le territoire.</p> <p>L'extension du réseau représente un coût important. Pas d'espace pour une gare de triage.</p>	<p>Même impact que le scénario précédent.</p>	<p>Même impact que le premier scénario, mais de moindre envergure.</p>	<p>Même impact que le premier scénario, mais de moindre envergure.</p>	<p>Évite l'impact sur le réseau.</p>
Impact environnemental	<p>Conservation et protection des habitats. Application des mesures de compensation environnementale (aucune perte nette en habitat).</p> <p>Pollution. Accroissement de la pollution</p>	<p>Même impact que le premier scénario précédent.</p>	<p>Même impact que le premier scénario.</p>	<p>Même impact que le premier scénario.</p>	<p>Accroissement du nombre de navires. Risque limité grâce aux mesures de contrôle du trafic maritime sur le fleuve.</p> <p>Pollution. Moins de pollution de l'air, de bruit et de poussière par rapport</p>

	atmosphérique.				aux autres scénarios.
	Trois-Rivières	Québec	Trois-Rivières et Québec	Trois-Rivières et Bécancour	Cabotage
Cohabitation urbaine	Augmentation du bruit, de la poussière et de la congestion urbaine.	Augmentation du bruit, de la poussière et de la congestion urbaine.	Augmentation du bruit, de la poussière et de la congestion urbaine, mais au total moindre que dans les deux scénarios précédents.	Augmentation du bruit, de la poussière et de la congestion urbaine mais au total moindre que dans les deux premiers scénarios.	Sensiblement moins de problèmes de voisinage par rapport aux autres scénarios.
Statut juridique	Administration portuaire au sens de la Loi maritime du Canada.	Administration portuaire au sens de la Loi maritime du Canada.	Administration portuaire au sens de la Loi maritime du Canada.	Le port de Bécancour est géré par la Société du parc industriel et portuaire de Bécancour, de compétence provinciale. Des arrangements plus complexes que pour les autres options seraient à convenir.	Ne s'applique pas.
Expertise	Aucune dans le domaine des conteneurs.	Aucune dans le domaine des conteneurs.	Aucune dans le domaine des conteneurs.	Aucune dans le domaine des conteneurs. Par ailleurs, Bécancour a une expertise de desserte pour une clientèle locale et régionale.	À acquérir peu importe le scénario.
Acceptabilité sociale	Oppositions à prévoir: augmentation du trafic routier et expropriation d'une partie importante du centre-ville.	Oppositions à prévoir: statut touristique de la ville et appartenance au patrimoine mondial de l'UNESCO.	Même impact que les scénarios 1 et 2.	Même impact que le scénario 1 pour Trois-Rivières.	Ne devrait pas soulever d'opposition.

Une comparaison qualitative de certains impacts, en prenant le statu quo comme point de référence, indique que le déplacement du trafic, tout en offrant, au moins à long terme, des possibilités intéressantes, créerait à court terme des contraintes difficiles et coûteuses à surmonter.

Tableau 13 – Évaluation qualitative de l'impact de certaines variables du réaménagement portuaire (adapté de Rioux et al, 2005)

Variable	Trois-Rivières	Québec	Trois-Rivières et Québec	Trois-Rivières et Bécancour	Cabotage
Pollution atmosphérique	+ élevé Trains et camions de trois à sept fois	+ élevé Trains et camions de trois à sept fois	+ élevé Trains et camions de trois à sept fois	+ élevé Trains et camions de trois à sept fois	+ élevé si une proportion du trafic se fait par la route ou le rail
Perte d'habitat Cohabitation urbaine (bruit, poussière, etc.)	+ élevé + élevé	+ élevé + élevé	+ élevé + élevé	+ élevé + élevé	+ élevé Similaire
Délai de livraison	+ élevé				
Coûts de transport	+ élevé				

En plus de ces considérations, il faut ajouter que le secteur privé aurait à assumer une partie des coûts de cette réorganisation. Les exploitants de terminaux sont propriétaires des équipements fixes et mobiles et auraient donc à les déplacer ou à en acquérir de nouveaux. Ce transfert partiel n'exclut pas la possibilité qu'une compagnie soit amenée à travailler dans un nouveau port tout en maintenant ses activités à Montréal. Cette duplication d'activités, de personnel et d'équipements affecterait directement la rentabilité des entreprises, d'où l'improbabilité qu'elles optent pour une telle stratégie. Il faut également rappeler qu'un certain volume de conteneurs a été manutentionné à Québec dans les années soixante-dix et que les entreprises avaient alors décidé de transférer toutes leurs activités à Montréal pour des questions économiques et de délai de livraison. Il faudrait que la situation soit très contraignante pour que les transporteurs en

viennent à choisir l'inverse. Finalement, le transport maritime est actuellement le mode de transport qui a le moins d'impacts sociaux et environnementaux et qui émet le moins de gaz à effet de serre dans l'atmosphère par tonne de marchandises transportée (SLV 2000 – SODES, 2000). Il faudrait, dans ce contexte, que les avantages d'arrêter les navires en aval de Montréal surpassent véritablement les inconvénients que cela implique.

3 Discussion

L'hypothèse initiale supposait que des changements climatiques se produiront au cours des prochaines décennies et que ceux-ci entraîneront une baisse des niveaux d'eau dans le système Grands Lacs–Saint-Laurent. À la lumière des connaissances et outils actuels, une estimation de l'amplitude des fluctuations des niveaux d'eau et de leur distribution spatiale a été dans un premier temps faite pour la partie fluviale. Dans un deuxième temps, différentes options d'adaptation ont été sommairement étudiées en fonction de leur capacité potentielle à maintenir la profondeur nominale actuelle du fleuve pour les besoins de la navigation, des coûts directs appréhendés de leur mise en œuvre de même que de certains impacts environnementaux associés. Bien qu'il soit prématuré de comparer les différentes options à cause de l'absence de certaines données ou de leur manque d'homogénéité, le tableau 14 présente une synthèse des éléments les plus marquants parmi ceux recueillis.

Tableau 14 – Synthèse des résultats

Options	Gains en hauteur d'eau estimés (cm)	Coûts	Impacts environnementaux (qualitatifs)
Techniques et technologiques (SINECO et squat)	< 15	Ne s'applique pas	Faibles
Aménagement fluvial Dragage Ouvrages hydrauliques	> 50	70 M\$ et + Entre 50 et 500 M\$	Significatifs
Modification de la configuration des navires	En fonction de la baisse	Un porte-conteneurs 4 000 EVP = entre 55 et 60 M\$US	Faibles
Réorganisation portuaire	Ne s'applique pas	Entre 250M\$ et 1 G\$	Faibles en milieu aquatique et élevés en milieu terrestre, dans l'atmosphère et sur le plan social si les cargaisons transitent par transport terrestre

Ces résultats montrent des différences marquées tant en matière de coûts que d'impacts environnementaux. L'option technique ou technologique (SINECO et squat) ne comporte pas d'impacts environnementaux, mais il ne semble pas qu'on puisse obtenir grâce à elle un gain en hauteur d'eau qui soit supérieur à 15 centimètres pour l'instant, à moins d'une avancée substantielle sur le plan des prévisions météorologiques à long terme.

L'option de l'aménagement fluvial (dragage et ouvrages hydrauliques) donne des résultats plus significatifs pour le rehaussement du plan d'eau, mais implique aussi des impacts environnementaux substantiels. Le dragage, si fait en une seule opération, coûte relativement peu lorsque comparativement aux autres options. Cette solution n'apparaît

cependant pas durable si des baisses de niveaux d'eau importantes (> 50 cm) et récurrentes devaient se produire, car il faudrait draguer continuellement. Le dragage pourrait par contre être considéré comme l'une des solutions transitoires dans l'attente d'avoir de meilleures connaissances sur l'orientation réelle que prendront les changements climatiques.

Les résultats obtenus avec les ouvrages hydrauliques sont inégaux. Dans le cas des digues transversales, une succession de digues doit être érigée pour qu'on obtienne un rehaussement significatif du plan d'eau. Les simulations effectuées ont permis d'observer que leur efficacité à rehausser le plan d'eau dépend de la distance entre certaines d'entre elles (dignes #7, 8 et 9) et Montréal. De plus, cette option seule ne réglerait pas le problème dans le secteur du lac Saint-Pierre. Il faudrait les combiner avec d'autres ouvrages construits en aval du lac, ce qui entraînerait une multiplication d'ouvrages sur le fleuve, augmentant ainsi les impacts environnementaux cumulatifs et les obstacles à la navigation. Enfin, la conception de ces ouvrages devrait être revue pour corriger l'appel d'eau qui a été observé en aval des structures.

Pour leur part, les digues longitudinales ont donné des résultats intéressants tant en matière de rehaussement du plan d'eau que de correction du problème d'appel d'eau. Des simulations plaçant ces structures à d'autres endroits, notamment en aval du lac Saint-Pierre, permettraient de mesurer leur efficacité sur une plus grande distance. Ce type de structure requiert cependant un tracé rectiligne sur une assez grande distance, ce qui limite passablement le choix des sites. De plus, les coûts estimés sont importants et presque similaires à ceux du barrage. À cet égard, il serait utile de comparer plus exhaustivement les impacts environnementaux de ce type de structure avec ceux du barrage.

Les simulations effectuées pour l'option d'un barrage à la hauteur de Trois-Rivières ont montré que le rehaussement du plan d'eau serait de plus de 2 mètres à Montréal. Ce rehaussement compenserait entièrement, et même trop, la diminution des niveaux d'eau. Des ajustements dimensionnels de l'ouvrage seraient nécessaires pour que les gains en

hauteur d'eau correspondent aux besoins prévisibles selon le scénario le plus pessimiste à long terme. Un des principaux intérêts de cette option est qu'en plus de rehausser le plan d'eau, ce type de structure permet de retenir l'eau au besoin. Ce dernier point serait un élément important à considérer si les changements climatiques allaient, de façon récurrente, dans le sens des scénarios les plus pessimistes. Il est probable, si cette situation se produisait, que des usages fluviaux autres que la navigation commerciale seraient également affectés. La nature, la durée et l'étendue des impacts inciteront à des prises de décision visant la meilleure stratégie d'intervention à long terme. Dans ce contexte, une option comme un barrage pourrait faire l'objet d'une réflexion collective, dans un cadre comme la gestion intégrée, où l'ensemble des usages fluviaux pourrait être pris en considération.

En ce qui concerne les ouvrages hydrauliques, beaucoup d'autres études seraient nécessaires pour évaluer correctement les gains et désavantages qui résulteraient de l'érection de telles structures sur le Saint-Laurent. Certaines structures comme les barrages amovibles n'ont pas fait l'objet d'une analyse particulière. Même si les coûts actuels de ces structures et leur entretien peuvent apparaître dissuasifs, il se peut que leur caractère amovible réduise les impacts environnementaux et que, globalement, les coûts soient réduits. Ce genre d'analyse devra nécessairement être effectuée avant toute prise de décision. D'autres points devraient aussi être regardés plus attentivement, notamment les impacts environnementaux de ces structures, leur design (pour permettre la libre circulation de la faune aquatique), leur localisation optimale et la façon de les financer et de les rentabiliser. Par ailleurs, les simulations effectuées dans cette étude utilisaient un débit de référence de 5 000 mètres cubes par seconde à Sorel. D'autres simulations devraient être faites avec différents débits de crue pour évaluer une plus grande gamme de conséquences de ces structures hydrauliques sur le plan des inondations, du régime des glaces, etc. Enfin, un des défis à relever dans le cas des options d'aménagement fluvial sera de se conformer aux politiques actuellement en vigueur et à venir, notamment en ce qui concerne la compensation environnementale liée au principe qui veut qu'il n'y ait aucune perte nette en habitat.

L'option de modifier la configuration structurale des navires semble, *a priori*, comporter plusieurs limites. Les caractéristiques fluviales en amont de Québec, telles que les courbes et la largeur même du chenal de navigation, laissent supposer que la limite, en matière de longueur et de manœuvrabilité, semble avoir été atteinte. Il faudrait dès lors se tourner vers l'élargissement des navires. Cette option pourrait être considérée comme une mesure d'adaptation dans le cas seulement où le tirant d'eau des navires serait également réduit. La marge de manœuvre pour assurer une navigation sécuritaire dans un chenal restreint comme la voie navigable n'est pas sans limite, même si les instruments de navigation gagnent en précision avec les années. Instaurer une circulation maritime à sens unique pourrait dans certains cas constituer une solution, mais il faudrait bien analyser quels seraient les impacts de cette façon de faire sur la fluidité globale du trafic maritime fluvial. Des études sur les limites de largeur des navires qu'il serait possible d'imposer sur le fleuve, en fonction des gains correspondants en tirant d'eau et en rentabilité, devraient être conduites pour bien définir le potentiel de cette option. En adaptant sa flotte de navires au Saint-Laurent, un armateur court le risque que celle-ci devienne moins flexible, c'est-à-dire que ses navires ne puissent aller sur les cours d'eau ayant des écluses plus étroites que la largeur du navire. À près de 60 millions de dollars américains du porte-conteneurs (4 000 EVP), le commerce sur le Saint-Laurent devra être des plus attrayants pour qu'un armateur décide d'investir pour la construction d'une nouvelle flotte plutôt que de diriger ses navires vers un port non affecté par les baisses de niveaux d'eau.

L'analyse du transfert partiel des marchandises de Montréal vers un autre port fluvial, quoique incomplète, a mis en lumière certaines limites pour la mise en œuvre de cette option. Il apparaît peu probable, dans un premier temps, que le rôle de plaque tournante joué par le port de Montréal dans le transport des conteneurs dans le nord-est de l'Amérique puisse être joué par un autre port du Saint-Laurent. Les bénéfices économiques seraient, du moins à court terme, très limités pour les transporteurs, alors que les impacts environnementaux terrestres et les conséquences sociales associés à cette réorganisation risqueraient, dans plusieurs scénarios, d'être considérables. À moins d'un changement majeur dans la logistique du transport, d'une volonté politique d'ensemble

bien affirmée ou de la mise en place d'incitatifs économiques importants par les gouvernements, cette option apparaît, à ce stade-ci, comporter plus d'inconvénients que d'avantages. Le cabotage, pour sa part, permettrait de maintenir le transport par voie d'eau et, de ce fait, réduirait plusieurs impacts environnementaux mentionnés précédemment. Mais le cabotage comporte tout de même certains désavantages, dont la duplication des infrastructures pour la manutention d'un grand volume de conteneurs, les nombreux transbordements et les frais de quai, pour n'en nommer que quelques-uns. Le principal avantage du cabotage est qu'il peut être mis progressivement en place. Dans le contexte d'une planification à long terme qui mettrait à contribution les autorités gouvernementales et portuaires et les armateurs, il serait concevable de trouver une façon de réorganiser les activités portuaires sans compromettre le rôle joué par le port de Montréal.

La simulation des variations des niveaux d'eau à partir des modèles climatiques et océaniques actuels semble être une première estimation de ce genre pour le Saint-Laurent. L'exercice est intéressant à cause des résultats contrastés obtenus, mais il faut garder à l'esprit que ces simulations contiennent encore plusieurs incertitudes et qu'un raffinement des prévisions climatiques est indubitablement nécessaire. Les quelques études menées sur les variations des niveaux d'eau dues aux changements climatiques donnent des résultats variables, particulièrement sur l'amplitude des baisses à la hauteur de Montréal. Ainsi, Millerd et al. (2004) ont élaboré un index des impacts des changements climatiques sur le transport maritime dans le système Grands Lacs–Saint-Laurent à partir de trois scénarios climatiques différents (CCC GCM1, CCCma2030 et CCCma2050). Leurs résultats suggèrent que les impacts à Montréal seront nuls ou minimes compte tenu de la profondeur d'eau disponible au datum des basses eaux (IGLD 85), et ce, même pour leur scénario le plus pessimiste. On ne peut cependant pas établir clairement sur le plan méthodologique, si leur estimation a été faite seulement pour les navires qui transitent dans la Voie maritime (profondeur d'eau disponible : 8,2 m) ou s'ils ont aussi tenu compte des navires à plus fort tirant d'eau qui se rendent à Montréal (profondeur d'eau disponible : 11,3 m). Les travaux de Mortsch et al. (2000) indiquaient une réduction des apports d'eau des Grands Lacs de l'ordre de 40 % et, par une relation

débit-niveau, concluaient à une baisse des niveaux d'eau d'environ 1 mètre à Montréal. Croley II (2003) a revu la réduction des apports d'eau des Grands Lacs à la baisse et il l'a estimée à environ 24 % pour le pire scénario. Il n'a toutefois pas fait de projections relativement aux niveaux d'eau. Les estimations de Croley II et celles de Fagherazzi et al. (2004) ont été utilisées par Lefavre (2005) pour calculer les variations des niveaux d'eau du Saint-Laurent pour la présente étude. Les estimations auxquelles il parvient se rapprochent de celles faites par Mortsch et al. (2000) pour Montréal soit une baisse des niveaux d'eau de près de 1 mètre. Cependant, ses calculs sont basés sur une diminution des apports d'eau de 24 %, alors que Mortsch les estimait à 40 %. Ces différences montrent que ce domaine de recherche est en pleine évolution et qu'il faut en conséquence considérer avec circonspection les estimations produites.

La connaissance de l'amplitude et des fréquences des fluctuations des niveaux d'eau doit être considérée comme un élément complémentaire à l'objectif de la présente étude. Néanmoins, la considération des scénarios climatiques les plus récents a permis de vérifier les possibilités et limites des options d'adaptation analysées.

Finalement, comme il a été indiqué précédemment, les scénarios analysés ne prenaient pas en compte de nouvelles modalités de gestion, particulière ou adaptative, du barrage Moses-Saunders pour les besoins de la navigation. Cette gestion sera le premier recours, car la navigation fait partie des usages prioritaires selon le Traité des eaux limitrophes canado-américain (1909, art. 8) et le plan de régularisation du lac Ontario et du fleuve Saint-Laurent (1958D). Toutefois, à la lumière des discussions qui ont lieu relativement au nouveau plan de régularisation de la Commission mixte internationale et du rapport final du Conseil d'étude sur la régularisation du lac Ontario et du fleuve Saint-Laurent, il ne faut pas tenir pour acquis que cela pourra toujours suffire.

Même si les Grands Lacs renferment près de 18 % de la réserve d'eau douce mondiale, celle-ci n'est pas à l'abri de pressions naturelles et anthropiques qui pourraient réduire les niveaux d'eau en deçà des seuils critiques. Les projections climatiques effectuées pour le bassin des Grands Lacs prévoient un accroissement de la température de l'air et de

l'évapotranspiration (Croley II, 2003). Ces scénarios estiment entre 4 et 24 % la baisse des apports d'eau vers les lacs. Une baisse de 24 % affecterait fort probablement l'équilibre entre les apports et les sorties d'eau. Étant donné que la marge de manœuvre est sensiblement mince en ce qui a trait à la gestion de l'eau et à sa régularisation pour satisfaire les différents usages, une diminution significative et constante de la réserve d'eau ne pourrait qu'impliquer des choix difficiles à faire. D'où l'intérêt d'amorcer dès maintenant une réflexion sur la gestion de l'eau en rapport avec les changements climatiques. Cet exercice de réflexion et de documentation permet à tout le moins de prévoir certains effets négatifs, de mesurer les limites des infrastructures actuelles et d'explorer différentes pistes de solution, et ce, malgré les incertitudes relatives aux prévisions des modèles. En faisant ce genre d'exercice pour le bassin de la rivière Colorado aux États-Unis, Christensen et al. (2004) ont estimé improbable qu'un changement de la politique d'exploitation du système de réservoirs dans ce bassin puisse atténuer adéquatement les effets hydrologiques associés aux changements climatiques. Du fait que ces réservoirs servent à de multiples usages (consommation, hydroélectricité, contrôle des inondations) et que les possibilités de compenser les pertes en apport d'eau sont minimales, ils concluent qu'une demande de réduction de la consommation d'eau sera nécessaire si les prévisions climatiques s'avéraient exactes.

Ce pronostic illustre bien le défi qui serait à relever sur le plan de la gestion de l'eau dans le système Grands Lacs–Saint-Laurent, et son degré de complexité, si l'on veut prendre en considération l'ensemble des usages et les intérêts des usagers.

Conclusion

Dans le cadre de la mise en œuvre de la Stratégie de navigation durable élaborée en 2004, le Comité de concertation navigation a estimé que les fluctuations des niveaux d'eau sur le Saint-Laurent pouvaient affecter les activités maritimes et portuaires et qu'à cet égard, des options d'adaptation devaient être étudiées en relation avec les principes d'une navigation durable (D'Arcy, Bibeault et CCN, 2004).

De manière exploratoire et avec comme objectif d'amorcer une réflexion sur les mesures d'adaptation aux changements climatiques, quelques options ont été étudiées et, dans la mesure du possible, leur incidence économique, environnementale et sociale a été considérée. Cette étude a permis de découvrir certaines limites et possibilités propres à chaque option. Des études supplémentaires seraient toutefois nécessaires pour qu'on soit en mesure de bien établir celles qui s'inscrivent dans la perspective du développement durable.

L'ensemble des impacts environnementaux de certaines des options d'adaptation n'a pu être estimé ici compte tenu du fait qu'il s'agissait d'une première évaluation de la capacité potentielle de ces options à rehausser le plan d'eau. L'emplacement des ouvrages hydrauliques choisi pour les simulations est loin, par exemple, d'être définitif. D'autres simulations devront être faites pour tenir compte d'un plus grand nombre de facteurs, notamment d'une gamme variée de débits de crue, du mouvement des glaces, du transport sédimentaire fluvial et de l'impact sur les habitats fauniques, pour n'en nommer que quelques-uns. Ces points et d'autres mériteraient nécessairement d'être mieux analysés pour qu'on évalue correctement les impacts réels des scénarios.

Cette initiative d'étudier différentes options d'adaptation pour le transport maritime relativement aux changements climatiques semble, à notre connaissance, être une première pour le Saint-Laurent. L'exercice a été conduit dans l'optique de soutenir la réflexion du Comité de concertation navigation, lequel rassemble des intervenants aux intérêts variés et différents. Cette réflexion élargie a permis entre autres de mettre en lumière la complexité et la pertinence de certaines options lorsqu'elles sont analysées au

regard des exigences du développement durable. Des efforts et ressources additionnels mériteraient d'être investis pour reconduire cet exercice car, même si certaines pistes de solution ont été précisées, bon nombre de questions ne demeurent encore que partiellement éclaircies.

Les incertitudes quant aux impacts réels qu'auront les changements climatiques sont nombreuses. Cependant, il apparaît judicieux en matière d'adaptation d'amorcer déjà une réflexion sur les actions qui devront être entreprises, afin de limiter les effets négatifs de ces changements. Plusieurs pays de la Communauté européenne s'inscrivent déjà dans cette démarche en considérant les effets potentiels des changements climatiques dans leur plan d'aménagement à moyen et long terme (European Environment Agency, 2005). C'est un exemple concret d'application du principe de précaution, où l'on vise une attitude proactive plutôt que réactive au regard des problèmes climatiques futurs. À l'instar de bien d'autres pays, le Canada semblent faire des efforts encore bien timides en matière d'adaptation. Un groupe de travail intergouvernemental a récemment été constitué pour élaborer un cadre national d'adaptation aux changements climatiques (Groupe de travail intergouvernemental sur les impacts des changements climatiques et l'adaptation, 2005). Six éléments composent ce cadre : la sensibilisation, la coordination, l'intégration dans les politiques, la stimulation de la recherche, l'appui aux réseaux de partage des connaissances et la conception d'outils pour planifier l'adaptation. Deux rôles sont attribués aux gouvernements dans le processus d'adaptation, soit, d'une part, la nécessité de s'adapter eux-mêmes et, d'autre part, être les instigateurs de l'adaptation dans les autres secteurs de la société. Les auteurs incitent à être proactifs, ce qui donnerait une meilleure marge de manœuvre pour éviter ou circonscrire les dommages, étaler les coûts au fil du temps et investir dans de nouveaux marchés. En agissant dès maintenant, nous pouvons prendre de meilleures décisions en matière d'aménagement du territoire, d'infrastructure, de gestion des ressources et sur d'autres aspects de la politique publique et des investissements, et éviter de nous engager dans des voies qui pourraient ne pas être durables (Groupe de travail intergouvernemental sur les impacts des changements climatiques et l'adaptation, 2005).

La présente étude va dans le sens de cette invitation à passer à l'action. L'inertie est probablement l'attitude la moins préventive à adopter dans le domaine des changements climatiques. Trop souvent, les coûts causés par les impacts dépassent ceux qu'aurait engendrés la prévention. D'où l'intérêt d'explorer dès à présent de nouvelles possibilités afin de maintenir, pour les prochaines générations, des activités telles que la navigation sur le Saint-Laurent.

En outre, les impacts appréhendés des changements climatiques débordent le cadre des seules activités de navigation. Pour cette raison, le Comité de concertation navigation est d'avis qu'une réflexion sur la vocation future du Saint-Laurent doit être amorcée au cours des prochaines années. Cette réflexion, pour être fructueuse, devrait toutefois reposer sur les principes du développement durable et d'une gestion intégrée du Saint-Laurent, et non sur la défense d'intérêts particuliers.

Bibliographie

- AMERICAN ASSOCIATION OF PORT AUTHORITIES. 2003. Testimony of rear Admiral Richard M. Larrabée (USCG-Ret.), Director, Port Commerce Department, Port Authority of New York and New Jersey, Before the House Transportation and Infrastructure Subcommittees on Coast Guard and Maritime Transportation and Water Resources and Environment, 11p.
- AMERICAN ASSOCIATION OF PORT AUTHORITIES. 2005. Current Issues Facing the Industry. www.aapa-ports.org/industryinfo/currentissues.html. Consulté le 2005-07-21.
- BACLET, A. et F. MONTAGNÉ. 2002. Évaluation de l'adaptabilité des organisations liées à la navigation commerciale sur le Saint-Laurent, dans un contexte de changements climatiques. Rapport de stage d'option scientifique. Université du Québec à Montréal, Département d'humanités et de sciences sociales. 48 p.
- BCDM CONSEIL INC. 2005a. Rapport IV : La pêche sportive au lac Saint-Pierre en 2003. Pêche en eau libre : évaluation des retombées économiques. Pour le ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche sur la faune, Québec. 89 p.
- BCDM CONSEIL INC. 2005b. Rapport III : La pêche sportive au lac Saint-Pierre en 2003. Pêche sur la glace : évaluation des retombées économiques. Pour le ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche sur la faune, Québec. 67 p.
- BRIGGS, M., S.T. MAYNORD, C.R. NICKLES and T.N. WALLER. 2004. Charleston Harbor Ship Motion Data Collection and Squat Analysis. US Army Corps of Engineers. ERDC / CHL CHETN-IX-14. 20 p.
- BURTON, I. 2004. Climate Change and the Adaptation Deficit. In FENECH, A., D. MACIVER, H. AULD, R. BING RONG and Y. YIN (Eds). Climate Change: Building the Adaptative Capacity. Meteorological Service of Canada, Environment Canada. Toronto, Ontario, Canada. P. 25-33.
- CALDWELL, H., K.H. QUINN, J. MEUNIER, J. SUHRBIER and L. GRENZEBACK. 2002. Potential Impacts of Climate Change on Freight Transport. 14 p. www.climate.volpe.dot.gov/workshop/002. Consulté le 2005-06-15.
- CENTRE SAINT-LAURENT. 1996. Rapport synthèse sur l'état du Saint-Laurent. Volume 1 : L'écosystème du Saint-Laurent. Environnement Canada – région du Québec, Conservation de l'environnement. Éditions MultiMondes. Coll. Bilan Saint-Laurent.
- CHRISTENSEN, N.S., A.W. WOOD, N. VOISIN, D.P. LETTENMAIER and R.N. PALMER. 2004. The Effects of Climate Change on the Hydrology and Water Resources of the Colorado River Basin. Climatic Change, 62: 337-363.
- CONNELLY, N.A., J-F BIBEAULT, J. BROWN and T.L. BROWN. 2005. Estimating the Economic Impact of Changing Water Levels on Lake Ontario and the St. Lawrence

River for Recreational Boaters and Associated Businesses. A Final Report of the Recreational Boating and Tourism Technical Work Group (International Joint Commission). Executive Summary. 17 p.

CONSEIL CANADIEN DES MINISTRES DE L'ENVIRONNEMENT. 2003. Le climat, la nature, les gens : indicateurs d'évolution du climat au Canada. Réalisé par le groupe de travail du Conseil canadien des ministres de l'environnement sur les indicateurs de changements climatiques. 51 p.

CONSULTANTS JACQUES BÉRUBÉ INC. 1997. Dragage sélectif des hauts-fonds dans la voie navigable du Saint-Laurent entre Montréal et le cap à la Roche. Document complémentaire à l'étude environnementale préparé pour le compte du Port de Montréal dans le cadre de la procédure fédérale. 71 p. + annexes.

CONSULTANTS ROPARS. 2005. Adaptation du transport maritime aux changements climatiques – Option de régularisation fluviale. Rapport préparé pour le Comité de concertation navigation. 66 p. + annexe.

CROLEY II, T.E. 2003. Great Lakes Climate Change Hydrologic Impact Assessment I.J.C. Lake Ontario-St.Lawrence River Regulation Study. NOAA Technical Memorandum GLERL – 126. 77 p.

DAIGLE, G., E. RENY-NOLIN, L.-P. RIVEST, Y. MAILHOT et M. LEGAULT. 2005*b*. Rapport I : La pêche sportive au lac Saint-Pierre en 2003. Pêche sur la glace : effort de pêche, succès et récolte des principales espèces de poissons. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, Direction de la recherche sur la faune. Université Laval, Service des consultations statistiques. 67 p.

DAIGLE, G., E. RENY-NOLIN, L.-P. RIVEST, Y. MAILHOT, M. LEGAULT et B. BÉLANGER. 2005*a*. Rapport II : La pêche sportive au lac Saint-Pierre en 2003. Pêche en eau libre : effort de pêche, succès et récolte des principales espèces de poissons. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche sur la faune, Québec. 97 p.

DAILEY, J.E., and D.R.F. HARLEMAN. 1972. Numerical Model for the Prediction of Transient Water Quality in Estuary Networks. Massachusetts Institute of Technology. Report NO. MITSG 72-15.

D'ARCY, P., JF BIBEAULT et COMITÉ DE CONCERTATION NAVIGATION. 2004. Stratégie de navigation durable pour le Saint-Laurent. 96 p. + annexes.

DOYON, B., D. RIOUX ET O. CHAMPOUX. 2005. Adaptation du transport maritime aux changements climatiques : simulations numériques de scénarios exploratoires d'interventions physiques sur le fleuve Saint-Laurent. Rapport technique SMC-Hydrologie, RT-138, Environnement Canada. Rapport préparé pour le Comité de concertation navigation. 62 p.

DREDGING NEWS ONLINE. 2004. Second Round of Dredging Starts at Mouth of Yangtze River. www.sandandgravel.com/v_dno/print.asp. Consulté le 2005-07-21.

DUNKER, S. 2004. Analysis of Waterway Factors on the Underkeel Clearance of Sea-going Vessels. Squat Workshop, Elsfleth/Oldenburg, Germany. P. 150-172.

ENVIRONNEMENT CANADA (1994). Répercussions environnementales du dragage et de la mise en dépôt des sédiments. Service du développement technologique, Direction de la protection de l'environnement, Régions du Québec et de l'Ontario, préparé par Les Consultants Jacques Bérubé inc., septembre. 109 p.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. 2005. Vulnerability and Adaptation to Climate Change in Europe. EEA Technical Report no. 7. 106 p.

FAGHERAZZI, L., R. GUAY et T. SASSI. 2004. Analysis of Climate Change Impacts on the Ottawa River System. Rapport préliminaire à l'I.J.C. Lake Ontario-St.Lawrence River Regulation Study. Manuscrit en révision, juillet 2004.

FORTIN, P. 2002. Acquisition and post-processing of bathymetric data in shallow waters for the section of the St. Lawrence River between Cornwall and Trois-Rivières. Rapport technique SMC-Hydrologie RT-118, Environnement Canada. 29 p.

FORTIN, P., A. MORIN, N. ROY et B. DOYON. 2004. Cueillette des données bathymétriques et actualisation du modèle numérique d'élévation du fleuve Saint-Laurent. Rapport technique SMC Québec – Hydrologie RT-129, Environnement Canada. 26 p.

FORTIN, P., S. MARTIN et A. PLANTE. 2002. Post-processing validation and integration of LIDAR data into the St. Lawrence River Digital Terrain Model. SMC-Hydrologie RT-120, Environnement Canada. 43 p.

FRASER RIVER ESTUARY MANAGEMENT PROGRAM (FREMP). 2002. Sediment Budget and Dredging Activities. Annual report for the fiscal year 2002. Prepared by FREMP's Dredge Management Advisory Committee. 7 p.

GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR L'ÉVOLUTION DU CLIMAT (GIEC). 2001. Bilan 2001 des changements climatiques : les éléments scientifiques. 93 p.

GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR L'ÉVOLUTION DU CLIMAT. 2001. Bilan 2001 des changements climatiques : conséquences, adaptation et vulnérabilité. 97 p.

GROUPE DE TRAVAIL INTERGOUVERNEMENTAL SUR LES IMPACTS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET L'ADAPTATION. 2005. Cadre national d'adaptation aux changements climatiques. 23 p.

GRUPE DE TRAVAIL SUR LA GESTION INTÉGRÉE DU DRAGAGE ET DES SÉDIMENTS. 2004. Document d'orientation sur la gestion intégrée du dragage sur le Saint-Laurent. Rapport préparé pour le Comité de concertation navigation, 21 p.

GRUPE DE TRAVAIL TECHNIQUE SUR LA NAVIGATION COMMERCIALE. 2005. Commercial Navigation – Contextual Narrative. Rapport préparé pour la Commission mixte internationale dans le cadre de l'étude internationale du lac Ontario et du fleuve Saint-Laurent. 13 p.

GRUPE RESPONSABLE DU PLAN D'ÉTUDE SUR LE FLEUVE SAINT-LAURENT ET LE LAC ONTARIO. 1999. Plan d'étude concernant la révision des critères faisant partie des ordonnances d'approbation pour la régularisation du niveau et du débit du lac Ontario et du fleuve Saint-Laurent. Préparé pour la Commission mixte internationale. Annexe 2.

LALANCETTE, J., N. LALONDE, G. SILLS et J. CYR. 2001. Portrait des activités de dragage sur le Saint-Laurent – Les aspects opérationnels et environnementaux. Rapport préparé pour le ministère des Transports du Québec dans le cadre du Plan d'action Saint-Laurent Vision 2000. 58 p. + annexes.

LASSERRE, J.-C. 1980. Le Saint-Laurent, grande porte de l'Amérique. Cahiers du Québec, Les Éditions Hurtubise HMH. 753 p. Coll. Géographie.

LEFAIVRE, D. (PÊCHES ET OCÉANS CANADA). 2005. Effets des changements climatiques sur les niveaux d'eau du fleuve Saint-Laurent entre Montréal et Québec. Projections pour les années 2050. Rapport préparé pour le Comité de concertation navigation. 34 p.

McINTYRE, S. and R. McKITRICK. 2005. Hockey Sticks, Principal Components, and Spurious Significance. *Geophysical Research Letters*, vol. 32, L03710.

MEEHL, G., W.M. WASHINGTON, W.D. COLLINS, J.M. ARBLASTER, A. HU, L.E. BUJA, W.G. STRAND and H TENG. 2005. How Much More Global Warming and Sea Level Rise? *Science*, vol. 307. P. 1769-1772.

MILLERD, F. 2003. The Impact of Water Level Changes on Commercial Navigation in the Great Lakes and St. Lawrence River. *Canadian Journal of Regional Studies at the University of New Brunswick*. 12 p.

MILLERD, F. 2004. The Economic Impacts of Climate Change on Canadian Commercial Navigation on the Great Lakes. 41 p.

MORIN, J., P. BOUDREAU, P. FORTIN, D. RIOUX, O. CHAMPOUX, C. POMARES et J.-F. CANTIN. 2001. Hydrodynamique du quai Tarte, Port de Montréal. Rapport technique SMC-Hydrologie RT-114, Environnement Canada. 15 p. + 12 planches.

- MORIN, J. et A. BOUCHARD. 2001. Les bases de la modélisation du tronçon Montréal/Trois-Rivières. Rapport scientifique SMC – Hydrologie RS-100, Environnement Canada. 56 p.
- MORSE, B., S. MICHAUD et J. SILES. 2002. Maximization of Ship Draft in the St. Lawrence Seaway. Volume 2: In-Depth Analysis of Squat and UKC. Report prepared for Transportation Development Centre of Transports Canada and The St. Lawrence Seaway Management Corporation. TP 13888E. 48 p. + annexes.
- MORSE, B. 1990. St.Lawrence Water-Levels Study: Application of the One-D Hydrodynamic Model. Report to Transport Canada, Waterways Development Division, Canadian Coast Guard.
- MORTSCH, L, H. HENGEVELD, M. LISTER, B. LOFGREN, F. QUINN, M. SLIVITZKY and L. WENGER. 2000. Climate Change Impacts on the Hydrology of the Great Lakes-St.Lawrence System. Canadian Water Resources Journal, vol. 25, no. 2. P. 153-177.
- O'KEEFE, D. 2003. The Future for Canada-U.S. Container Port Rivalries. Transportation Division, Statistics Canada. 12p.
- OSBORN, T.J. and K.R. BRIFFA. 2004. The Real Color of Climate Change. Science, vol. 306. P. 621-622.
- PAINCHAUD, J. et S. VILLENEUVE. 2003. Portrait global de l'état du Saint-Laurent – Suivi de l'état du Saint-Laurent. Saint-Laurent Vision 2000. 17 p. Site Internet : www.slv2000.qc.ca.
- PARKER, E.N. 1999. Sunny Side of Global Warming. Nature, vol. 399, 3 June. P. 416-417.
- PÊCHES ET OCÉANS CANADA – SERVICE HYDROGRAPHIQUE DU CANADA. 1997. Atlas des courants de marée – Estuaire du Saint-Laurent, du cap de Bon-Désir à Trois-Rivières. 108 p.
- PIANC and IAPH WORKING GROUP. 1997. Approach Channels – A Guide for Design. Final report of the joint Working Group PAINC and IAPH, in cooperation with IMPA and IALA. Supplement to Bulletin no 95. 108 p.
- PORT DE MONTRÉAL. 2002. Rapport annuel. www.port-montreal.com.
- PORT OF LONDON AUTHORITY. 2004. Princes Channel development – Phase II Dredging. Environmental Assessment Report.
- QUINN, F.H. 2002. The Potential Impacts of Climate Change on Great Lakes Transportation. 9 p. www.climate.volpe.dot.gov/workshop/002. Consulté le 2005-06-15.

RESSOURCES NATURELLES CANADA, DIRECTION DES IMPACTS ET DE L'ADAPTATION LIÉS AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES. 2002. Impacts et adaptation liés aux changements climatiques : perspective canadienne–Transports. 19 p.

RIOUX, C., J.C. MICHAUD, E. GUY, M. CHARBONNEAU. 2005. Étude sur les perspectives de réorganisation des ports du Saint-Laurent relativement aux changements climatiques. Rapport préparé pour le Comité de concertation navigation. 105 p. + annexes.

SCHREIDER, M.J., T.M. GLASBY and A.J. UNDERWOOD. 2003. Effects of Height on the Shore and Complexity of Habitat on Abundances of Amphipods on Rocky Shores in New South Wales, Australia. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, vol. 293. P. 57-71. Site Internet: <http://www.eicc.bio.usyd.edu.au/scripts/database/view.pl?Choice=ViewRec&DB=pubs&id=361>.

SIMARD, L. 1983. Effet des réservoirs des îles de Sorel sur les niveaux d'eau. Rapport préparé pour Transports Canada – Garde côtière. 26 p.

SLV 2000 – SODES. 2000. Étude comparative des impacts environnementaux des modes de transport de marchandises dans l'axe Saint-Laurent. 131 p. + annexes.

TRANSPORT CANADA – CANMORE WORKSHOP. 2003. Impacts of Climate Change on Transportation in Canada. Final Workshop Report. 21 p. + annexes.

US ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). 2001. Great Lakes and St. Lawrence Seaway Potential Container Transport Savings. Attachment 4. Economic Appendix. Prepared by Tennessee Valley Authority for US Army Corps of Engineers.

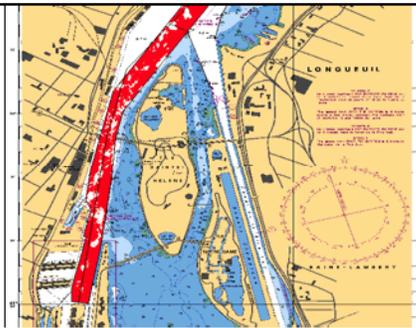
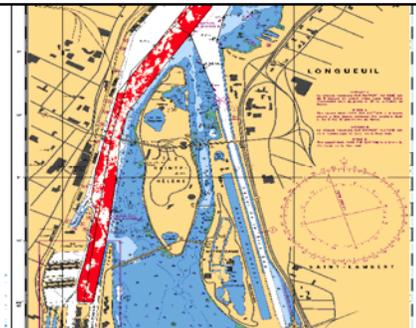
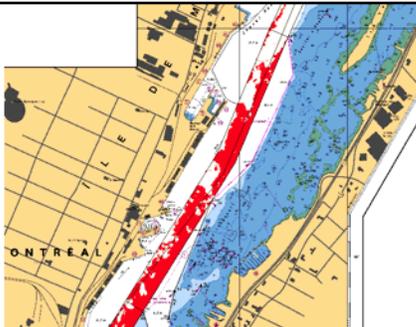
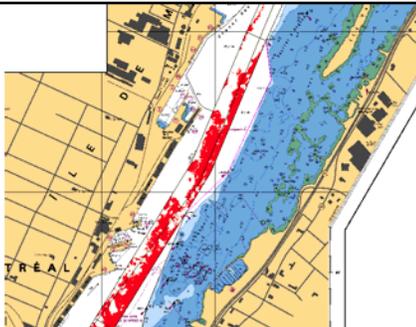
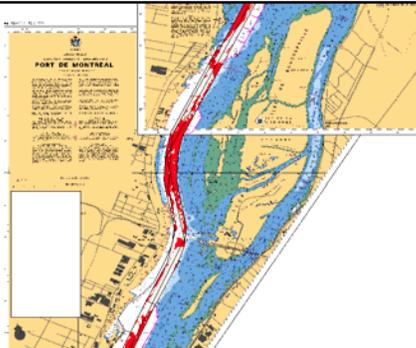
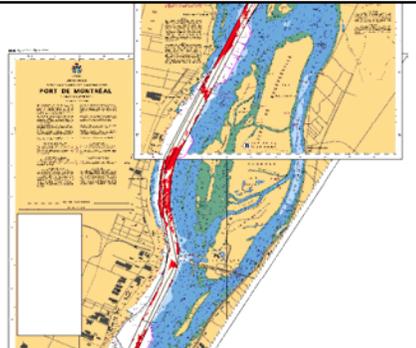
WORLD COMMISSION ON DAMS. 2000. Dams and Development – A New Framework for Decision-Making. The Report of the World Commission on Dams. EarthScan Publications. 356 p.

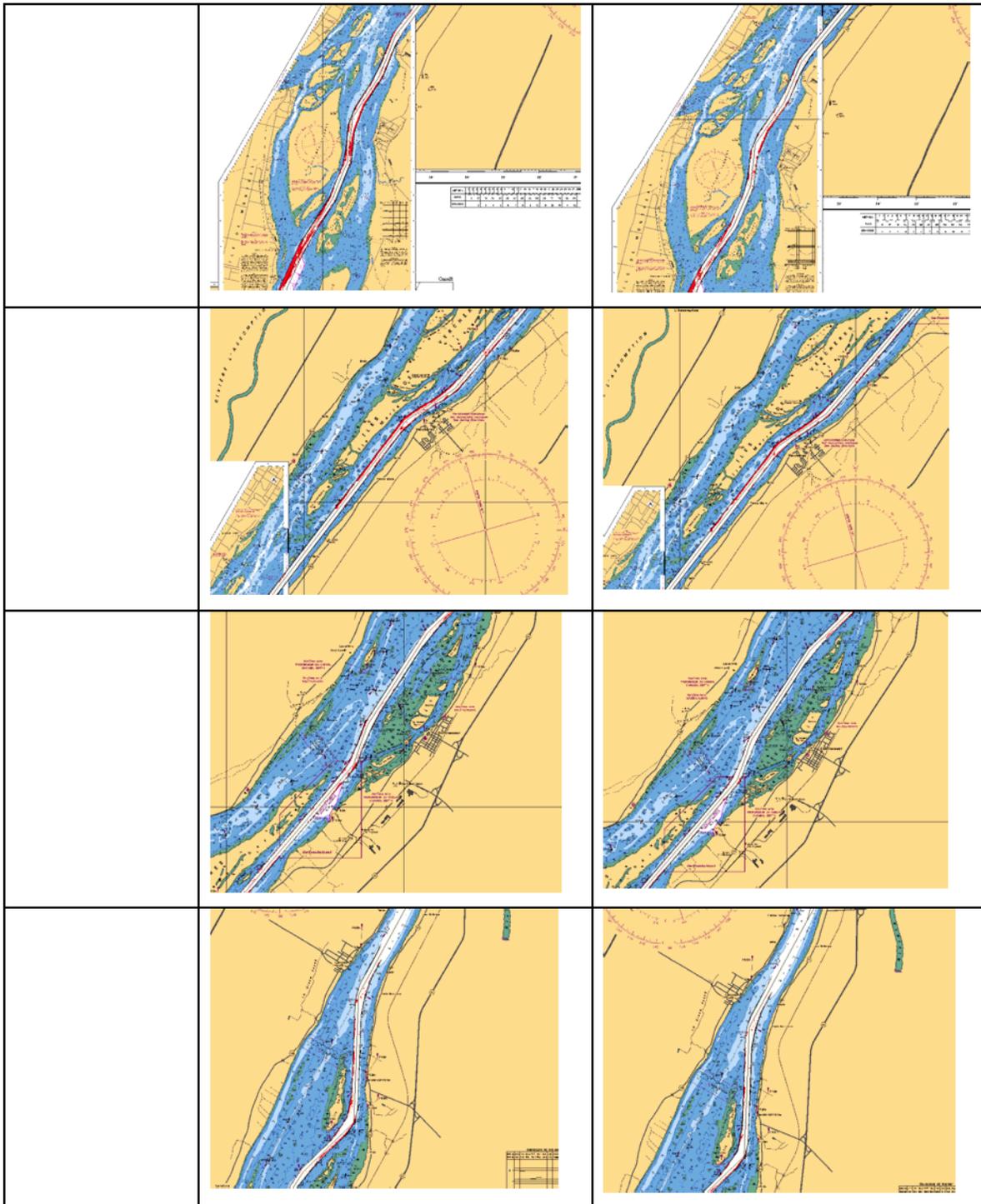
XU, Z., F.J. SAUCIER et D. LEFAIVRE. 2004. Water Level Variations in the Estuary and Gulf of St. Lawrence – A Working Progress Report. Direction des sciences océaniques, Institut Maurice-Lamontagne. Manuscrit en révision, août 2004.

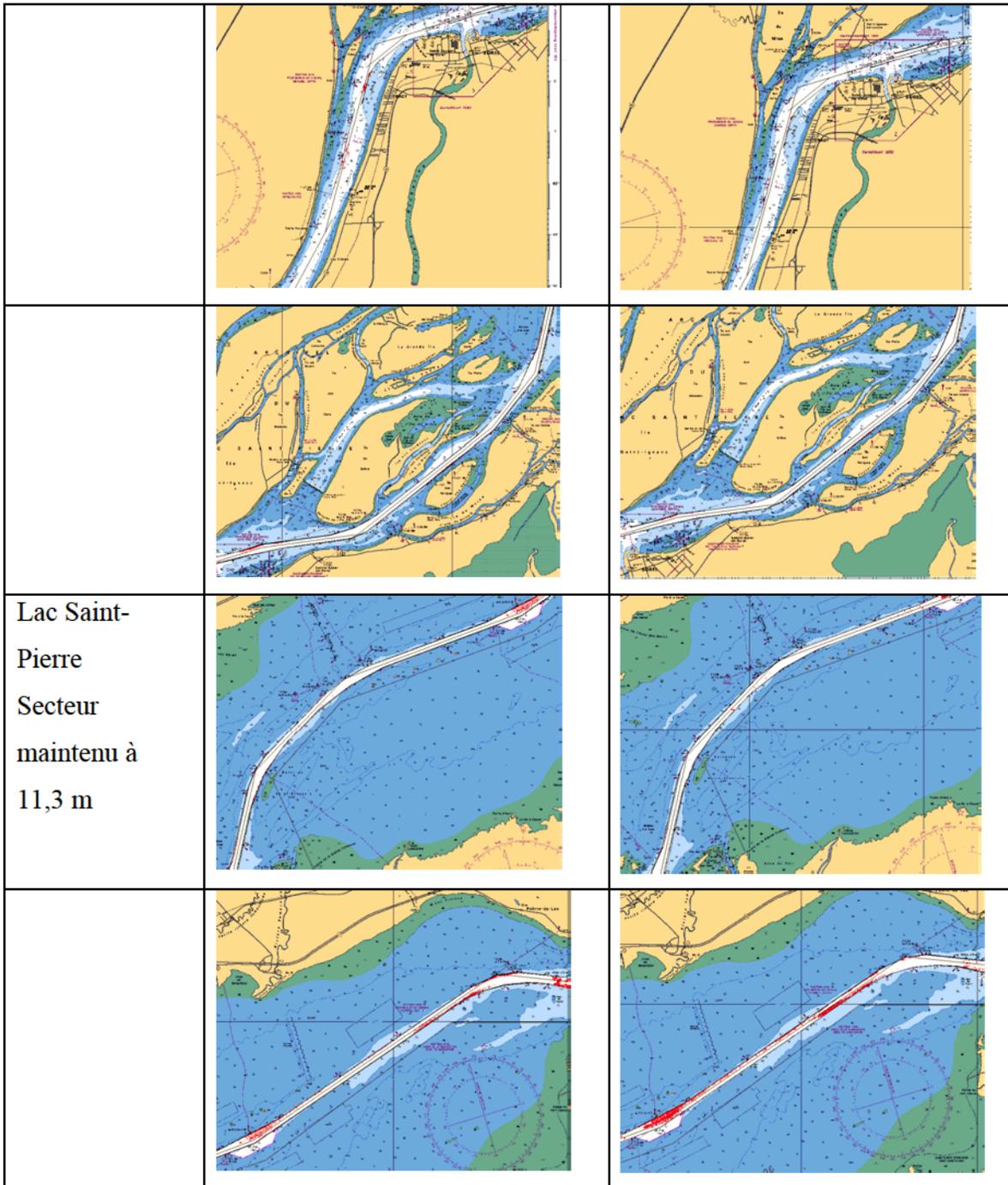
ANNEXE 1

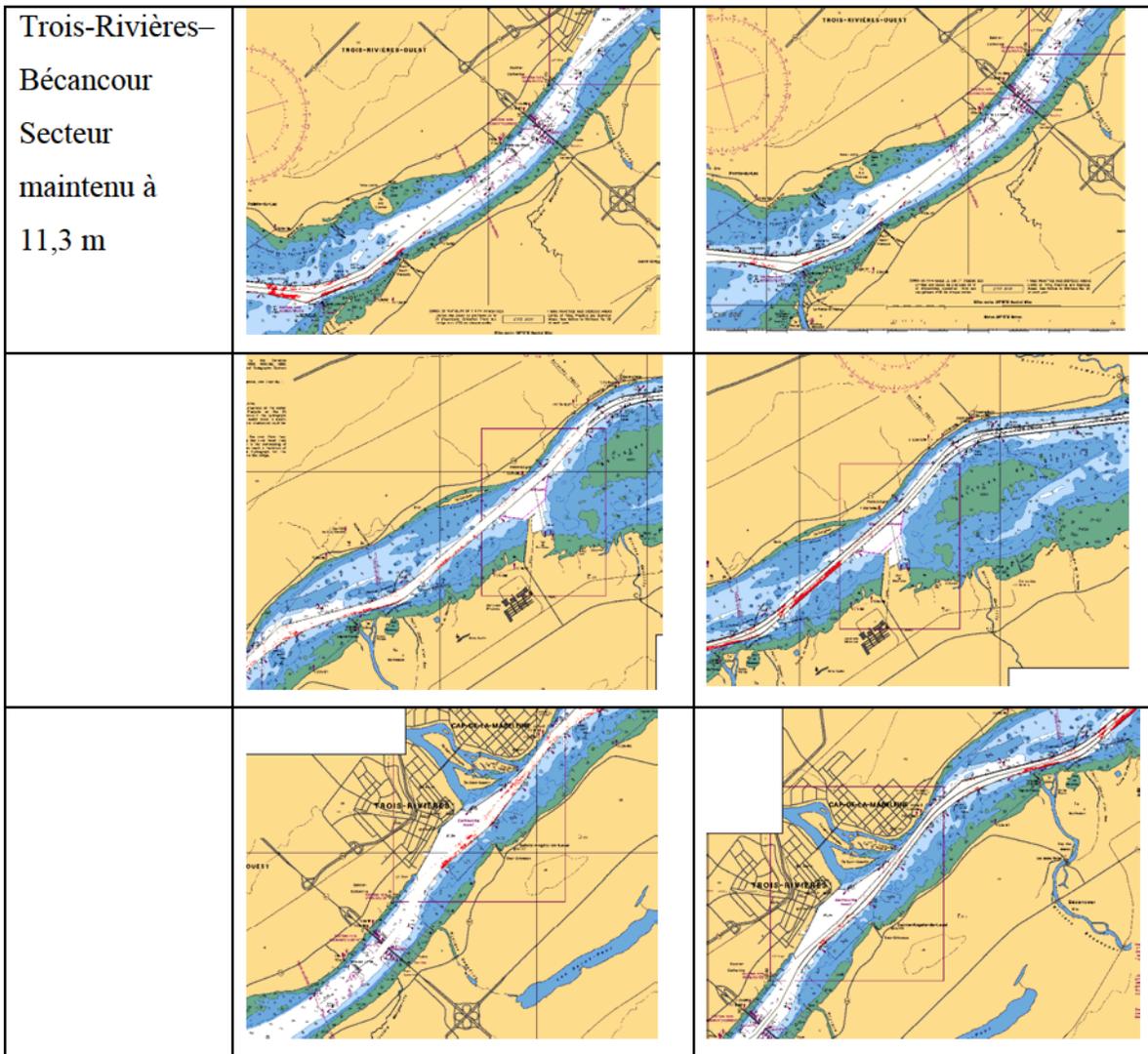
Cartographie des secteurs où un dragage serait nécessaire

Secteurs où un dragage devrait être effectué (en rouge) dans la voie navigable selon les scénarios climatiques CS et PCS et en référence à l'année 2001 (source : Pêches et Océans Canada, Garde côtière, Gestion des voies navigables, 2005)

Secteur	Scénario	
	CS	PCS
Montréal Secteur maintenu à 10,7 m		
Montréal Secteur maintenu à 11,0 m		
Montréal -Sorel Secteur maintenu à 11,3 m		



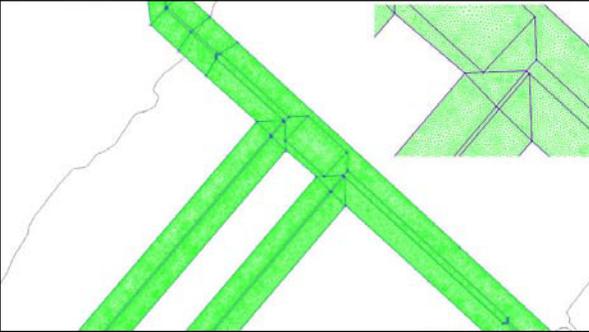
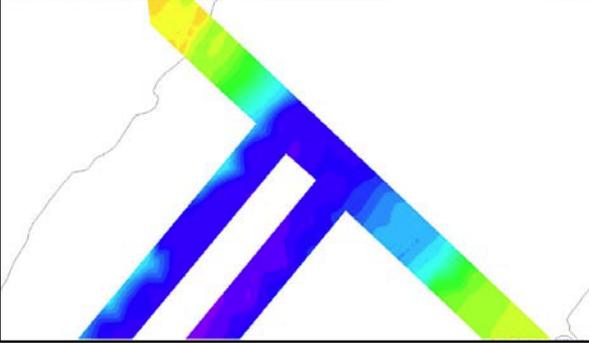
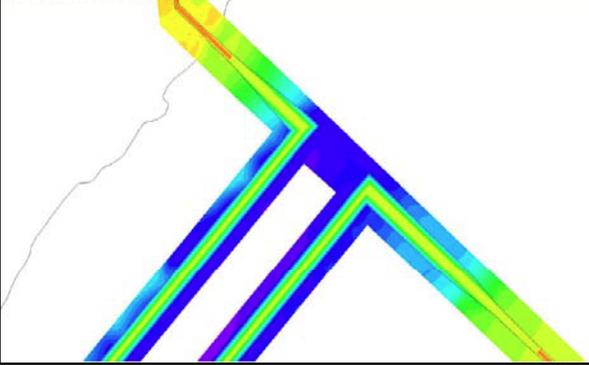
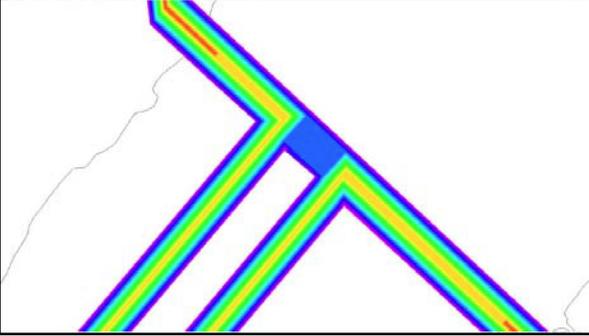


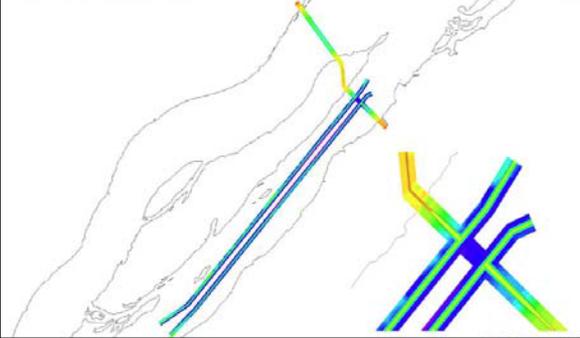
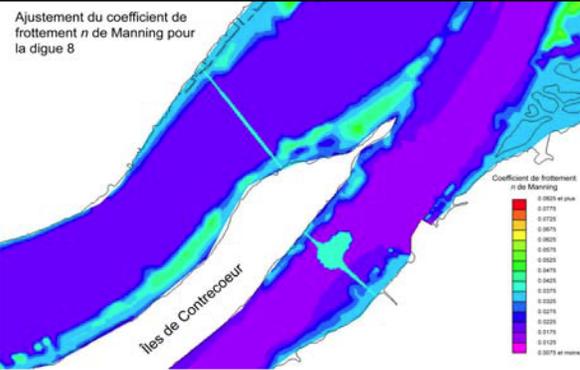
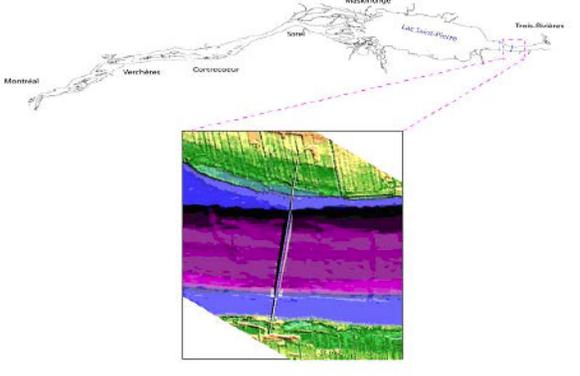
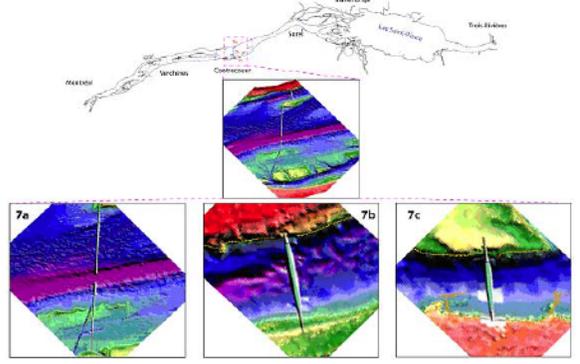


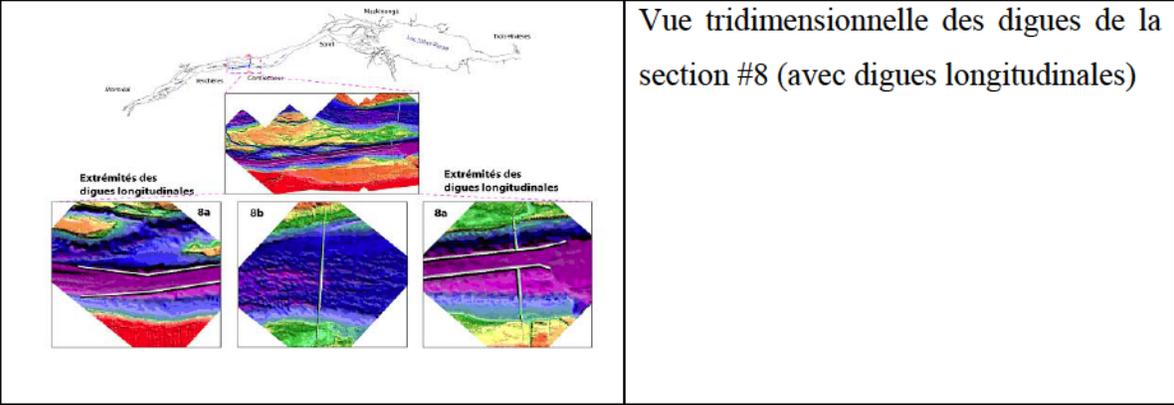
ANNEXE 2

Étapes de conception et d'implantation des ouvrages hydrauliques dans le modèle hydrodynamique

Présentation des étapes de conception et d'implantation des ouvrages hydrauliques dans le modèle hydrodynamique (tiré de Doyon et al, 2005)

Figure	Description
	<p>Maillage servant de support à la couche d'information de type « élévation » pour la digue (digue #8 longitudinale).</p>
	<p>Topographie du fleuve à l'endroit où la digue doit être implantée.</p>
	<p>Vue partielle du MNT du fleuve modifié incluant la digue #8.</p>
	<p>Aperçu de la digue une fois sa conception terminée.</p>

	<p>Illustration de la digue #8 complétée et intégrée au MNT du fleuve.</p>
<p>Ajustement du coefficient de frottement n de Manning pour la digue 8</p>  <p>Coeficient de frottement n de Manning</p> <ul style="list-style-type: none"> 0.0225 et plus 0.0210 0.0195 0.0180 0.0165 0.0150 0.0135 0.0120 0.0105 0.0090 0.0075 et moins 	<p>Exemple d'ajustement du coefficient de frottement local.</p>
	<p>Vue tridimensionnelle du barrage avec écluse.</p>
	<p>Vue tridimensionnelle des digues de la section #7.</p>

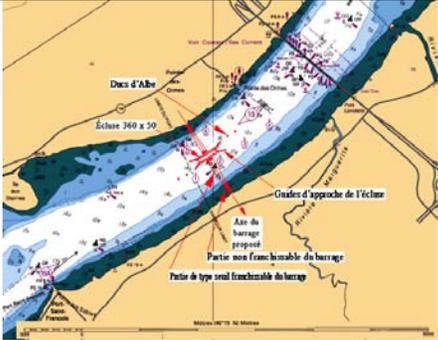
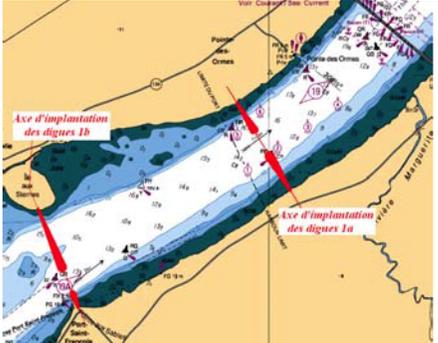
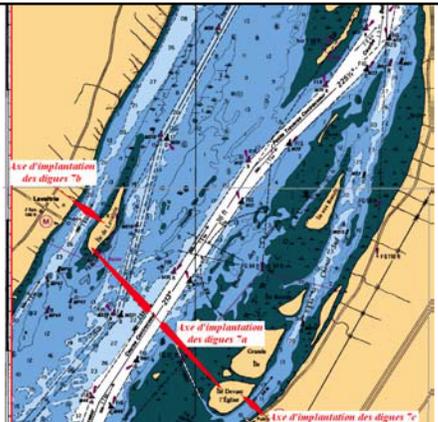


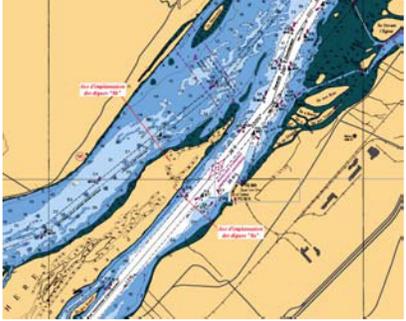
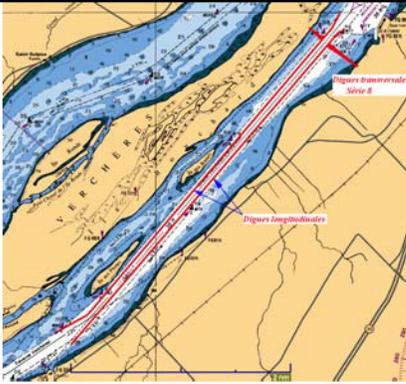
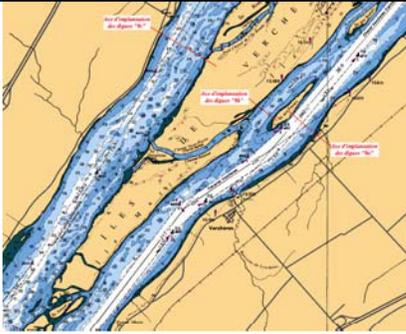
Vue tridimensionnelle des digues de la section #8 (avec digues longitudinales)

ANNEXE 3

Caractéristiques des ouvrages hydrauliques

Caractéristiques des ouvrages hydrauliques (hauteur des crêtes).

Ouvrage	Emplacement	Cote de la crête Zone non franchissable (m, NMM)	Cote de la crête Zone non franchissable (m, NMM)
Barrage		7,5	3,6
Digues #1a et 1b		7,5	3,6
Digues #7		8,3	5,0

<p>Digues #8 transversale</p>		<p>8,3</p>	<p>5,0</p>
<p>Digues #8 longitudinale</p>		<p>8,3</p>	<p>5,0</p>
<p>Digues #9</p>		<p>8,5</p>	<p>5,0</p>

ANNEXE 4

Ventilation des coûts des ouvrages hydrauliques

Ventilation des coûts des ouvrages hydrauliques (coûts estimatifs) (tiré De Consultants Ropars, 2005))

Barrage

Éléments	Unité	Quantité	Coût unitaire (\$)	Coût (M\$)
Caissons de l'écluse	m ³	420 000	400	168,0
Fondation des caissons (pierre)	m ³	120 000	40	4,8
Radier de l'écluse (béton)	m ³	26 000	800	20,8
Portes de l'écluse	Unité	4	11 500 000	46,0
Bâtiment de l'écluse	Global			3,0
Mécanique-hydraulique	Global			15,0
Aire de service	Global			2,0
Pierre dans les digues	Tonne	1 070 000	18	19,3
Béton dans les digues	m ³	20 000	600	12,0
Signalisation fluviale	Global			5,0
Routes d'accès	Global			6,0
<i>Sous-total construction</i>				301,9
Imprévus (20 %)				60,4
Organisation du chantier (8%)				29,0
Ingénierie et surveillance (20 %)				78,3
GRAND TOTAL				469,6

Digues #1a

Éléments	Unité	Quantité	Coût unitaire (\$)	Coût (M\$)
Pierre dans les digues	Tonnes	810 000	18	14,6
Béton dans les digues	m ³	17 000	600	10,2
Protection anti-affouillement	Global			2,5
Signalisation fluviale	Global			2,0
Routes d'accès	Global			3,0
<i>Sous-total construction</i>				32,3
Imprévis (20 %)				6,5
Organisation du chantier (8%)				3,1
Ingénierie et surveillance (20 %)				8,4
GRAND TOTAL				50,3

Digues #1b

Éléments	Unité	Quantité	Coût unitaire (\$)	Coût (M\$)
Pierre dans les digues	Tonnes	985 000	18	17,7
Béton dans les digues	m ³	19 300	600	11,6
Protection anti-affouillement	Global			2,5
Signalisation fluviale	Global			2,0
Routes d'accès	Global			3,0
<i>Sous-total construction</i>				36,8
Imprévus (20 %)				7,4
Organisation du chantier (8%)				3,5
Ingénierie et surveillance (20 %)				9,5
GRAND TOTAL				57,2

Digues #8 (note : Les coûts pour les digues 7 et 9 sont similaires)

Éléments	Unité	Quantité	Coût unitaire (\$)	Coût (M\$)
Pierre dans les digues	Tonnes	1 003 000	18	18,1
Béton dans les digues	m ³	8 000	600	4,8
Protection anti-affouillement	Global			2,5
Signalisation fluviale	Global			2,5
Routes d'accès	Global			4,5
<i>Sous-total construction</i>				32,4
Imprévus (20 %)				6,5
Organisation du chantier (8%)				3,1
Ingénierie et surveillance (20 %)				8,4
GRAND TOTAL				50,4

Digues #8 – longitudinales (coûts au kilomètre)

Éléments	Unité	Quantité	Coût unitaire (\$)	Coût (M\$)
Pierre dans les digues	Tonnes	1 150 000	18	20,7
Béton dans les digues	m ³	150	600	0,1
Protection anti-affouillement	Global			1,5
Signalisation fluviale (incluse dans les digues transversales)	Global			0,0
Location de barges	Global			0,8
<i>Sous-total construction</i>				23,1
Imprévus (20 %)				4,6
Organisation du chantier (8 %)				2,2
Ingénierie et surveillance (20 %)				6,0
GRAND TOTAL				35,9