



ÉTUDE ÉCONOMIQUE RÉGIONALE DES IMPACTS ET DE L'ADAPTATION LIÉS AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LE FLEUVE SAINT-LAURENT: LE TRANSPORT MARITIME

Rapport final
Février 2016



ÉTUDE ÉCONOMIQUE RÉGIONALE DES IMPACTS ET DE L'ADAPTATION LIÉS AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LE FLEUVE SAINT-LAURENT: LE TRANSPORT MARITIME

Rapport final
Février 2016

Équipe de réalisation:

Claude Comtois, CIRRELT, Université de Montréal
Brian Slack, CIRRELT, Université de Montréal

Collaborations:

Olivier Leblanc, École des Hautes Études Commerciales
Paul Lanoix, École des Hautes Études Commerciales
Justin Leroux, École des Hautes Études Commerciales

Rapport présenté à la Division des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques de Ressources naturelles Canada, au Gouvernement du Québec et à Ouranos, dans le cadre du volet Transport maritime de *l'Étude économique des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques sur le fleuve Saint Laurent*, pilotée par Ouranos

Titre de projet Ouranos: Étude économique des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques sur le fleuve Saint Laurent

Numéro de projet Ouranos: 510019-123

Citation suggérée: Comtois, C., Slack, B. (2015). *Étude économique régionale des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques sur le fleuve Saint-Laurent: le transport maritime*. Rapport présenté à la Division des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques de Ressources naturelles Canada, au Gouvernement du Québec et à Ouranos. CIRRELT, Université de Montréal, 64 p.

Les résultats et opinions présentés dans cette publication sont entièrement la responsabilité des auteurs. Toute utilisation de cette publication et de son contenu n'engage pas Ouranos et ses partenaires.

Pour plus d'information sur les impacts et l'adaptation liés aux changements climatiques, nous vous invitons à consulter les sites www.adaptation.rncan.gc.ca et www.ouranos.ca

REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée dans le cadre d'un projet piloté par Ouranos avec le soutien de Ressources naturelles Canada et du Gouvernement du Québec.

Nous tenons à remercier pour leur collaboration Philippe de Champlain, CIRRELT, Université de Montréal, Jeanne-Hélène Jugie, CIRRELT, Université de Montréal, Simon Savard, CIRRELT, Université de Montréal.

L'étude a bénéficié aussi de l'aide du Groupe de travail sur l'économie de la Plateforme d'adaptation.



ÉTUDE ÉCONOMIQUE RÉGIONALE DES IMPACTS ET DE L'ADAPTATION LIÉS
AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES: LE FLEUVE SAINT-LAURENT

LE TRANSPORT MARITIME

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX	5
LISTE DES FIGURES	7
SOMMAIRE EXÉCUTIF	8
1. INTRODUCTION	11
1.1. Le transport maritime	11
1.2. Le contexte de l'étude	11
1.3. Le mandat	12
1.4. La méthodologie	12
2. LE PORT DE MONTRÉAL	14
2.1. Un port océanique au sein d'un continent	14
2.2. L'importance du trafic de conteneurs	14
2.3. Les retombées économiques	16
2.4. Le gigantisme naval	17
2.5. Le niveau d'eau	18
2.6. Niveau d'eau et mouvement des navires	19
2.7. Niveau d'eau et transport maritime de conteneurs	20
3. LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES	25
3.1. Les prévisions	25
3.2. Les impacts économiques	26
4. LES MESURES D'ADAPTATION	28
4.1. Le dragage	28
4.2. Les ouvrages d'art	29
4.3. Le transfert des activités portuaires	30
4.4. Le déploiement d'une nouvelle flotte	30
4.5. La minimisation du dégagement sous quille	31
5. ANALYSE COMPARATIVE DES MESURES D'ADAPTATION	31

6. ANALYSE COÛTS-AVANTAGES	36
6.1. Estimation des coûts	36
6.2. Estimation des avantages	37
6.3. Analyse de sensibilité	46
6.4. Les coûts-avantages du dragage	46
6.4.1. Les coûts	46
6.4.2. Les avantages	46
6.4.3. Les analyses de sensibilité	48
6.5. Les coûts-avantages de la minimisation du dégagement sous quille	51
6.5.1. Les coûts	51
6.5.2. Les avantages	51
6.5.3. Les analyses de sensibilité	53
6.6. Les coûts-avantages reliés à la combinaison du dragage et de la minimisation du dégagement sous quille	54
6.6.1. Les coûts	54
6.6.2. Les avantages	55
6.6.3. Les analyses de sensibilité	55
7. CONCLUSION	59
8. RÉFÉRENCES	62

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Trafic maritime au port de Montréal, 1970-2013	15
Tableau 2. Impact économique attribuables aux activités du port de Montréal par produit manutentionné, 2012	16
Tableau 3. Répartition des emplois maritimes au port de Montréal, 2012	17
Tableau 4. Répartition des emplois par type de fret au port de Montréal, 2012	17
Tableau 5. Trafic de porte-conteneurs et niveaux d'eau au port de Montréal, 2007-2013	19
Tableau 6. Tirant d'eau de quelques porte-conteneurs en fonction du niveau d'eau au départ du port de Montréal, 2012	22
Tableau 7. Tirant d'eau de quelques porte-conteneurs en fonction du niveau d'eau au départ du port de Montréal, 2012 et 2013	23
Tableau 8. Impacts monétaires des bas niveaux d'eau sans changement climatique (RE), 2015-2064 (taux d'escompte 4%)	27
Tableau 9. Impacts monétaires des bas niveaux d'eau avec changement climatique (W1), 2015-2064 (taux d'escompte 4%)	27
Tableau 10. Impacts monétaires des bas niveaux d'eau avec changement climatique (W12), 2015-2064 (taux d'escompte 4%)	28
Tableau 11. Échelle de mesure des valeurs des critères	35
Tableau 12. Classement des mesures d'adaptation	35
Tableau 13. Paires d'Origine/Destination et caractéristiques de modélisation	41
Tableau 14. Distance et consommation supplémentaire de carburant	42
Tableau 15. Facteur d'émission par tonnes de carburant (kg/tonne)	43
Tableau 16. Coût par tonne d'émissions (\$2015)	43
Tableau 17. Variables des équations	45
Tableau 18. Avantages et coûts actualisés du dragage (REF)	47
Tableau 19. Avantages et coûts actualisés du dragage (W1)	47
Tableau 20. Avantages et coûts actualisés du dragage (W12)	47
Tableau 21. Dragage à 20 cm	48
Tableau 22. Dragage à 60 cm	48
Tableau 23. Taux d'actualisation de 2% du dragage	49
Tableau 24. Taux d'actualisation de 6% du dragage	49
Tableau 25. 6 EVP/cm en lien avec le dragage	50
Tableau 26. Doublement des coûts du dragage	50
Tableau 27. Doublement des coûts environnementaux du dragage	50
Tableau 28. Avantages et coûts actualisés de la minimisation du dégagement sous quille (REF)	52
Tableau 29. Avantages et coûts actualisés de la minimisation du dégagement sous quille (W1)	52
Tableau 30. Avantages et coûts actualisés de la minimisation du dégagement sous quille (W12)	52
Tableau 31. Taux d'actualisation de 2% de la minimisation du dégagement sous quille	53

Tableau 32. Taux d'actualisation de 6% de la minimisation du dégagement sous quille	53
Tableau 33. 6 EVP/cm en lien avec la minimisation du dégagement sous quille	54
Tableau 34. Doublement des coûts de construction de la minimisation du dégagement sous quille	54
Tableau 35. Avantages et coûts actualisés d'une combinaison du dragage et de la minimisation du dégagement sous quille	55
Tableau 36. Dragage à 20 cm en lien avec une combinaison du dragage et de la minimisation du dégagement sous quille	56
Tableau 37. Dragage à 60 cm en lien avec une combinaison du dragage et de la minimisation du dégagement sous quille	56
Tableau 38. Taux d'actualisation de 2% d'une combinaison du dragage et de la minimisation du dégagement sous quille	57
Tableau 39. Taux d'actualisation de 6% d'une combinaison du dragage et de la minimisation du dégagement sous quille	57
Tableau 40. 6 EVP/cm en lien avec une combinaison du dragage et de la minimisation du dégagement sous quille	58
Tableau 41. Doublement des coûts de construction du dragage et de la minimisation du dégagement sous quille	58
Tableau 42. Doublement des coûts environnementaux du dragage en lien avec une combinaison du dragage et de la minimisation du dégagement sous quille	59

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Méthode de calcul des avantages d'un projet de dragage du Corps des Ingénieurs de l'Armée des États-Unis	38
Figure 2. Origine du fret conteneurisé au port de Montréal, 2014	39

SOMMAIRE EXÉCUTIF

Dans le contexte de la stratégie du Ministère des Ressources Naturelles du Canada sur les mesures d'adaptation aux changements climatiques, ce rapport a pour objectif de fournir une analyse coûts-avantages des mesures d'adaptation du transport maritime en lien avec différents scénarios hydro-climatiques sur une période de 50 ans à l'horizon 2065.

Compréhension des caractéristiques physiques et économiques du transport maritime à Montréal liés à la fluctuation des niveaux d'eau.

Une revue exhaustive des composantes physiques, de l'évolution des trafics et de la géographie des aires de marché du port de Montréal est utilisée pour évaluer l'impact économique du port. Le port de Montréal compte pour 40% de «tonnes de valeur ajoutée» de l'ensemble du système portuaire du Saint-Laurent. Le port apporte une contribution de 752 millions \$ au produit intérieur brut du Québec, dont 635 millions \$ pour la manutention du conteneur. L'impact économique direct d'un conteneur au port de Montréal est estimé à 373 \$.

Les conditions de la flotte des navires qui répondent aux besoins de trafic actuel du port de Montréal sont ensuite étudiées. L'analyse démontre que le nombre d'emplois directs associés aux dépenses d'exploitation de l'industrie maritime à Montréal est de 8 915 emplois-année dont près de 70% sont liés aux services de transport maritime.

Après une mise en lumière de la capacité physique du système Saint-Laurent à influencer la compétitivité du transport maritime à Montréal, l'étude mesure l'évolution des niveaux d'eau au port de Montréal, identifie les conditions qui président à leur variation et évalue les conséquences sur la navigation maritime. L'amplitude verticale moyenne des niveaux d'eau tend à diminuer depuis 50 ans. En outre, la fréquence mensuelle des niveaux d'eau affiche une certaine régularité et une structure saisonnière. Ces fluctuations sont le résultat de l'action combinée des changements climatiques et de plusieurs formes d'intervention anthropiques. Les impacts sur les conditions de navigation s'expriment par la modification des conditions météorologiques, des courants marins, de la densité de l'eau et de l'érosion de la voie d'eau.

L'analyse du profil des navires à l'arrivée et au départ du port de Montréal en lien avec les profondeurs d'eau révèle plusieurs caractéristiques. Premièrement, le transport de vrac ne semble pas accuser de baisse abrupte ou soutenue de trafic, à l'exception du marché céréalier qui tend à se tourner vers les marchés internationaux. Plus de 90% des navires assignés au trafic de vrac affichent un tirant d'eau de moins de 11,3 m. Deuxièmement, le marché des produits pétroliers est en profonde transformation avec la fermeture des raffineries dans la région de Montréal. Plus de 70% des navires assignés au transport de produits pétroliers affichent un tirant d'eau de moins de 11,3 m. Montréal est un centre important de distribution de produits pétroliers pour plusieurs villes le long du Saint-Laurent et dans les Maritimes. Les pétroliers peuvent décharger

une partie de leur cargaison avant l'arrivée à Montréal ou ne déchargent qu'une partie de leur cargaison à Montréal. Troisièmement, le trafic de marchandises générales est de plus en plus influencé par les processus de conteneurisation, en raison des coûts de manutention et de transport terrestre qui constituent une partie majeure du coût total de transport. Plus de 95% des navires de cargo général affichent un tirant d'eau de moins de 11,3 m. Quatrièmement, plus de 72% des mouvements des porte-conteneurs enregistrés au port de Montréal sont dédiés au trafic océanique. Plus de 90% des porte-conteneurs enregistrés à l'arrivée ont un dégagement sous quille de plus de 30 cm. La situation est différente au départ du port de Montréal alors qu'un navire sur cinq dépasse cette limite. Les lignes maritimes s'adaptent déjà aux conditions de navigation et aux fluctuations du marché dans le déploiement de leurs navires. Des éléments de preuve tendent à démontrer que les chargements des navires ne sont pas nécessairement affectés par des considérations de profondeur d'eau, mais par des conditions économiques difficiles où les navires voyagent allégés en raison d'un manque de conteneurs à transporter. Néanmoins, la variation saisonnière des niveaux d'eau affecte la compétitivité du port de Montréal sur le plan des transporteurs maritimes. Lorsque le niveau d'eau dans le chenal de navigation est moindre que le zéro des cartes, les navires doivent circuler allégés, ce qui réduit les revenus des compagnies et les impacts économiques. Nous estimons que chaque baisse d'un centimètre de niveau d'eau en-dessous du zéro des cartes réduit la capacité de transport d'un porte-conteneurs de 3,1 EVP, soit 1 122,73 \$ par navire.

Impacts économiques de différents scénarios hydro-climatiques

Une revue critique de la littérature sur les changements climatiques permet d'identifier les variables qui peuvent exercer un impact sur la navigation maritime commerciale. Les scénarios développés par Ouranos appuient l'importance de la fluctuation des niveaux d'eau sur les activités du secteur du transport maritime. Les données sur la colonne d'eau disponible au port de Montréal en fonction de trois scénarios permettent d'estimer les impacts économiques associés aux fluctuations des niveaux d'eau chaque année jusqu'en 2064.

L'estimation des pertes monétaires pour chaque année sur la période étudiée en utilisant un taux d'escompte de 4% pour tous les scénarios indique que les pertes sont faibles pour le scénario de référence (RE), moyennes pour le scénario WI2 et fortes pour le scénario WI1. La baisse prévisible des niveaux d'eau souligne l'importance d'identifier et de quantifier les mesures d'adaptation à privilégier pour la navigation maritime commerciale afin de minimiser les coûts associés aux changements climatiques.

Les mesures d'adaptation du transport maritime liées à la fluctuation des niveaux d'eau

Une revue critique de la littérature en lien avec la variation des niveaux d'eau est utilisée pour identifier les mesures d'adaptation pour les routes maritimes, les ports et les flottes. L'analyse révèle que le dragage et les ouvrages d'art sont les principales actions employées pour les voies navigables. La réponse des administrations portuaires à la fluctuation des niveaux d'eau repose sur l'entretien des équipements ou le transfert

partiel des activités portuaires. La stratégie des transporteurs consiste à minimiser le dégagement sous quille des navires ou de déployer une nouvelle flotte de vaisseaux.

L'étude démontre que toutes ces mesures ont des conséquences environnementales et économiques. La revue de la littérature suggère que le recours à un modèle universel pour évaluer les mesures d'adaptation du transport maritime et portuaire à la variation des niveaux d'eau sera toujours une affaire contentieuse et qu'il importe d'exercer une certaine prudence dans la sélection de mesures d'adaptation. L'analyse de la fluctuation des niveaux d'eau demeure importante mais nécessite d'inclure les mesures d'adaptation au sein d'une compréhension plus large des coûts et des avantages.

Les mesures d'adaptation pour minimiser les coûts associés aux changements climatiques

L'analyse des principales réponses envisagées par l'industrie maritime et portuaire à la fluctuation des niveaux d'eau révèle que les principales mesures d'adaptation se limitent à quatre actions: 1) le dragage; 2) la construction d'ouvrages d'art; 3) le transfert partiel des activités portuaires; et 4) la minimisation du dégagement sous quille des navires.

Chaque mesure d'adaptation a été soumise à une analyse FFOM (Force – Faiblesse – Opportunités – Menaces). Les résultats furent ensuite intégrés au sein d'une analyse multicritères permettant d'évaluer la validité des termes de références et les tendances les plus récentes sur la base de critères de capacité, de coûts, d'impacts environnementaux et sociaux et de compétitivité. Les programmes de minimisation du dégagement sous quille et le dragage sont les meilleures réponses afin de répondre à une baisse des niveaux d'eau. De façon davantage marquée, les entrevues auprès des parties prenantes suggèrent d'élaborer un calendrier de mise en œuvre des mesures d'adaptation dans le cadre des prévisions des baisses significatives et prolongées des niveaux d'eau qui surviennent à brève échéance.

L'analyse coûts-avantages du dragage et de la minimisation du dégagement sous quille

L'analyse coûts-avantages permet de déterminer la rentabilité économique de minimiser le dégagement sous quille ou de draguer de façon à maintenir les niveaux d'eau actuels. Le modèle incorpore à la fois les bénéfices reliés à la diminution relative des coûts de transport, les bénéfices provenant d'une réduction relative des émissions de gaz à effet de serre et les coûts environnementaux associés au dragage. L'analyse appliquée à trois scénarios climatiques permet de démontrer que dans le cas du scénario climatique de Référence, la mesure d'adaptation ayant la plus grande valeur actuelle nette est le dragage (VAN = 19 345 871 \$). Dans le cas du scénario climatique What-if #1, la mesure d'adaptation qui offre les bénéfices les plus élevés est la combinaison des deux mesures d'adaptation qui permet d'atteindre une valeur actuelle nette de 38 419 832 \$. Dans le cas du scénario climatique What-if #2, la mesure d'adaptation qui présente la plus grande valeur actuelle nette est le dragage avec une valeur estimée à 26 139 451 \$.

1. INTRODUCTION

1.1. Le transport maritime

Le développement du transport maritime est très étroitement lié à la croissance économique. Le transport maritime est au cœur du système de distribution de fret à l'échelle planétaire en raison de sa capacité inégalée de massifier les flux sur longue distance permettant d'abaisser les coûts par unité transportée. Cette mondialisation de l'industrie se traduit par un ensemble de routes qui maillent les océans. Au Québec, plus de 75% des industries se situent dans les régions qui bordent le Saint-Laurent. Cette position très favorable permet donc d'utiliser le fleuve pour les échanges commerciaux intercontinentaux et continentaux. Au plan intercontinental, les marchés sont captifs du transport maritime en raison des changements structuraux dans l'économie mondiale qui stimulent les activités économiques et le commerce maritime océanique. Depuis 1970, le commerce mondial transporté par mer, mesuré en milliards de tonnes de marchandises chargées, a plus que doublé. En 2012, plus de 9 milliards de tonnes de marchandises ont transité par mer (UNCTAD, 2013). Depuis la décennie 90, le taux de croissance du volume des exportations mondiales de marchandises surpasse celui de la production économique mondiale. À l'évidence, les systèmes portuaires s'adaptent aux besoins du trafic.

Plusieurs administrations portuaires sont engagées dans des planifications stratégiques à long terme. De tels engagements soulèvent d'importants défis. La géographie des échanges commerciaux mondiaux est en pleine mutation. Les percées technologiques contribuent à améliorer la connectivité, à réaliser des économies d'échelle et à réduire les distances de parcours. Les processus globaux mènent à l'intégration physique de tous les terminaux actuels de transport. L'industrie du transport reconnaît la portée des alliances entre les secteurs. Les technologies de l'information jouent désormais un rôle essentiel dans le fonctionnement des chaînes logistiques globales en permettant l'intégration des activités des opérateurs de terminaux, des lignes maritimes, des entreprises de chemin de fer et des entreprises de camionnage. De façon davantage marquée, les questions environnementales ajoutent des contraintes et des opportunités qui affectent l'industrie du transport.

1.2. Le contexte de l'étude

Les changements climatiques représentent un lourd fardeau dans l'évolution des conditions environnementales. Nonobstant la variété des impacts sur les océans, mers et fleuves, la plupart des projections suggèrent une modification du type, du volume, de la saisonnalité et de la distribution des précipitations qui affecteront la navigation maritime commerciale.

Le Ministère des Ressources Naturelles du Canada cherche à analyser des mesures d'adaptation aux changements climatiques au Canada afin d'améliorer la compétitivité de l'économie canadienne et de faciliter les décisions d'investissement. À l'appui de cet exercice, le Ministère exige une solide compréhension des impacts physiques et

économiques de ces changements climatiques sur le transport maritime afin d'identifier les solutions d'adaptation, de mesurer leurs coûts et d'évaluer leur rentabilité.

1.3. Le mandat

Dans le cadre du programme *Amélioration de la compétitivité dans un contexte de changements climatiques*, la Division des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques (DIACC) de Ressources naturelles Canada a accordé au réseau de recherche Ouranos la réalisation d'une étude économique régionale sur les impacts et l'adaptation aux changements climatiques pour le fleuve Saint-Laurent. Les usages et secteurs d'activités économiques à l'étude dans un contexte de changements climatiques portent sur 1) le transport maritime; 2) la production hydro-électrique; 3) les eaux municipales; 4) les services écologiques et les pêches; 5) le tourisme et les activités de plaisance; 6) les valeurs foncières des propriétés riveraines.

Nous avons obtenu un mandat d'Ouranos, pour entreprendre un projet de recherche visant à faire l'analyse économique des impacts des fluctuations des niveaux d'eau sur le transport maritime à Montréal et sur les coûts et avantages des mesures d'adaptation envisageables. Le projet s'articule en cinq parties correspondant à la démarche retenue par notre équipe de recherche pour remplir notre mandat.

1. Identifier les caractéristiques physiques et économiques du transport maritime à Montréal liées à la fluctuation des niveaux d'eau.
2. Identifier les mesures d'adaptation du transport maritime à la fluctuation des niveaux d'eau.
3. Identifier et quantifier les impacts des différents scénarios sur l'évolution hydro-climatique du système Saint-Laurent Grands Lacs et évaluer les coûts économiques associés à la fluctuation des niveaux d'eau.
4. Identifier et quantifier les impacts des mesures d'adaptation.
5. Évaluer les coûts et les avantages associés aux mesures d'adaptation.

1.4. La méthodologie

Pour réaliser l'étude et répondre à ces questions, notre équipe de recherche a privilégié cinq instruments méthodologiques.

1. Nous avons effectué une revue de la littérature d'articles scientifiques, de publications professionnelles, de rapports de consultants, de documents gouvernementaux et d'agences internationales.
2. Nous avons effectué des entrevues auprès de gestionnaires, fonctionnaires, utilisateurs et spécialistes. Ces entrevues ont été menées en personne. Les représentants étaient informés des objectifs de l'étude et des sujets à couvrir durant l'entrevue. Dans le but d'encourager un dialogue ouvert, toutes les entrevues étaient strictement confidentielles. Ni le nom des individus ni les réponses individuelles aux questions ne sont divulgués, sauf sous forme de résumé du processus de consultation.

3. Notre équipe de recherche a colligé, assemblé et analysé plusieurs bases de données quantitatives en provenance de différentes sources à Montréal, au Canada et à l'international sur la géographie physique, l'hydrologie, les infrastructures portuaires de Montréal et les trafics maritimes en termes de volumes, marchandises, origines et destinations.
4. Les scénarios et les stratégies d'adaptation ont été contrôlés pour leur réalisme et leur compatibilité avec les objectifs au moyen d'atelier de travail.
5. Une analyse coûts-avantages fut réalisée afin de déterminer la rentabilité économique des mesures d'adaptation du transport maritime à la baisse des niveaux d'eau.

2. LE PORT DE MONTRÉAL

2.1. Un port océanique au sein d'un continent

Montréal est un port océanique. Le port de Montréal affiche des similitudes avec les autres ports fluviaux sur le plan des conditions physiques. Mais la tendance générale émergente de l'analyse montre que le port de Montréal est atypique d'un port fluvial. Par ailleurs, les parts de marché du port de Montréal reposent sur la présence d'un marché de grande taille connecté à un vaste arrière-pays par un système de transport multimodal dont la résilience dépend d'une utilisation croissante de la voie d'eau. Bien que le marché domestique du Québec soit relativement important, les connexions de l'arrière-pays entre le port et les marchés sont particulièrement significatives dans le contexte montréalais. La proximité du port aux centres industriels du Québec, de l'Ontario, des États des Grands Lacs et du Nord-Est des États-Unis est un atout majeur sur le plan des délais et des coûts de transport et devient un facteur de décision important dans le choix de la route empruntée pour le trafic de marchandises. L'accès direct au port de Montréal permet d'accéder aux marchés outre-mer. Le port de Montréal affiche donc une plus grande similarité avec les ports océaniques qu'avec les ports fluviaux sur le plan des conditions de marché.

2.2. L'importance du trafic de conteneurs

Le port affiche une diversité de trafic incluant le vrac sec, les céréales, les produits pétroliers, le vrac liquide, les conteneurs et le cargo général. En 2013, le trafic maritime du port de Montréal est évalué à environ 28 millions de tonnes. Une analyse du volume de fret manutentionné au port de Montréal souligne l'ampleur considérable du conteneur. Depuis 1970, le trafic de conteneurs s'est accru de 818 034 tonnes à 11 896 671 tonnes en 2013, soit un taux de croissance annuel moyen de plus de 6,4% (Tableau 1). Les conteneurs comptent pour 42% du volume total de chargement et déchargement au port de Montréal. La globalisation des réseaux commerciaux et la distribution modale concomitante entre les régions ont mené vers une croissance du trafic de conteneurs. L'écrasante prépondérance des conteneurs est devenue une composante essentielle de l'intégration commerciale du port de Montréal aux régions du monde.

Tableau 1. Trafic maritime au port de Montréal, 1970-2013

Année	Vrac sec	Grain	Produits pétroliers	Vrac liquide	Conteneurs	Cargo général	Total
1970	3 754 694	6 059 893	8 540 695	258 563	818 034	3 290 882	22 722 761
1980	5 307 406	7 437 936	6 881 155	503 828	3 058 283	1 709 170	24 897 778
1990	4 305 523	2 757 114	7 135 377	687 874	5 764 276	1 098 263	21 748 427
2000	4 167 179	2 128 784	3 641 609	773 784	9 205 120	816 915	20 733 391
2010	3 204 076	2 380 863	7 505 560	645 576	12 033 434	150 158	25 919 667
2011	3 431 811	1 741 035	10 056 615	704 034	12 471 002	129 767	28 534 264
2012	3 467 394	3 070 054	9 525 354	196 068	12 032 966	130 167	28 422 003
2013	3 912 531	2 638 159	9 392 360	157 573	11 896 671	159 677	28 156 971

Source: Port de Montréal, 1970-2013

2.3. Les retombées économiques

En 2012, la firme Les Conseillers ADEC inc. estime que les effets directs, indirects et induits des dépenses d'exploitation et des investissements qui composent l'industrie maritime à Montréal se traduisent par une contribution de 751,8 millions \$ au produit intérieur brut du Québec (ADEC, 2012). Ces retombées économiques n'incluent pas les revenus fiscaux pour les gouvernements du Québec et du Canada sous forme d'impôts sur les salaires et traitements, en taxes diverses ainsi qu'en déboursés parafiscaux (Assurance-emploi, RRQ, CSST, etc.).

Le trafic de conteneurs, produits de vrac et autres types de marchandises au port de Montréal exerce un impact économique positif sur l'économie locale, régionale et provinciale. Le tableau 2 présente une estimation de la valeur des retombées économiques de la manutention des produits au port de Montréal.

Le conteneur est l'activité qui prédomine. Au total, la manutention du conteneur au port de Montréal contribue pour plus de 509 millions \$ au PIB du Québec. Les retombées économiques générées par la manutention des produits pétroliers sont estimées à 95 millions \$. Ces retombées sont suivies par les vracs secs et les céréales dont la manutention au port de Montréal contribue pour 71 millions \$ et 29 millions \$ respectivement.

Tableau 2. Impact économique attribuable aux activités du port de Montréal par produit manutentionné, 2012

Produits	Total manutentionné		Impact \$/tonne	Contribution au PIB	
	Tonne	%		Totale (\$)	%
Vrac sec	3 467 394	12,20	20,66	71 636 360	9,53
Grain	3 070 054	10,80	9,53	29 257 615	3,89
Produit pétrolier	9 525 354	33,51	10,02	95 444 047	12,7
Vrac liquide	196 068	0,69	10,35	2 031 265	0,27
Conteneur	12 032 966	42,34	42,34	509 475 920	67,76
Cargo général	130 167	0,46	337,68	43 954 793	5,85
Total	28 422 003	100,00	26,45	751 800 000	100,00

Source: Compilation par les auteurs à partir du modèle d'impact économique de Ports Canada, DAA stratégies et d'ADEC, 2012

En 2012, le Port de Montréal a traité 1 364 340 conteneurs en unités équivalentes à vingt pieds (EVP). Le volume de flux de 12 032 966 tonnes de fret conteneurisé associé à 1 364 340 EVP permet d'estimer le poids moyen d'un conteneur manutentionné à Montréal à 8,81 tonnes. L'extrapolation des données sur l'impact économique par tonne de 42,34 \$ au volume de conteneurs permet d'estimer l'impact économique direct d'un conteneur à 373 \$.

En 2012, ADEC estimait que le nombre d'emplois associés aux dépenses d'exploitation de l'industrie maritime à Montréal était de 8 915 emplois-année (ADEC, 2012). Le

tableau 3 indique le nombre d'emplois directs par différents secteurs d'activités au port de Montréal. Les chiffres permettent de constater toute l'importance que représentent les emplois liés aux services maritimes, soit 69,9%.

Tableau 3. Répartition des emplois maritimes au port de Montréal, 2012

Secteur économique	Répartition (%)	Emplois
Services maritimes	69,9	6 232
Transport terrestre	13,8	1 230
Transport routier	11,5	1 025
Transport ferroviaire	2,3	205
Secteur bancaire	7,1	633
Administration portuaire	5,4	481
Expéditeurs/consignataires	3,8	339
Total	100,0	8 915

Source: Auteurs à partir du modèle d'impact économique de Ports Canada et d'ADEC, 2012

Le tableau 4 souligne que la stabilité ou la croissance du nombre d'employés dans l'industrie maritime à Montréal est liée à la conteneurisation. L'emploi prédomine dans le maniement des conteneurs avec 4 163 emplois. Les vracs secs, les céréales et le cargo général de marchandises non conteneurisées représentent 43,5% des emplois générés par le port de Montréal. Plus de 750 emplois sont liés aux entreprises pétrolières associées aux activités portuaires et maritimes de Montréal.

Tableau 4. Répartition des emplois par type de fret au port de Montréal, 2012

Type de marchandises	Répartition (%)	Emplois
Vrac sec	20,4	1 819
Céréales	7,1	633
Pétrole	8,5	758
Vrac liquide	1,3	116
Conteneurs	46,7	4 163
Cargo général	16,0	1 426
Total	100,0	8 915

Source: Auteurs à partir du modèle d'impact économique de Ports Canada et d'ADEC, 2012

2.4. Le gigantisme naval

Depuis une décennie, la taille des navires s'est accrue substantiellement. Ce changement de dimension dans la taille des navires permet d'atteindre des économies d'échelle. Un examen des carnets de commandes suggère que cette tendance est particulièrement marquante pour les navires porte-conteneurs. Les porte-conteneurs de grande taille les plus récents affichent une capacité supérieure à 18 000 EVP. Ce processus exerce d'importantes conséquences pour le port de Montréal puisque la

profondeur du chenal navigable limite l'accès à des porte-conteneurs d'environ 4 440 EVP. Le principal concurrent du port de Montréal concernant le gigantisme naval est le port de New York qui peut manutentionner des navires de 8 000 EVP. Lorsque les travaux de dragage seront complétés le port de New York sera en mesure d'accueillir des navires porte-conteneurs de 14 000 EVP.

Considérant que les économies d'échelle sont un facteur clé dans la rentabilité des transporteurs, on pourrait supposer que cette condition devrait être un important obstacle à l'établissement de services maritimes vers Montréal. Or, il n'en est rien. La singularité du port de Montréal repose précisément sur sa position au cœur du continent. Les navires océaniques qui accostent au port de Montréal ne vont pas ailleurs. Il n'y a pas de pratique de transit maritime. Les navires qui se rendent à Montréal sont chargés ou déchargés complètement à Montréal. Le port de Montréal possède une fonction unique de marché sur le trafic conteneurisé, en étant le seul port d'escale intérieur d'Amérique du Nord sur les services trans-Atlantiques. Sur 1 600 kilomètres entre Montréal et l'océan Atlantique, il n'y a aucun marché de grande taille permettant de justifier des ports d'escale. Il s'agit d'un phénomène unique dans le transport maritime de conteneurs. Montréal occupe une niche de marché où des navires de plus petite taille (4 400 EVP) sont particulièrement adaptés pour desservir des marchés particuliers.

Un des avantages du port de Montréal malgré la restriction du chenal navigable est sa position stratégique sur le système Saint-Laurent Grands Lacs. Le port de Montréal est à 1 000 milles nautiques de l'océan Atlantique et permet aux navires un accès à l'intérieur du continent. Le système Saint-Laurent-Grands Lacs offre un système de navigation unique de 3 700 kilomètres au cœur du continent nord-américain. En amont de Montréal, il existe un grand nombre de rapides qui ont été contournés par la Voie Maritime du Saint-Laurent. Les écluses permettent l'accès à des navires de 27 000 tonnes en raison d'une profondeur de 8 mètres. Entre Montréal et Québec, l'accès au port de Montréal par des navires océaniques est possible le long d'un chenal d'une profondeur de 11,3 mètres. Au-delà de Québec le système n'offre pour l'essentiel de son parcours aucune contrainte majeure de profondeur d'eau pour la navigation dans le Golfe. Cette rupture entre la Voie Maritime du Saint-Laurent et la navigation au port de Montréal a pour conséquence d'obliger les lacquiers à transférer leur cargaison sur des navires océaniques à Montréal ou à d'autres ports du Québec.

2.5. Le niveau d'eau

Le problème des niveaux d'eau est particulièrement aigu dans le système Saint-Laurent-Grands Lacs. Ne disposant pas d'affluents importants, les Grands Lacs sont tributaires du niveau de précipitations pour maintenir les profondeurs d'eau. Puisque le port de Montréal est situé sur le cours du Saint-Laurent, les variations de niveau d'eau affectent la navigation au port de Montréal. La fréquence mensuelle des niveaux d'eau affiche une certaine régularité. Les courbes mensuelles observées depuis 1964 affichent une structure saisonnière. Les niveaux d'eau sont généralement plus élevés en janvier et décembre et plus faibles en août et septembre. Puisque le cours du Saint-

Laurent est déterminé par l'écoulement du lac Ontario, le fleuve subit les impacts des différences de niveaux d'eau des Grands Lacs. Historiquement, les niveaux d'eau dans le système sont cycliques, avec plusieurs périodes au cours desquelles les niveaux d'eau sont au-dessus de la moyenne (le début des années 1950 et des années 1970, le milieu des années 1980 et 1990), suivies de périodes où les niveaux d'eau sont plus bas que les conditions de référence (milieu des années 1920, 1930 et 1960). L'analyse de l'évolution des niveaux d'eau à la station Jetée no. 1 du Port de Montréal pour la période 1964-2013 démontre que l'amplitude verticale moyenne tend à diminuer. L'amplitude verticale moyenne pour la période 1964-1973 (1,19 m) est supérieure à celle de la période 2004 à 2013 (0,77 m). En outre, les valeurs maximums et minimums de niveau d'eau tendent à diminuer depuis 50 ans. Les niveaux d'eau maximums enregistrés ont diminué de 4,42 m à 1,94 m entre 1964 et 2013.

2.6. Niveau d'eau et mouvement des navires

Une baisse des niveaux d'eau soulève d'importants problèmes pour la navigation. La variation saisonnière des niveaux d'eau affecte la compétitivité des transporteurs maritimes au port de Montréal. Durant certaines périodes, le niveau d'eau dans le chenal de navigation tombe sous la barre du zéro des cartes. Les navires doivent circuler allégés, ce qui réduit les revenus des compagnies et les impacts économiques régionaux. Une analyse très détaillée sur le transport maritime quotidien au port de Montréal pour la période 2007 à 2013 révèle que le port a connu quatre années sans baisse de niveau d'eau et trois années où le niveau d'eau s'est situé sous le zéro des cartes (Tableau 5).

Tableau 5. Trafic de porte-conteneurs et niveaux d'eau au port de Montréal, 2007-2013

Année	Nombre de jours avec porte-conteneurs en circulation	Nombre de jours avec porte-conteneurs en circulation et niveau d'eau sous le zéro des cartes
2007	338	111
2008	346	0
2009	335	0
2010	335	84
2011	327	0
2012	324	145
2013 (1/1-26/9)	247	0

Une analyse détaillée du mouvement des navires pour la période 2007 à 2013 révèle que la baisse des niveaux d'eau n'exerce pas d'impacts significatifs pour les vracquiers, les pétroliers et les navires de cargo général.

Plus de 90% des navires assignés au trafic de vrac affichent un tirant d'eau de moins de 11,3 m. Pour la période 2007-2012, plus de 79% des vracquiers, à l'exclusion des

lacquiers ont un dégagement sous quille à l'arrivée de plus de 30 cm. Le transport de vrac ne semble pas accuser de baisse abrupte ou soutenue de trafic, à l'exception du marché céréalier qui tend à se tourner vers les marchés internationaux. Plus de 90% des navires assignés au trafic de vrac affichent un tirant d'eau de moins de 11,3 m. Pour la période 2007-2012, plus de 79% des vracquiers, à l'exclusion des lacquiers ont un dégagement sous quille à l'arrivée de plus de 30 cm. Très peu de navires sont en-dessous de la limite permise. La même situation peut être observée au départ des navires. L'explication pour la faiblesse des chargements est complexe. D'abord, le vrac nécessite des installations et équipements spéciaux. Ensuite, les réseaux maritimes sont généralement déterminés d'une façon définitive pour de longues périodes. Enfin, les taux d'affrètement peuvent être fixés en fonction du temps, du voyage ou du navire.

Plus de 70% des navires assignés au transport de produits pétroliers affichent un tirant d'eau de moins de 11,3 m. Pour la période 2007-2012, plus de la moitié des pétroliers ont un dégagement sous quille à l'arrivée de plus d'un mètre, 24% ont un dégagement sous quille qui varie entre 30 cm et 1 mètre et 24% un dégagement de moins de 30 cm à l'arrivée. Le phénomène est plus dramatique au départ des navires, alors que 70% des pétroliers ont un dégagement sous quille au départ de plus d'un mètre. Montréal reçoit d'importantes quantités de produits pétroliers pour consommation locale de la raffinerie Ultramar à St-Romuald. En outre, Montréal est un centre important de distribution de produits pétroliers pour plusieurs villes le long du Saint-Laurent et dans les Maritimes. Les pétroliers peuvent décharger une partie de leur cargaison avant l'arrivée à Montréal ou ne déchargent qu'une partie de leur cargaison à Montréal.

Le trafic de marchandises générales est de plus en plus influencé par les processus de conteneurisation, notamment sur le marché international, en raison des coûts de manutention et de transport terrestre qui constituent une partie majeure du coût total de transport. Plus de 95% des navires de cargo général affichent un tirant d'eau de moins de 11,3 m. Pour la période 2007-2012, plus des deux-tiers des navires de cargo général arrivent ou quittent le port de Montréal avec un dégagement sous quille de plus de 30 cm.

2.7. Niveau d'eau et transport maritime de conteneurs

Face à une baisse des niveaux d'eau, les transporteurs facturent un supplément de 200 \$ par conteneur pour tous les conteneurs sur la route maritime de Montréal plusieurs mois pendant l'année. Pour les lignes maritimes, l'objectif est de combler la perte potentielle de capacité de charge lorsque les niveaux d'eau sont inférieurs au zéro des cartes.

Plus de 90% des porte-conteneurs enregistrés à l'arrivée ont un dégagement sous quille de plus de 30 cm. Très peu de navires se retrouvent sous la norme minimale qui nécessite une approbation de la Garde Côtière Canadienne. La situation est différente au départ du port de Montréal alors qu'un navire sur cinq dépasse cette limite. Ces données suggèrent un problème de profondeur d'eau au port de Montréal. La différence entre les arrivées et les départs reflète l'information disponible aux lignes maritimes lors

des traversées. Pour les arrivées à Montréal, le chargement en Europe et ailleurs est effectué 7-10 jours avant l'arrivée. Cela indique peut-être que l'information sur les profondeurs d'eau disponibles était imprécise. En fort contraste, les chargements du navire au port de Montréal peuvent être effectués en temps réel assurant une correspondance exacte avec le niveau d'eau dans le chenal.

Il est possible d'estimer le nombre de conteneurs que représente une baisse du niveau d'eau en comparant la capacité moyenne d'EVP sur tous les porte-conteneurs et la moyenne maximale des tirants d'eau. L'analyse d'un échantillon de 135 voyages effectués en 2013 (année qui n'a pas connu de baisse de niveau d'eau) sur trois routes maritimes (Europe du Nord-Montréal; Méditerranée-Montréal; et Caraïbes/Côte Est Amérique du Sud-Montréal) révèle une capacité moyenne de 3 476 EVP par navire et un tirant d'eau moyen de 11,51 mètres, ce qui représente une moyenne de 3,01 EVP/cm de tirant d'eau par navire. Ce chiffre est inférieur aux calculs de Transport Canada qui estime la capacité de chargement d'un navire à 6 EVP par centimètre de niveau d'eau. Le rapport pour les plus petits navires est de 1,19 EVP/cm et pour les plus grands de 4,08 EVP/cm de tirant d'eau.

La relation entre la capacité de transport d'un navire et la profondeur d'eau offre un point de référence pour estimer l'impact économique des changements de niveau d'eau sur le marché du conteneur à Montréal. Une variation d'un centimètre de niveau d'eau au port de Montréal représente un impact économique de 1 122,73 \$ par navire ($373 \text{ \$/EVP} * 3,01 \text{ EVP/cm}$).

Les données fournissent un moyen de déterminer la différence entre le nombre de conteneurs par voyage et la capacité moyenne de chargement des navires. Les résultats indiquent que les navires à l'arrivée ou au départ de Montréal peuvent ajouter une moyenne de 484,61 EVP à leur chargement. Pour les lignes maritimes, la perte potentielle de capacité de charge survient lorsque les niveaux d'eau sont inférieurs au zéro des cartes. Dans le but d'examiner cette question, nous avons étudié l'année 2012 qui présente le plus grand nombre de jours où le niveau d'eau était inférieur au zéro des cartes. Comme il est attendu, la première partie de l'année a connu des niveaux d'eau supérieurs au zéro des cartes. Pour la période du 11 au 30 mars, le niveau d'eau était continuellement 1,7 m au-dessus du zéro des cartes permettant un tirant d'eau de 12,1 m dans le chenal navigable. Nous avons analysé les départs des navires porte-conteneurs durant cette période, lorsque théoriquement les lignes maritimes peuvent charger leurs navires à un seuil supérieur à la normale. Quatre navires ont voyagé avec un tirant d'eau supérieur à 10,4 m lorsque le chenal est au zéro des cartes. Mais tous les navires ont chargé à un niveau inférieur au niveau d'eau disponible de 12,1 m. Ces chargements sont un indicateur des conditions de marché et suggèrent que les lignes maritimes ne disposaient pas de conteneurs supplémentaires à transporter malgré les hauts niveaux d'eau.

Nous avons ensuite examiné les chargements des mêmes navires lorsque les niveaux d'eau étaient inférieurs à 0,04 m sous le zéro des cartes durant plusieurs jours consécutifs, soit entre le 20 août et le 15 septembre. Ce fut la plus longue période de

faibles niveaux d'eau pour l'année 2012. Nous avons compilé les chargements des mêmes navires sélectionnés précédemment durant la période de haut niveau d'eau. L'échantillon comprend 11 navires (Tableau 6).

Tableau 6. Tirant d'eau de quelques porte-conteneurs en fonction du niveau d'eau au départ du port de Montréal, 2012

Navire	Niveau d'eau > 1,7 m zéro des cartes	Niveau d'eau < 0,04 m zéro des cartes	Différence (m)
Maersk Penang	10,5	9,6	(0,9)
Ottawa Express	10,2	9,8	(0,4)
Milan Express	8,9	9,6	0,7
Toronto Express	10,8	9,5	(1,3)
Maersk Palermo	10,4	8,2	(2,2)
MSC Alysia	10,0	9,9	(0,1)
OOCL Belgium	10,4	9,8	(0,6)
Montreal Express	10,3	9,6	(0,7)
Maersk Pembroke	11,5	9,2	(2,3)
OOCL Montreal	10,8	9,8	(1,0)
MSC Shannon	9,1	7,4	(1,7)

Plutôt qu'une navigation disponible de 12,1 m durant le printemps, le chenal navigable restreint le tirant d'eau des navires à 10 m. À une exception près, tous les navires ont voyagé avec une charge inférieure à celle enregistrée durant la période où les niveaux d'eau étaient plus élevés. Ceci suggère une indication possible de l'effet direct de la baisse des niveaux d'eau sur les expéditions de conteneurs. La question qui demeure, toutefois, est de vérifier si le faible chargement des navires est une conséquence des conditions du marché ou de la baisse des niveaux d'eau. Dans vérifier cette hypothèse, nous avons sélectionné les mêmes navires dans le but de comparer leur niveau de chargement durant la même période pour l'année 2013, alors que le niveau d'eau ne représentait pas de problème (Tableau 7).

Tableau 7. Tirant d'eau de quelques porte-conteneurs en fonction du niveau d'eau au départ du port de Montréal, 2012 et 2013

Navire	20 août-15 septembre 2012 Niveau d'eau < 0,04 m zéro des cartes	20 août-5 septembre 2013	Différence 2012-2013 (m)
Maersk Penang	9,6	10,0	(0,4)
Ottawa Express	9,8	9,7	0,1
Milan Express	9,6	9,0	0,6
Toronto Express	9,5	10,3	(0,8)
Maersk Palermo	8,2	10,1	(1,9)
MSC Alysia	9,9	9,6	0,3
OOCL Belgium	9,8	9,8	0,0
Montreal Express	9,6	10,4	(0,8)
Maersk Pembroke	9,2	9,7	(0,5)
OOCL Montreal	9,8	10,4	(0,6)
MSC Shannon	7,4	8,0	(0,6)

En 2013, trois des navires ont voyagé avec une charge moindre qu'en 2012. Un seul navire a quitté Montréal avec le même volume de chargement. Considérant que sept navires ont voyagé avec une charge plus importante en 2013 en comparaison à la même période en 2012 tend à confirmer l'influence de la baisse des niveaux d'eau sur le chargement des navires.

Plusieurs études ont produit une série d'estimations de la perte potentielle de cargo par unité de profondeur d'eau. D'Arcy et al (2005) appliquent une valeur de 114 EVP par 30 cm de niveau d'eau. Ceci équivaut à 3,8 EVP par centimètre en fonction d'un navire d'une capacité de 1 800 EVP. Transport Québec applique une valeur de 6 EVP par centimètre, une valeur qui a été rapportée par Transport Canada. L'origine de ce chiffre demeure incertaine. L'Institute of Water Resources (IWR) du Corps des Ingénieurs de l'Armée des États-Unis (2009) a publié des mesures détaillées de «tonnes par pouce» pour différents types de navires. L'estimation pour les navires porte-conteneurs est de 320 tonnes par pouce en fonction d'un navire de classe S de plus de 7 000 EVP. En utilisant la moyenne états-unienne de 11 tonnes par EVP, ceci équivaut à 11,5 EVP par centimètre. La différence entre les estimations est partiellement fondée sur différentes méthodologies. Il est important de souligner l'influence de la taille du navire. Les vaisseaux qui desservent Montréal sont de plus petite taille que les navires de classe S de l'étude du Corps des Ingénieurs de l'Armée des États-Unis, mais sont en moyenne plus grand que ceux utilisés dans l'étude de D'Arcy et al (2005). Il est donc suggéré d'attribuer la valeur de l'étude de D'Arcy et al (2005) en tant qu'indicateur de faible impact, l'indice de l'Institute of Water Resources à un impact fort et celui de Transport Québec à un impact intermédiaire.

Un examen détaillé des arrivés des navires en 2012 révèle que 46 navires sont arrivés à Montréal alors que le niveau d'eau était moins de 10,4 m (i.e. chenal navigable de 11,3 m moins le dégagement sous quille de 0,90 m requis par la Garde Côtière). Environ 13% des arrivés de navires en 2012 ont été affectés par une baisse des

niveaux d'eau. Le niveau le plus bas était de 18 cm en deçà de 10,4 m et la moyenne était de – 7 cm. Le déficit cumulé pour les arrivés pour l'année 2012 était de 3,09 m. Les pertes potentielles en fonction des différentes estimations du nombre de conteneurs par centimètre sont de 1 174 EVP (valeur faible), 1 854 EVP (valeur moyenne) et 3 953 EVP (valeur forte).

L'application de la même procédure aux départs des navires en 2012 révèle que 47 navires ont quitté le port de Montréal alors que le niveau d'eau était moins de 10,4 m. Ceci représente 13,5% des navires en partance de Montréal. Le niveau d'eau le plus bas enregistré était de 15 cm en deçà de 10,4 m et la moyenne était de – 6 cm. Le déficit cumulé pour les départs pour l'année 2012 était de 2,78 m, ce qui représente une perte potentielle de 1 056 EVP (faible), 1 668 EVP (moyen) et 3 197 EVP (fort). La perte totale en trafic conteneurisé en raison d'une baisse des niveaux d'eau au port de Montréal est estimée à une valeur minimale de 2 230 EVP, à une valeur maximale de 7 870 EVP et une valeur moyenne de 3 522 EVP.

Ces chiffres permettent d'estimer les coûts directs d'une baisse des niveaux d'eau à l'économie de Montréal pour l'année 2012. Ces coûts sont estimés en fonction des différentes mesures associées à des pertes de trafic par centimètre de niveau d'eau. Les résultats indiquent que ces coûts varient de 831 790 \$ (valeur faible) à 1 313 706 \$ (valeur moyenne) et peuvent même atteindre 2 935 510 \$ (valeur forte). Ces estimations des coûts économiques directs sont en somme modestes puisque les effets des bas niveaux d'eau en 2012, bien qu'importants, n'affectaient qu'un petit nombre de départ.

Un examen des pertes de revenus pour les compagnies maritimes révèle une situation bien différente. Nous avons appliqué les taux moyens de fret maritime par conteneur de 2 417 \$ pour les importations et de 1 485 \$ pour les exportations. Ces chiffres appliqués aux pertes de trafic résultant d'une baisse des niveaux d'eau produisent un impact économique qui varie de 2 837 558 \$ (valeur faible) à 6 958 098 \$ (valeur moyenne) et même 15 371 146 \$ (valeur forte). Ces estimations des pertes de revenus pour les compagnies maritimes demeurent difficiles à évaluer puisque certains des conteneurs laissés sur les quais auraient pu être embarqués sur un autre navire.

La tâche qui consiste à estimer le rôle précis des baisses de niveaux d'eau sur les expéditions de conteneurs demeure très difficile pour deux raisons. Premièrement, nous ne disposons pas d'information sur le poids de chaque conteneur chargé ou déchargé en fonction des différentes capacités et dimensions physiques des porte-conteneurs qui desservent le port de Montréal. Deuxièmement, il n'existe aucune indication du nombre de conteneurs laissé sur les quais durant les périodes de faibles niveaux d'eau. L'analyse des services de navires révèle que les transporteurs ne prennent pas le plein avantage des hauts niveaux d'eau pour charger au-delà du nombre habituel de conteneurs. Les baisses de niveaux d'eau, en-deçà du seuil normal du chenal navigable de 10,4 m sont relativement rares. En outre, lorsque ces épisodes surviennent, les déficits se mesurent en quelques centimètres et excèdent rarement 15 centimètres.

Des éléments de preuve colligés pour l'année 2012 révèlent que les effets de la baisse des niveaux d'eau sur le chargement des navires ne sont pas très importants en termes d'impacts économiques directs sur l'économie régionale et sur la capacité des transporteurs de l'assumer. Les plus importantes pertes de revenus pour les transporteurs estimés à 15,4 millions \$ doivent être ajustées au supplément de 200 \$ par conteneur qu'ils perçoivent. Si les 46 navires qui ont fait escale au port de Montréal entre le 20 août et le 15 septembre 2012 transportaient en moyenne 4 000 EVP, le supplément a généré des recettes de 36,8 millions \$, une aubaine inespérée pour les transporteurs, mais un défi concurrentiel pour le port de Montréal.

Les résultats suggèrent que la variabilité des niveaux d'eau est plus importante que les déficits. Le port de Montréal affiche une variation hebdomadaire des niveaux d'eau même lors des périodes de l'année où les niveaux d'eau offrent un dégagement sous quille plus grand que 10,4 m. Cette situation force les lignes maritimes à adopter des mesures d'opérations très prudentes, notamment en raison du grand nombre de navires qui ont un tirant d'eau supérieur au 11,3 m du chenal navigable. Ces résultats suggèrent que les impacts des futurs changements climatiques seront autant dépendant de la variation des niveaux d'eau que de l'écart du niveau d'eau par rapport au zéro des cartes.

3. LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

3.1. Les prévisions

L'équipe Ouranos a élaboré trois scénarios différents sur les variations des niveaux d'eau en fonction d'un scénario de référence (Huard, 2014). Le scénario de référence est construit sur la base des débits enregistrés à Sorel par Environnement Canada. Ce scénario de référence est défini comme les 50 ans de la série des niveaux d'eau couvrant la période 1958-2007.

Le premier scénario futur proposé par Ouranos ne présente aucun changement climatique. La méthodologie consiste à transposer les conditions historiques du fleuve Saint-Laurent incluant la variabilité annuelle des années 1958-2007 aux années 2015-2064.

Le second scénario What-if # 1 (WI1) correspond au scénario «Chaud et sec» de la Commission Mixte Internationale (CMI) en combinant les projections du Modèle Régional de Climat Canadian (CGCM2) aux projections d'émissions de gaz à effet de serre A21. Ce scénario envisage une baisse progressive des débits et niveaux d'eau se superposant à la variabilité naturelle du fleuve Saint-Laurent par rapport au scénario de référence.

Le troisième scénario What-if # 2 (WI2) est fondé sur l'apport net de chacun des bassins composant les Grands Lacs dans le but d'identifier les débits du fleuve Saint-Laurent. Le scénario est construit en fonction d'une amplification du cycle annuel des niveaux d'eau calculé à partir de la simulation afa/afd du Modèle régional canadien du

climat (MRCC). Ce scénario projette une augmentation marquée des apports hivernaux, une diminution des apports estivaux et une plus grande variabilité interannuelle par rapport au scénario de référence.

Les prévisions de niveau d'eau au quart-de-mois telles qu'élaborées par Ouranos ne peuvent être acceptées comme de véritables valeurs, mais davantage comme indicatrices de tendance générale. Les scénarios futurs proposés offrent des estimations des niveaux d'eau au quart-de-mois sur un horizon de 50 ans. Les prévisions sur une période aussi longue affichent un taux d'erreur très élevé qui nous est inconnu. Néanmoins, la démarche d'Ouranos demeure valable. Le niveau de précision des données fournies permet d'estimer l'influence de la variation des niveaux d'eau sur les activités de transport maritime

3.2. Les impacts économiques

La quantification économique de la variation des niveaux d'eau se concentre sur l'impact du niveau d'eau sous le zéro des cartes prévu par les scénarios hydro-climatiques sur la capacité de transport des navires porte-conteneurs empruntant le Saint-Laurent.

En fonction des études mentionnées précédemment, trois hypothèses représentant la perte d'EVP par centimètre d'eau sont retenues:

- Hypothèse 1: une perte de 3,8 EVP par cm d'eau sous le zéro des cartes;
- Hypothèse 2: une perte de 6,0 EVP par cm d'eau sous le zéro des cartes;
- Hypothèse 3: une perte de 11,5 EVP par cm d'eau sous le zéro des cartes.

Les pertes économiques du transport maritime d'un conteneur équivalent vingt pieds (EVP) sont estimées à 373 \$. Les impacts monétaires estimés pour les scénarios sont mesurés sur la période étudiée en utilisant un taux d'escompte de 4% par année.

Pour le scénario de référence la navigation au port de Montréal pourrait être affectée par une baisse du niveau d'eau pour environ 1766 jours sur une période de 50 ans entre 2015 et 2064. Un examen de la variation du niveau d'eau par décennie démontre que ce sont les décennies 2015-2024 et 2055-2064 qui présentent la plus grande fréquence de niveau d'eau sous le zéro des cartes. Selon le scénario de référence, le port de Montréal ne serait affecté par aucune perte significative en raison d'une baisse de niveau d'eau pendant une période continue de 30 ans. L'estimation des impacts monétaires révèle que les pertes économiques sur 50 ans varient de 29 M \$ (valeur faible: hypothèse 3,8 EVP par centimètre), à 45 M \$ (valeur moyenne: hypothèse 6,0 EVP par centimètre) et peuvent même atteindre 88 M \$ (valeur forte: hypothèse 11,5 EVP par centimètre) (Tableau 8).

Tableau 8. Impacts monétaires des bas niveaux d'eau sans changement climatique (RE), 2015-2064 (taux d'escompte 4%)

Hypothèses	Coût total (2015-2064)
H 1 (3,8 EVP)	29 087 890,19 \$
H 2 (6,0 EVP)	45 928 247,66 \$
H 3 (11,5 EVP)	88 029 141,35 \$

Pour le scénario (WI1) la navigation au port de Montréal sera donc affectée par une baisse du niveau d'eau pour environ 4 040 jours sur une période de 50 ans entre 2015 et 2064. Selon le scénario WI1, le port de Montréal serait affecté par une baisse saisonnière de la colonne d'eau disponible à chaque décennie. Un examen de la variation du niveau d'eau par décennie démontre que ce sont les décennies 2035 à 2064 qui présentent la plus grande fréquence de niveau d'eau sous le zéro des cartes. L'estimation des impacts monétaires du scénario WI1 sur un horizon de 50 ans varie de 69 M \$ (valeur faible: hypothèse 3,8 EVP par centimètre), à 110 M \$ (valeur moyenne: hypothèse 6,0 EVP par centimètre) et peut même atteindre 211 M \$ (valeur forte: hypothèse 11,5 EVP par centimètre) (Tableau 9).

Tableau 9. Impacts monétaires des bas niveaux d'eau avec changement climatique (WI1), 2015-2064 (taux d'escompte 4%)

Hypothèses	Coût total (2015-2064)
H 1 (3,8 EVP)	69 975 299,63 \$
H 2 (6,0 EVP)	110 487 315,20 \$
H 3 (11,5 EVP)	211 767 354,14 \$

Pour le scénario (WI2) la navigation au port de Montréal sera affectée par une baisse du niveau d'eau pour environ 2 080 jours sur une période de 50 ans entre 2015 et 2064. Un examen de la variation du niveau d'eau par décennie suggère que ce sont les décennies 2015-2025 et 2055-2064 qui présentent les plus grandes fréquences de niveau d'eau sous le zéro des cartes. Selon le scénario WI2, le port de Montréal ne serait affecté par aucune perte significative en raison d'une baisse de niveau d'eau pendant une période continue de 40 ans. L'estimation des impacts monétaires des bas niveaux d'eau révèle que les pertes économiques totales du scénario WI2 sur un horizon de 50 ans varient de 38 M \$ (valeur faible: hypothèse 3,8 EVP par centimètre), à 61 M \$ (valeur moyenne: hypothèse 6,0 EVP par centimètre) et peuvent même atteindre 117 M \$ (valeur forte: hypothèse 11,5 EVP par centimètre) (Tableau 10).

Tableau 10. Impacts monétaires des bas niveaux d'eau avec changement climatique (WI2), 2015-2064 (taux d'escompte 4%)

Hypothèses	Coût total (2015-2064)
H 1 (3,8 EVP)	38 715 802,93 \$
H 2 (6 EVP)	61 130 215,15 \$
H 3 (11,5 EVP)	117 166 245,71 \$

Tous les scénarios développés par Ouranos prévoient une baisse périodique et temporaire des niveaux d'eau sous le zéro des cartes au port de Montréal sur un horizon de 50 ans. L'étude des changements climatiques met en lumière l'impact de la fluctuation des niveaux d'eau sur la navigation maritime commerciale. Une baisse des niveaux d'eau exerce d'importantes répercussions incluant un allègement des capacités de chargement des navires, un détournement des trafics, des transferts modaux et une fluctuation dans le volume des inventaires. La baisse prévisible des niveaux d'eau souligne l'importance d'identifier et de quantifier les mesures d'adaptation à privilégier pour la navigation maritime commerciale afin de minimiser les coûts associés aux changements climatiques.

4. LES MESURES D'ADAPTATION

Une revue critique de la littérature en lien avec la variation des niveaux d'eau permet d'identifier les mesures d'adaptation pour les routes maritimes, les ports et les flottes. L'analyse révèle que le dragage et les ouvrages d'art sont les principales actions employées pour les voies navigables. La réponse des administrations portuaires à la fluctuation des niveaux d'eau repose sur l'entretien des équipements ou le transfert partiel des activités portuaires. La stratégie des transporteurs consiste à minimiser le dégagement sous quille des navires ou de déployer une nouvelle flotte de vaisseaux.

4.1. Le dragage

La profondeur d'eau est un problème pour tous les ports du monde. La sédimentation des systèmes de voies navigables et l'accroissement de la taille des navires représentent un défi permanent. Le dragage est pratiqué pour les systèmes portuaires afin de créer ou maintenir une profondeur d'eau adéquate pour les opérations navales et l'accès au port. Les périodes de faibles niveaux d'eau exercent un impact sur la navigation. Le dragage est la principale réponse aux bas niveaux d'eau, de façon à assurer un certain tirant d'eau aux navires. L'ampleur des activités de dragage est énorme. Pour la période 2011-2013, l'administration portuaire d'Hambourg a entrepris le prélèvement de 13 millions m³ de sédiments (Bürgerschaft der Freien un Hansestadt Hamburg, 2014). Le Corps de Ingénieurs de l'Armée des États-Unis a approuvé un projet de dragage de 9,6 millions m³ au port de Savannah (USACE 2012a; 2012b). L'objectif consiste à approfondir le canal de 1,5 m afin d'offrir une profondeur de 14,3 mètres le long du chenal et permettre ainsi l'accès des navires de grande taille présentement en service et ceux en commande. L'approfondissement du canal de

navigation de la Tamise et le façonnement des berges ont nécessité un dragage de 300 m de largeur sur une longueur de 100 km (DEME, 2014b). Cette démarche a permis d'abaisser la profondeur du canal de 10 m à 14,5 m, voire à 16,5 m à certains endroits. Environ 27 millions m³ de matériaux de dragage ont été utilisés pour le réaménagement du site dont 6 millions m³ pour agrandir le site portuaire aux dépens du littoral fluvial sur 92 ha et 18 millions m³ pour ériger la plateforme portuaire de 80 ha.

Le dragage peut être très agressif pour l'environnement et affecter les écosystèmes. Les activités de dragage peuvent poser des risques pour l'environnement. D'une part, elles modifient l'hydrologie marine en brassant les eaux qui peuvent affecter la diversité biologique des fonds marins. D'autre part, les activités de dragage entraînent un prélèvement de sédiments et de colonnes d'eau contaminée dont il faut se débarrasser.

Les activités de dragage sont coûteuses d'autant plus qu'elles doivent souvent être répétées pour compenser la sédimentation. Le projet de dragage du port de Savannah pour accueillir de plus gros navires est estimé à 551 millions \$ US (USACE, 2012a). Dans le cas du système Saint-Laurent, les coûts varient de 33-100/m³ \$ CA en fonction des segments de la voie fluviale. Ces coûts n'incluent pas les coûts de décontamination, ni ceux de compensation environnementale.

4.2. Les ouvrages d'art

L'augmentation de la variabilité des niveaux d'eau et la modification concomitante des courants marins forcent le développement de nouveaux ouvrages de protection pour protéger la navigation maritime contre les turbulences et l'écrêtement des crues.

La lutte contre les basses eaux du Rhin a nécessité la construction de digues espacées tous les 200 mètres parallèlement au littoral dans le but de raccourcir le littoral, contenir l'eau et maintenir un niveau d'eau approprié pour la navigation dans le cas de baisse de niveaux d'eau. Cette mesure est similaire à la construction d'ouvrages d'art sur le Mississippi. Des barrières mécaniques amovibles sont déjà utilisées pour contrer la hausse des niveaux d'eau à des moments critiques sur la Tamise et dans le lagon à Venise. Des ouvrages d'art similaires ont été envisagés par D'Arcy (2005) sur le Saint-Laurent en aval du lac Saint-Pierre dans le but de pallier à la baisse des niveaux d'eau.

Les ouvrages d'art perturbent l'environnement en modifiant le littoral et les courants, ce qui entraîne des changements dans l'érosion/l'accumulation du trait de côte (Deegan et al, 1984; De Koninck, 2006). Dans le cas du système Saint-Laurent, la construction de barrages pourrait causer des inondations durant les périodes de hautes eaux. Un barrage sur le Saint-Laurent nécessiterait la construction d'écluses afin de permettre le passage des navires durant les périodes de fermeture ce qui affecterait inévitablement la fluidité des trafics.

Les ouvrages d'art qui adaptent les réseaux maritimes à la variation des niveaux d'eau représentent d'importants investissements. Le coût de chaque digue d'aménagement du Saint-Laurent pour pallier aux très fortes fluctuations des eaux est estimé à 50

millions \$. Les études menées par D'Arcy et al (2005) sur les coûts estimés d'un barrage combiné à une écluse en aval du lac Saint-Pierre est estimé à 469,6 millions \$.

4.3. Le transfert des activités portuaires

La menace d'une baisse des niveaux d'eau au port de Montréal pourrait être résolue par un transfert des terminaux à conteneurs vers un autre site où il n'existe pas de contraintes de profondeur d'eau. Cette solution fut employée Shanghai. La croissance de la taille des navires et l'augmentation du trafic maritime a forcé l'administration portuaire à examiner la provision de sites à des fins maritimes. Il était devenu évident que le dragage du fleuve Yangtze était insuffisant pour assurer la compétitivité du port de Shanghai (Comtois & Dong, 2007). Les problèmes de capacité de Shanghai se sont résolus par la construction d'un nouveau site portuaire dans la baie de Hangzhou et par la modification du paysage des îles Yangshan. Le projet inclut 52 quais, un terminal à conteneurs et un pont de 32 km reliant les îles au continent.

Les investissements requis pour le transfert des activités portuaires sont très importants. Dans le cas du port de Yangshan, les coûts sont estimés à plus de 14 milliards \$ US. Le transfert partiel des activités conteneurisées du port de Montréal vers un site à Québec ou à Trois-Rivières pourrait atteindre 1 milliard \$ incluant les coûts d'acquisition des terrains, de compensation environnementale, de construction de quais. Ces coûts excluent les problèmes de relocalisation des activités portuaires et les coûts additionnels de distribution des conteneurs vers les marchés.

4.4. Le déploiement d'une nouvelle flotte

Il existe plusieurs solutions qui ont un impact sur les navires et le transport maritime. La capacité des navires est fonction de leurs dimensions. La croissance de la taille des navires porte-conteneurs est le résultat d'une augmentation de la longueur, de la largeur et du tirant d'eau des navires. L'augmentation de la profondeur d'eau dans le système Saint-Laurent est présentement impossible. Les navires qui affichent les plus fortes capacités sont ceux qui ont augmenté leur longueur. L'augmentation de la largeur des navires est également possible. Les règles de navigation sur le Saint-Laurent ont été modifiées en 2013, quand la largeur maximale permise sur le fleuve a été portée à 44 mètres - contre 32 mètres précédemment. La décision prise par la Garde côtière permet désormais à des navires de classe Panamax et Aframax de remonter jusqu'à Montréal ce qui pourrait compenser les problèmes de baisses de niveaux d'eau.

Mais l'augmentation de la largeur du navire exerce un impact négatif sur le tirant d'eau. L'enfoncement du navire (squat) est un phénomène qui apparaît lorsqu'un navire se déplace avec une faible profondeur d'eau sous la quille. Ce phénomène est le résultat d'une modification de l'écoulement de l'eau sous la coque qui entraîne une succion vers le bas lorsque celle-ci est à proximité du fond.

Le déploiement de nouveaux navires engendre des coûts importants. Dans quelle mesure est-ce que les transporteurs seraient disposés à investir 20 millions \$ par navire

pour desservir un marché de niche et pour lequel il existe peu d'incitatifs en faveur d'un déploiement ailleurs? Cette question est indépendante de la capacité de contrôle ou d'influence d'une agence publique au Canada. Conséquemment, cette mesure d'adaptation est exclue de l'analyse.

4.5. La minimisation du dégagement sous quille

Les variations dans la position verticale des navires en lien avec la variation des niveaux d'eau affectent les navires différemment selon leur taille et leur tirant d'eau. Une solution consiste à améliorer la capacité de surveillance et de prédiction des niveaux d'eau afin d'accroître les connaissances bathymétriques des eaux peu profondes et de permettre l'optimisation de l'usage des eaux navigables. Cette mesure assure une plus grande efficacité en termes de capacité de chargement des navires qui reflète les conditions réelles des niveaux d'eau.

Le système Saint-Laurent dispose déjà d'un réseau d'informations digitales de l'ensemble du fleuve (cartes numériques, système acoustique, cartes digitales, transfert de données en temps réel sur le profil des vagues, les courants marins, la sédimentation, etc.). Dans un contexte de basses eaux, il est possible d'envisager une minimisation du dégagement sous quille par le développement de systèmes d'information géographique pour accroître les capacités de navigation. Le principal problème pour les opérateurs consiste à améliorer les modèles de prévision des niveaux d'eau au-delà de quelques heures.

5. ANALYSE COMPARATIVE DES MESURES D'ADAPTATION

L'analyse des principales réponses envisagées par l'industrie maritime et portuaire à la fluctuation des niveaux d'eau révèle que les principales mesures d'adaptation se limitent à quatre actions: 1) le dragage; 2) la construction d'ouvrages d'art; 3) le transfert partiel des activités portuaires; et 4) la minimisation du dégagement sous quille des navires.

Le Saint-Laurent affiche une géomorphologie complexe. Bien que le chenal navigable offre une colonne d'eau de 11,3 m, le profil hydrographique du Saint-Laurent démontre une grande variété de profondeurs avec seulement certains segments de hauts-fonds de 11,3 m. Les coûts des activités de dragage varient en fonction des types de sol, du volume de sédiments dragués, de la turbulence de l'eau et même de l'intensité du trafic maritime.

Historiquement, l'administration portuaire de Montréal a très bien su gérer les activités de dragage. À l'instar d'autres ports du système Saint-Laurent, l'administration portuaire a créé des réserves foncières sous la forme de compensation environnementale. Les mesures de compensation visent à atténuer les impacts environnementaux négatifs du dragage par le rétablissement d'un site ou la construction d'un milieu d'une qualité environnementale similaire ou meilleure que la zone géographique touchée par le projet de dragage. L'administration portuaire a entrepris d'accroître le potentiel écologique

d'une partie des Îles de Boucherville qui ne peuvent être utilisées à des fins de développement portuaire. L'administration portuaire a prolongé l'étendue des milieux humides et augmenté la diversité écologique de certaines surfaces.

La construction d'ouvrages d'art est très coûteuse et n'est pas sans controverses. Les ouvrages artificiels construits du moins partiellement pour améliorer la navigation exercent très souvent un impact sur les écosystèmes littoraux. Le processus de sédimentation s'accroît en amont des constructions destinées à contenir l'eau (digues, écluses, barrages) tandis que le processus d'érosion s'accroît en aval. Deuxièmement, les collectivités locales exigent de plus en plus une amélioration de la protection et des conditions d'utilisation des rives. La construction d'ouvrages d'art peut être contestée par les communautés locales. La capacité des ouvrages d'art à répondre adéquatement à la fluctuation des niveaux d'eau est difficile à évaluer en raison de l'absence de modèle sur les relations entre les investissements dans les ouvrages d'art, la fluctuation des niveaux d'eau et la navigation commerciale.

Les conséquences d'un transfert des activités portuaires seraient très coûteuses et quasi impraticables. Le choix d'un site alternatif pour la manutention de conteneurs serait très difficile considérant les dimensions d'un terminal à conteneurs. Tout transfert vers l'aval du Saint-Laurent sera nécessairement affecté par une forte dépendance par rapport au marché montréalais et est-ontarien ce qui augmentera les coûts de transport. Par ailleurs, il n'existe pas de sites alternatifs ailleurs au Québec qui disposent d'un service ferroviaire en mesure de desservir le Mid-Ouest des États-Unis.

L'utilisation des technologies de l'information est inévitable pour maintenir la compétitivité de la navigation maritime commerciale et répondre aux défis des changements climatiques.

Les données en temps réel sur le niveau d'eau, les connaissances exactes de la bathymétrie et des conditions de navigation sur le chenal s'améliorent. Sur le plan positif, plusieurs facteurs militent en faveur de l'utilisation de ces systèmes d'information. Le marché de l'informatique est en hausse. Il existe également une croissance de l'innovation dans ce domaine. L'utilisation des technologies de l'information et des communications est un segment en plein essor. De façon davantage marquée, les coûts d'amélioration d'outils numériques, informatiques et de gestion de métadonnées demeurent modestes en comparaison aux autres mesures d'adaptation. Cette mesure pourrait permettre un chargement optimal des navires en ajoutant des conteneurs. Mais les marges bénéficiaires seraient modestes. Quelques centimètres au mieux qui ne pourraient compenser les périodes prévues de bas niveaux d'eau.

L'analyse précédente permet d'identifier les différentes facettes des mesures d'adaptation de l'industrie maritime et portuaire à la fluctuation des niveaux d'eau en général et sur le système Saint-Laurent en particulier. La démarche subséquente consiste à intégrer ces résultats au sein d'une analyse multicritères permettant d'évaluer

la validité des termes de références et les tendances les plus récentes dans le cadre des prévisions développées par Ouranos sur les baisses de niveaux d'eau.

La Méthode TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) consiste à classer par ordre de choix les mesures d'adaptation sur la base d'un ensemble de critères. L'objectif consiste à choisir une solution qui se rapproche le plus de la solution idéale (meilleure sur tous les critères) et de s'éloigner le plus possible de la moins bonne solution (pire sur tous les critères). La méthode comporte six étapes (Hwang et Yoon, 1981; Yoon, 1987; Hwang *et al*, 1993; Yoon et Hwang, 1995).

Étape 1: Normaliser les performances

$$E' = \left[e'_{ij} = \frac{g_j(a_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m [g_j(a_i)]^2}} \right]; i = 1, 2, \dots, m; \text{ et } j = 1, 2, \dots, n$$

Étape 2: Calculer le produit des performances normalisées par les coefficients d'importance relative des attributs

$$e''_{ij} = \pi_j \cdot e'_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, m; \text{ et } j = 1, 2, \dots, n$$

Étape 3: Déterminer les profils idéal (a*) et anti-idéal (a*)

$$a^* = \left\{ \underset{i}{\text{Max}} e''_{ij}, i = 1, \dots, m; \text{ et } j = 1, \dots, n \right\}; e_j^* = \text{Max}_i \{ e''_{ij} \}$$

$$a^* = \{ e_j^*, j = 1, 2, \dots, n \} = \{ e_1^*, e_2^*, \dots, e_n^* \}$$

$$a_* = \left\{ \underset{i}{\text{Min}} e''_{ij}, i = 1, \dots, m; \text{ et } j = 1, \dots, n \right\}; e_{j*} = \text{Min}_i \{ e''_{ij} \}$$

$$a_* = \{ e_{j*}, j = 1, 2, \dots, n \} = \{ e_{1*}, e_{2*}, \dots, e_{n*} \}$$

Étape 4: Calculer la distance euclidienne par rapport au profil idéal (a^*) et anti-idéal (a^*)

$$D_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (e_{ij}^n - e_j^*)^2}, \quad i = 1, 2, \dots, m$$
$$D_{i^*} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (e_{ij}^n - e_{j^*})^2}, \quad i = 1, 2, \dots, m$$

Étape 5: Calculer un coefficient de mesure de rapprochement au profil idéal

$$C_i^* = \frac{D_{i^*}}{D_i^* + D_{i^*}}, \quad i = 1, 2, \dots, m$$

avec, $0 \leq C_i^* \leq 1$

Étape 6: Ranger les actions en fonction des valeurs décroissantes de C_i^*

Conformément à la procédure, l'application de la méthode TOPSIS aux mesures d'adaptation du transport maritime et portuaire à la baisse des niveaux d'eau a requis trois démarches préalables.

Premièrement, un classement est déterminé en fonction de quatre critères.

- La capacité d'une mesure d'adaptation à répondre aux contraintes de baisses de niveaux d'eau sous le zéro des cartes pour de longues périodes consécutives.
- Les coûts nécessaires à la mise en place d'une mesure d'adaptation à la baisse des niveaux d'eau.
- Les externalités sociales et environnementales négatives liées à la mise en œuvre d'une mesure d'adaptation aux changements climatiques.
- La propriété d'une mesure d'adaptation de maintenir la compétitivité de la navigation maritime et du système portuaire dans un contexte de baisse des niveaux d'eau.

Deuxièmement, il s'agit d'établir une échelle de mesure unique des niveaux à attribuer à chaque critère en définissant des valeurs numériques dans un ordre croissant ainsi que la signification linguistique de chaque niveau (Tableau 11). Plus le critère est positif, plus le résultat est favorable.

Tableau 11. Échelle de mesure des valeurs des critères

Valeur numérique	Valeur linguistique
1	Très insatisfaisant
2	Insatisfaisant
3	Significativement sous la moyenne
4	Sous la moyenne
5	Moyenne
6	Au-dessus de la moyenne
7	Significativement au-dessus de la moyenne
8	Efficace
9	Très efficace
10	Extrêmement efficace

La troisième étape consiste à construire une matrice des données (mesure d'adaptation x critères) en attribuant à chaque mesure d'adaptation le niveau de chacun des critères en se basant sur l'échelle de mesures.

Le classement en ordre décroissant des quatre mesures d'adaptation sur la base des résultats de l'analyse TOPSIS est présenté au tableau 12. La minimisation du dégagement sous quille représente la solution idéale avec une note de 59%. Le dragage est la seconde mesure d'adaptation alternative avec un pointage de 46%. Le transfert des activités portuaires et la construction d'ouvrage d'art correspondent aux moins bonnes alternatives avec des résultats de 35% et 31% respectivement.

Tableau 12. Classement des mesures d'adaptation

	Dragage	Ouvrages d'art	Dégagement sous quille	Transfert des activités portuaires
Capacité	9	8	1	8
Coût	4	3	9	1
Externalités sociales et environnementales	5	4	10	2
Compétitivité	8	5	2	7
Résultat TOPSIS	.46	.31	.59	.35

L'application de la méthode TOPSIS a permis de sélectionner le programme de minimisation du dégagement sous quille et le dragage en tant que meilleures mesures d'adaptation de l'industrie maritime et portuaire à Montréal aux défis de la baisse des niveaux d'eau sur le système Saint-Laurent.

Suite aux entrevues réalisées auprès d'intervenants du milieu académique, gouvernemental et industriel, au Canada et à l'international, plusieurs constats s'imposent. Premièrement, la minimisation du dégagement sous quille et le dragage proviennent de la volonté d'identifier des alternatives à la construction d'ouvrages d'art et au transfert des activités portuaires considérées plus désavantageuses sur le plan des impacts qui en résultent sur l'économie, la société et l'environnement. Les innovations à grande échelle sont possibles dans le cadre de la stratégie maritime du gouvernement du Québec. Mais le choix de mesures d'adaptation à la baisse des niveaux d'eau dans le système Saint-Laurent est confronté à d'importants défis financiers. Les plans d'austérité financière au Canada et au Québec ralentissent l'avancée de grands travaux publics.

L'analyse prolonge l'examen du contexte économique du transport maritime au port de Montréal et intègre une étude comparative des mesures d'adaptation à la baisse des niveaux d'eau sur la base de critères de capacité, de coûts, d'impacts environnementaux et sociaux et de compétitivité. Le choix de programmes de minimisation du dégagement sous quille et de dragage afin de répondre à une baisse des niveaux d'eau s'inscrit dans un continuum entre recherche fondamentale et empirique. La poursuite de l'étude consiste à entreprendre une estimation des coûts et des avantages associés aux deux mesures d'adaptation retenues.

6. ANALYSE COÛTS-AVANTAGES

L'application de l'analyse coûts-avantages se concentre sur le dragage et le programme de minimisation du dégagement sous quille en tant que meilleures mesures d'adaptation de l'industrie maritime et portuaire à Montréal aux défis de la baisse des niveaux d'eau sur le Saint-Laurent. Les analyses furent effectuées en collaboration avec Olivier Leblanc, Paul Lanoix et Justin Leroux, de l'École des Hautes Études Commerciales.

6.1. Estimation des coûts

Dans l'analyse coûts-avantages des activités de dragage, les coûts incluent les coûts du dragage et les coûts environnementaux. Les coûts environnementaux incluent la détérioration de la qualité de l'eau, les impacts négatifs sur la biodiversité aquatique, la dégradation de l'environnement sonore, la détérioration de la qualité de l'air et la contamination des sédiments.

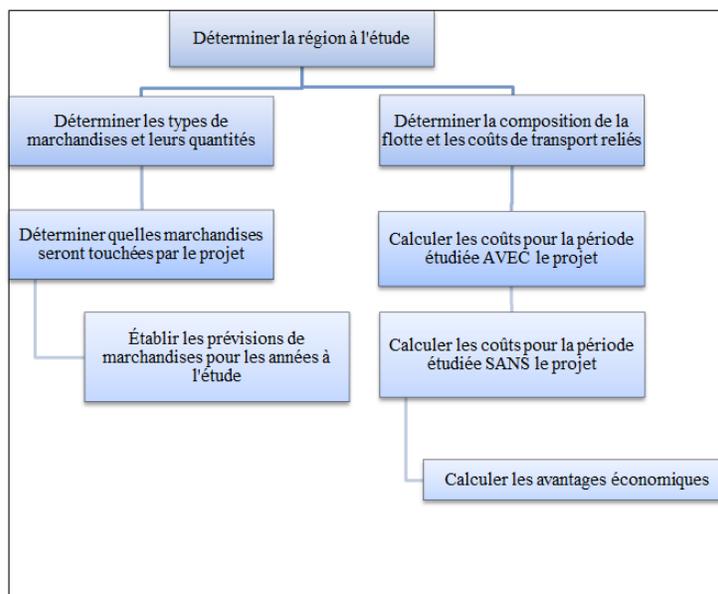
L'attribution d'une valeur monétaire à des impacts environnementaux demeure complexe. Sur le plan de la qualité de l'eau, les opérations de dragage ont principalement un effet sur la remise en suspension de sédiments, sur l'augmentation de la turbidité et sur la remise en circulation de polluants dans la voie navigable. Dans les études des Consultants Jacques Bérubé inc. (1994) et de Rieussec (2008), l'impact sur la qualité de l'eau est considéré potentiellement problématique. Il est suggéré de normaliser cet impact à zéro puisque la dégradation de la qualité de l'eau a un effet sur les habitats de la faune aquatique. L'objectif consiste à éviter le double comptage.

Plusieurs auteurs se sont penchés sur la monétisation des impacts environnementaux du dragage sur la biodiversité marine. Beaumont et al (2008) estiment la valeur monétaire d'un hectare d'écosystème affecté à 252 \$ US. Costanza et al. (1997) quant à eux attribuent une valeur de 8 498 \$ US à un hectare de biodiversité disparue par année. Au Canada, le ministère des Pêches et Océans oblige les promoteurs de projets qui détruisent des habitats marins à créer des habitats de compensation (Alexander et al., 2010). Des coûts doivent être calculés lorsque le dragage a un effet significatif sur les habitats de poissons. C'est le principe d'aucune perte d'habitats nets. Dans une étude sur les habitats de compensation, Harper et Quigley (2005) estiment que les coûts moyens de compensation environnementale des habitats de poissons sont de 85 \$/m². Le Port de Montréal et le ministère des Pêches et Océans ont conclu une entente en ce qui a trait aux mesures compensatoires de l'environnement. Entre 2008 et 2013, le Port de Montréal a transformé 277 000 m² en habitats de poissons à partir de terrains qu'il possédait déjà aux îles de Boucherville. Ce projet, au coût de 650 000 \$, est une banque d'habitats de compensation. Ce montant correspond à des coûts de 2,35 \$/m², ce qui est cohérent avec les valeurs utilisées par Harper et Quigley (2005) et plus élevé que les estimations de Costanza, et al. (1997). La valeur monétaire des coûts associés au bruit est considérée minimale et peu importante. Les opérations de dragage ont peu d'impact sur la qualité de l'air. Les émissions de CO₂ des activités de dragage ne représenteraient que 0.0005% des émissions totales émises par le transport maritime. L'impact des activités de dragage sur la faune aviaire est considéré comme marginal. Le coût de dragage des sédiments non-contaminés est estimé à 75/m³ \$. Pour les sédiments contaminés, le coût correspond à 117/m³ \$. Cela est conséquent avec l'analyse de D'Arcy et al. (2005). Il importe de souligner que selon le ministère des Pêches et des Océans, les sédiments contaminés représentent moins de 4% du volume total des sédiments dragués dans le chenal navigable du Saint-Laurent.

6.2. Estimation des avantages

Dans l'analyse coûts-avantages des activités de dragage, les avantages incluent la diminution des coûts de transport, le maintien de l'activité économique, l'augmentation de la sécurité et l'utilisation secondaire des sédiments de dragage. La valeur monétaire des avantages associés aux coûts de transport sauvés est calculée en fonction de la méthode utilisée par le Corps des Ingénieurs de l'Armée des États-Unis (Figure 1). Dans la présente étude, il s'agit de déterminer la variation du coût moyen pour transporter un EVP entre la situation avec mesure d'adaptation et la situation sans mesure d'adaptation.

Figure 1. Méthode de calcul des avantages d'un projet de dragage du Corps des Ingénieurs de l'Armée des États-Unis

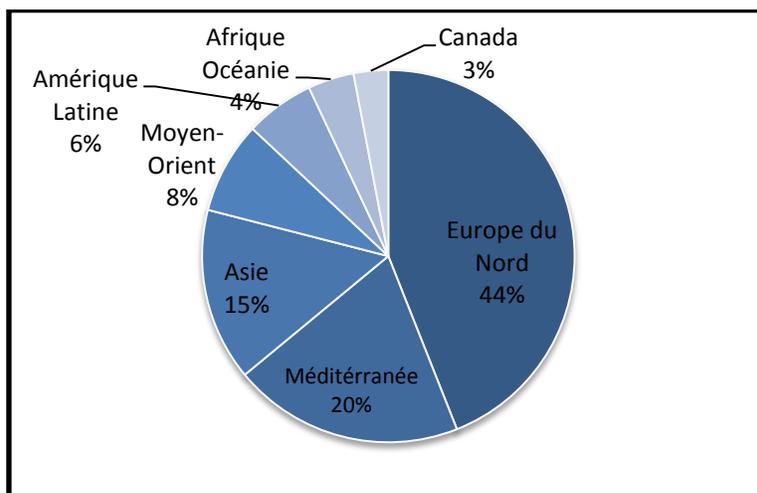


Source: USACE, 2000

La région d'étude: L'étude s'intéresse à la région de Montréal puisque les activités de dragage et le programme de minimisation du dégagement sous quille affecteront principalement cette région. En outre, le port de Montréal est en concurrence avec les ports de New York – New Jersey et celui de Hampton Roads pour les conteneurs en provenance (à destination) du Mid-Ouest des États-Unis vers (depuis) l'Europe et la Méditerranée. Ces ports sont inclus dans l'analyse puisque nous postulons qu'une part du trafic de conteneurs sera déplacée vers ces ports en fonction des scénarios climatiques de baisses des niveaux d'eau.

Les types de marchandises et leur quantité: Nous avons préalablement démontré l'importance du trafic conteneurisé au port de Montréal. Les conteneurs comptent pour 42% du volume total de chargement et déchargement au port de Montréal (voir Tableau 1). Le port de Montréal est fermement ancré dans le commerce est-ouest. La réponse économique du port de Montréal aux processus globaux fut de consolider les échanges commerciaux avec le marché européen. En outre, force est de souligner que le positionnement et la compétitivité du port de Montréal s'inscrivent de plus en plus dans le contexte d'activités de transbordement, notamment en Méditerranée, pour le cargo en provenance ou en direction de l'Asie et du Moyen-Orient à travers le canal de Suez, tant pour les importations que les exportations (Figure 2).

Figure 2. Origine du fret conteneurisé au port de Montréal, 2014



Source: Port de Montréal

Les marchandises touchées par le projet: Nous avons démontré que la variation des niveaux d'eau attribuables aux changements climatiques n'affectera essentiellement que le transport des conteneurs. Nos analyses démontrent que la baisse d'un centimètre de niveau d'eau équivaut à une perte de 3,8 EVP par navire. Ce chiffre correspond le plus étroitement aux évaluations les plus conservatrices menées par D'Arcy et al (2005).

Les prévisions de marchandises pour les années à l'étude: Le trafic de conteneurs de 1,3 million EVP devrait croître de 2,4% par année pour atteindre 1,75 million EVP. Ce volume représente la capacité maximale de manutention du port de Montréal. Nous ne prenons pas en considération l'expansion du port à Contrecoeur.

La composition de la flotte et les coûts de transport: La majorité des porte-conteneurs qui naviguent sur le Saint-Laurent affichent une capacité de 2000-5000 EVP. Pour calculer les coûts de transport journalier, nous utiliserons plusieurs sources de données. Nous utilisons les coûts d'opération (sans le carburant), de dépréciation et de capital moyen rendus disponibles par les Nations Unies. La somme de ces trois éléments est de 21 789 \$ par jour (UNCTAD, 2012). Pour la consommation de carburant, nous utilisons des données provenant de Cariou et Notteboom (2013) qui évaluent la consommation journalière moyenne d'un conteneur d'une cargaison moyenne de 4 283 EVP à 84 tonnes lorsque le navire voyage à sa vitesse commerciale moyenne. Pour le prix du carburant, nous utilisons le prix mensuel moyen des 12 derniers mois de l'IFC 380 à Rotterdam, soit 428,97 \$ par tonne. Nous sommes conscients que prendre seulement une année pour établir une moyenne peut soulever certaines problématiques d'inférence sur les cinquante années du projet, c'est pourquoi nous incluons une analyse de sensibilité sur le sujet. Ces données permettent d'estimer les coûts de transport quotidien des navires qui desservent le port de Montréal à 57 822,48 \$.

Le calcul des coûts présents et futurs pour transporter un conteneur avec et sans mesure d'adaptation: Le coût moyen est établi en fonction des données suivantes:

- Le coût de transport moyen est de 57 822,48 \$ par jour.
- La quantité moyenne de conteneurs par navire est de 3 831,25 EVP.
- Une variation négative d'un centimètre de niveau d'eau entraîne une perte de 3,8 EVP par navire.

Le calcul du coût moyen est fondé sur les formules suivantes:

1. Lorsque Niveau_Eau > 0, alors il n'y a aucune variation

2. Lorsque $0 > \text{Niveau}_{\text{Eau}_t} > -\gamma \text{ cm}$, alors

$$\Delta W_t = 0$$

$$\Delta WO_t = \text{Niveau}_{\text{Eau}_t} * 3,8$$

$$CM(W)_{m,t} = \frac{\text{Coût_Moyen_Journalier}_{\$m}}{Q - \Delta W_t}$$

$$CM(WO)_{m,t} = \frac{\text{Coût_Moyen_Journalier}_{\$m}}{Q - \Delta WO_t}$$

3. Lorsque $\text{Niveau}_{\text{Eau}} < -\gamma \text{ cm}$, alors

$$\Delta W_t = (\text{Niveau}_{\text{Eau}_t} + \gamma \text{ cm}) * 3,8$$

$$\Delta WO_t = \text{Niveau}_{\text{Eau}_t} * 3,8$$

$$CM(W)_{m,t} = \frac{\text{Coût_Moyen_Journalier}_{\$m}}{Q - \Delta W_t}$$

$$CM(WO)_{m,t} = \frac{\text{Coût_Moyen_Journalier}_{\$m}}{Q - \Delta WO_t}$$

où:

Q = Quantité moyenne de conteneurs (EVP) par bateau

γ = gain en cm de la mesure d'adaptation

Δ = variation de conteneurs avec (W) ou sans (WO) projet à la période t

CM = Coût moyen de transporter un EVP par jour avec (W) ou sans projet (WO) selon qu'il soit en mer ($m = 1$) ou qu'il soit en port ($m = 2$) à la période t

Les coûts de transport sauvés doivent prendre en compte qu'une augmentation des coûts causée par une baisse de la capacité des navires pourrait impliquer une diminution des parts de marché pour certaines origines et destinations. Cette situation est particulièrement susceptible de survenir pour le trafic de conteneurs entre l'Europe et le Mid-Ouest des États-Unis. Nous émettons l'hypothèse qu'une baisse des niveaux d'eau pourrait entraîner un déplacement d'une certaine portion du marché montréalais vers New York-New Jersey et Hampton Roads. Le marché du Mid-Ouest représente 17% des conteneurs du port de Montréal. L'Europe du Nord et la Méditerranée représentent 64% des marchés à l'extérieur de l'Amérique du Nord. La part de marché du port de New York-New Jersey est de 28,6% et celle d'Hampton Roads de 26,6%. Nous estimons qu'une baisse des niveaux d'eau entraînerait un déplacement de 3,11% des conteneurs vers New York-New Jersey ($0,17 \times 0,64 \times 0,286 = 0,0311$) et un déplacement de 2,89% des conteneurs vers Hampton Roads ($0,17 \times 0,64 \times 0,266 = 0,0289$).

Les temps de transit calculés entre différentes origines et destinations, les temps moyens au port et les parts de marché sont présentés au tableau 13.

Tableau 13. Paires d'Origine/Destination et caractéristiques de modélisation

Origine/Destination	Port	Temps de transit (en jours)	Temps au port (en jours)	Part totale (%)
Europe-MTL	Rotterdam	10,77	2,45	38
Europe-MTL-Mid-Ouest	Rotterdam	10,77	2,45	2
Europe-NYNJ-Mid-Ouest	Rotterdam	11,25	1,09	2,1
Europe-HR-Mid-Ouest	Rotterdam	11,96	0,63	1,9
Méditerranée-MTL	Valence	12,25	2,45	17
Méditerranée-MTL-Mid-Ouest	Valence	12,25	2,45	1
Méditerranée-NYNJ-Mid-Ouest	Valence	12,28	1,09	1
Méditerranée-HR-Mid-Ouest	Valence	12,86	0,63	1
Asie-MTL	Singapour	34,81	2,45	15
Moyen-Orient-MTL	Jebel Ali	27,70	2,45	8
Amérique du Sud-MTL	Santos	20,12	2,45	6
Afrique-MTL	Brisbane	27,27	2,45	4
Canada-MTL	St John's	3,60	2,45	3
Total				100

Source: <https://www.searates.com/reference/portdistance>

Le calcul des coûts de transport sauvés s'effectue selon les équations suivantes:

$$\begin{aligned}
 & 1. \text{ Lorsque Niveau_Eau} > 0, \quad \text{alors} \\
 & \quad \text{Avantages} = 0 \\
 & \\
 & 2. \text{ Lorsque } 0 > \text{ Niveau_Eau} \text{ et } > -\gamma \text{ cm, alors} \\
 & \quad \text{Avantages} = \\
 & \quad \sum_{T=1}^{2400} \sum_{R=1}^{13} \sum_{M=1}^2 [(CM(WO)_{m,t} - CM(W)_{m,t}) * \theta_r * NbJ_{r,m} * Pr\acute{e}vision_t * (Q)] \\
 & \\
 & 3. \text{ Lorsque Niveau_Eau} < -\gamma \text{ cm, alors} \\
 & \quad \text{Avantages} = \\
 & \quad \sum_{t=1}^{2400} \sum_{r=1}^{13} \sum_{m=1}^2 [(CM(WO)_{m,t} - CM(W)_{m,t}) * \theta_r * NbJ_{r,m} * Pr\acute{e}vision_t * (Q - \Delta W_t)]
 \end{aligned}$$

où

Nbj = Nombre de jours en mer ($m = 1$) ou en port ($m = 2$) selon la région d'origine et la destination (r)

$Pr\acute{e}vision$ = prévision du nombre de bateaux selon la période t

θ_r = Part de marché

À l'évidence, un déplacement d'une portion des conteneurs du port de Montréal vers des ports de la côte est des États-Unis en raison d'une baisse des niveaux d'eau pourrait entraîner une détérioration de la qualité de l'air et une augmentation des émissions de GES. Cette augmentation relative des GES correspond à l'augmentation de la distance parcourue par un navire pour atteindre ces autres ports (NY-NJ et HR). Cette distance supplémentaire parcourue entraîne nécessairement une augmentation de la consommation de carburant. La consommation moyenne de carburant d'un navire est estimée à 84 tonnes/jour à une vitesse moyenne de 19,5 nœuds/heure. Les données sont résumées au tableau 14.

Tableau 14. Distance et consommation supplémentaire de carburant

Origine/Destination	Différence (km)	Consommation supplémentaire (tonnes)	Part de marché (%)
Europe – NYNJ – Mid-Ouest	257,98	25	2,1
Europe – HR – Mid-Ouest	638,10	61,84	1,9
Méditerranée – NYNJ – Mid-Ouest	14,49	1,4	1
Méditerranée – HR – Mid-Ouest	327,12	31,70	1

Source: <https://www.searates.com/reference/portdistance/>

Les quantités de GES émises par tonne de carburant sont présentées au tableau 15.

Tableau 15. Facteur d'émission par tonnes de carburant (kg/tonne)

CO ₂	3 190
CO	7,4
HC	0,4
NO _x	85
SO _x	10
PM	1,2
CH ₄	0,3

Source: International Maritime Organization, 2009

Les valeurs associées aux émissions de gaz à effet de serre en kg équivalent de CO₂ sont présentées au tableau 16.

Tableau 16. Coût par tonne d'émissions (\$2015)

CO ₂	41,11
CO	1863,43
HC	6779,83
NO _x	8647,92
SO _x	3683,80
PM	5128,23
CH ₄	1127

Source: Ferland, 2006; Song, 2014

Le calcul des avantages associés à la diminution relative de GES est effectué selon les équations suivantes:

$$\begin{aligned}
 & 1. \text{ Lorsque Niveau}_{\text{Eau}} > 0, \text{ alors Avantages} = 0 \\
 & 2. \text{ Lorsque } 0 > \text{ Niveau}_{\text{Eau}} > -\gamma \text{ cm, alors Avantages} = \\
 & \sum_{t=1}^{2400} \sum_{r=1}^{13} \sum_{i=1}^7 \theta_r * \text{Prévision}_t * \frac{\Delta km_{r,t}}{\text{km/h}} * \frac{\text{Tonnes de carburant}}{\text{Heures}} * \text{Facteur}_{\text{Émission}_i} \\
 & \quad * \frac{\$}{\text{kg}} \\
 & 3. \text{ Lorsque Niveau}_{\text{Eau}} < -\gamma \text{ cm, alors Avantages} = 0
 \end{aligned}$$

où

γ = Gain en cm de niveau d'eau de la mesure d'adaptation
 et la destination (r)

Prévision = prévision du nombre de bateaux selon la période t

θ_r = Part de marché

Le tableau 17 résume les variables utilisées pour les différentes équations.

Tableau 17. Variables des équations

Variables	Description
<i>Niveau_Eau</i>	Variation de niveaux d'eau calculée par le Consortium Ouranos. Un niveau d'eau pour chacun des quarts de mois t.
γ	Gain en centimètre de la mesure d'adaptation. 20 centimètres pour la minimisation du dégagement sous quille; 40 centimètres pour le dragage; 60 centimètres pour la combinaison des deux mesures.
ΔW et ΔWO	Nombre de conteneurs perdus en raison d'une variation négative de niveaux d'eau dans la situation avec Projet (W) et dans la situation Sans Projet (WO) à chacune des périodes t en utilisant une perte de 3,8 EVP/cm.
<i>Coût_Moyen_Journalier</i> \$	Coût moyen pour opérer un navire type (entre 2000 et 6000 EVP). Addition de 21 789 \$ et de la consommation de carburant avec un coût moyen de 428,97 \$/tonne. Ce qui donne un total de 57 822,48 \$.
Q	Quantité moyenne de conteneurs dans le navire type est de 3 831,25 EVP.
$CM(W)$ et $CM(WO)$	Coût moyen journalier pour transporter 1 EVP pendant une journée.
θ	Part de marché (ratio) des différentes régions du monde dans le commerce des conteneurs qui transitent par le Port de Montréal (Figure 2 et Tableau 13).
<i>NbJ</i>	Temps, en jours, pour parcourir la distance entre les différentes régions et le Port de Montréal et temps moyen passés dans les différents ports (Tableau 13).
<i>Prévision</i>	Prévision du nombre de navires qui transitent par le port pour chacune des périodes t.
Δkm	Distance supplémentaire à parcourir pour les navires lorsqu'une variation négative des niveaux d'eau entraîne un déplacement de conteneurs vers des ports concurrents (Tableau 14).
<i>Facteur_émission</i>	Facteur d'émissions polluantes de la consommation de carburant de type bunker (Tableau 15).
$\frac{\$}{kg}$	Coût social par tonne d'émissions polluantes (Tableau 16).

6.3. Analyse de sensibilité

Les analyses de sensibilité sont calculées en fonction des éléments suivants:

1. Diminution du taux d'actualisation à 2%
2. Augmentation du taux d'actualisation à 6%
3. Augmentation du nombre d'EVP/cm à 6,0 EVP/cm
4. Variation de la profondeur draguée à 20 cm
5. Variation de la profondeur draguée à 60 cm
6. Doublement des coûts de construction ou de mise en œuvre de la mesure d'adaptation (dragage / programme de minimisation du dégagement sous quille)
7. Doublement des coûts environnementaux

6.4. Les coûts-avantages du dragage

6.4.1. Les coûts

Cette mesure d'adaptation consiste à augmenter la profondeur navigable du chenal de 40 centimètres. La quantité de sédiments à draguer est estimée à 105 247 m³. Le coût pour draguer 95% de ce volume est évalué de 7 498 848,75 \$. Nous estimons que 5% de cette quantité se compose de sédiments contaminés. Le traitement de ces sédiments augmente les coûts de 615 294,95 \$.

6.4.2. Les avantages

L'analyse est fondée sur l'utilisation des coûts de transport sauvés pour évaluer les avantages associés aux activités de dragage. L'objectif consiste à comparer les coûts de transport unitaire d'une marchandise dans la situation sans projet avec la situation avec projet. C'est la méthodologie utilisée par le corps des ingénieurs de l'Armée des États-Unis (USACE) pour l'évaluation des projets de dragage. Dans la présente étude, il s'agit de déterminer la variation du coût moyen pour transporter un conteneur EVP entre la situation avec projet et la situation sans projet. Les avantages concernent: 1) la diminution du coût de transport et 2) la diminution des émissions de GES en raison de la diminution de la distance à parcourir des navires. Nous rappelons qu'il s'agit de calculer la diminution du coût moyen unitaire pour transporter un conteneur pour ensuite calculer les coûts totaux de transport sauvés par la mesure d'adaptation. Le deuxième avantage est le résultat de la diminution relative des émissions de GES en raison de la diminution de la distance à parcourir des navires. Cette baisse de la distance est le résultat du maintien de certaines parts de marchés en raison d'un niveau d'eau compétitif. Les coûts et avantages actualisés pour les différents scénarios climatiques sont présentés aux tableaux 18 à 20.

Les résultats pour le scénario climatique de référence sont de 25 880 475,76 \$ en coûts de transport sauvés et 2 229 939,06 \$ en avantages environnementaux. Dans le cas du scénario climatique What-if #1, les avantages sont respectivement 44 125 914,95 \$ et 1 638 362,88 \$. Dans le cas du scénario climatique What-if #2, les coûts de transport

sauvés représentent 32 757 917,09 \$ et les avantages environnementaux sont estimés à 2 146 077,39 \$.

Les avantages environnementaux sont plus faibles dans les scénarios What-if #1 et What-if #2 que dans le scénario de référence. Dans le scénario de référence, la distribution des coûts et des avantages est concentrée dans les premières années du projet. La courbe de la valeur actuelle nette (VAN) devient positive dès 2019, soit seulement quatre années après le début du projet.

Tableau 18. Avantages et coûts actualisés du dragage (REF)

<u>Avantages actualisés</u>	
Coûts de transport sauvés	25 880 475,76 \$
Avantages environnementaux	2 229 939,06 \$
<u>Coûts actualisés</u>	
Coût de construction	7 498 848,75 \$
Coût de décontamination	615 694,95 \$
Compensation d'habitat	650 000,00 \$
<u>Valeur actuelle nette</u>	19 345 871,12 \$

Tableau 19. Avantages et coûts actualisés du dragage (WI1)

<u>Avantages actualisés</u>	
Coûts de transport sauvés	44 125 914,95 \$
Avantages environnementaux	1 638 362,88 \$
<u>Coûts actualisés</u>	
Coût de construction	7 498 848,75 \$
Coût de décontamination	615 694,95 \$
Compensation d'habitat	650 000,00 \$
<u>Valeur actuelle nette</u>	36 999 734,13 \$

Tableau 20. Avantages et coûts actualisés du dragage (WI2)

<u>Avantages actualisés</u>	
Coûts de transport sauvés	32 757 917,09 \$
Avantages environnementaux	2 146 077,39 \$
<u>Coûts actualisés</u>	
Coût de construction	7 498 848,75 \$
Coût de décontamination	615 694,95 \$
Compensation d'habitat	650 000,00 \$
<u>Valeur actuelle nette</u>	26 139 450,78 \$

6.4.3. Les analyses de sensibilité

Plusieurs analyses de sensibilité ont été effectuées afin d'évaluer la robustesse des résultats de l'analyse.

Le tableau 21 présente les résultats d'une analyse de sensibilité fondée sur une réduction du seuil de dragage à 20 cm plutôt que 40 cm. Le dragage à 20 centimètres a plus d'impact dans le cas du scénario climatique What-if #1 dans lequel la valeur actuelle nette (VAN) est réduite d'un peu plus de 14 M \$. De manière générale, la réduction du seuil de dragage à 20 centimètres est rentable dans tous les scénarios, mais représente une solution moins avantageuse que le dragage à 40 centimètres.

Tableau 21. Dragage à 20 cm

	Référence	WI1	WI2
<i>Avantages actualisés</i>			
Coûts de transport sauvés	19 381 011,26 \$	26 588 699,61 \$	22 056 172,61 \$
Avantages environnementaux	1 410 746,47 \$	1 032 747,31 \$	1 164 778,65 \$
<i>Coûts actualisés</i>			
Coûts de construction	3 544 475,56 \$	3 544 475,56 \$	3 544 475,56 \$
Coûts de décontamination	291 020,10 \$	291 020,10 \$	291 020,10 \$
Compensation d'habitat	650 000,00 \$	650 000,00 \$	650 000,00 \$
<i>Valeur actuelle nette</i>	16 306 262,07 \$	23 135 951,26 \$	18 735 455,60 \$

La deuxième analyse de sensibilité consiste à augmenter la profondeur à draguer de 20 cm pour atteindre 60 cm. Cette analyse révèle que la valeur actuelle nette (VAN) du scénario de Référence est réduite tout en augmentant les avantages en comparaison à un dragage de 40 cm (Tableau 22). À l'inverse, les valeurs actuelles nettes (VAN) du dragage à 60 cm augmentent pour les scénarios climatiques What-if #1 et What-if #2.

Tableau 22. Dragage à 60 cm

	Référence	WI1	WI2
<i>Avantages actualisés</i>			
Coûts de transport sauvés	26 494 798,19 \$	56 319 730,80 \$	35 596 831,80 \$
Avantages environnementaux	2 457 082,41 \$	2 045 254,14 \$	2 649 931,69 \$
<i>Coûts actualisés</i>			
Coûts de construction	11 863 095,47 \$	11 863 095,47 \$	11 863 095,47 \$
Coûts de décontamination	974 022,58 \$	974 022,58 \$	974 022,58 \$
Compensation d'habitat	650 000,00 \$	650 000,00 \$	650 000,00 \$
<i>Valeur actuelle nette</i>	15 464 762,56 \$	44 877 866,89 \$	24 759 645,44 \$

Le tableau 23 présente l'analyse de sensibilité fondée sur un taux d'actualisation à 2%. L'impact le plus considérable concerne le scénario climatique What-if #1. La valeur actuelle nette (VAN) s'accroît de 36 M \$ à plus de 71 M \$.

Tableau 23. Taux d'actualisation de 2% du dragage

	Référence	WI1	WI2
<i>Avantages actualisés</i>			
Coûts de transport sauvés	30 829 075,90 \$	77 316 083,32 \$	41 600 413,03 \$
Avantages environnementaux	2 739 009,74 \$	3 028 369,73 \$	2 699 374,92 \$
<i>Coûts actualisés</i>			
Coûts de construction	7 498 848,75 \$	7 498 848,75 \$	7 498 848,75 \$
Coûts de décontamination	615 694,95 \$	615 694,95 \$	615 694,95 \$
Compensation d'habitat	650 000,00 \$	650 000,00 \$	650 000,00 \$
<i>Valeur actuelle nette</i>	24 803 541,94 \$	71 579 909,35 \$	35 535 244,25 \$

Lorsque le taux d'actualisation est fixé à 6%, les avantages du dragage sont fortement réduits dans le scénario What-if #1 en raison de la période temporelle où surviennent les avantages, qui est plus éloignée que les deux autres scénarios climatiques (Tableau 24).

Tableau 24. Taux d'actualisation de 6% du dragage

	Référence	WI1	WI2
<i>Avantages actualisés</i>			
Coûts de transport sauvés	22 622 885,58 \$	25 807 397,81 \$	27 652 861,19 \$
Avantages environnementaux	1 926 012,96 \$	936 878,69 \$	1 827 831,35 \$
<i>Coûts actualisés</i>			
Coûts de construction	7 498 848,75 \$	7 498 848,75 \$	7 498 848,75 \$
Coûts de décontamination	615 694,95 \$	615 694,95 \$	615 694,95 \$
Compensation d'habitat	650 000,00 \$	650 000,00 \$	650 000,00 \$
<i>Valeur actuelle nette</i>	15 784 354,84 \$	17 979 732,79 \$	20 716 148,84 \$

Une analyse de sensibilité fondée sur une augmentation du nombre d'EVP par centimètre d'eau révèle qu'il s'agit de l'un des éléments qui exercent énormément d'impact sur la valeur actuelle nette (VAN) pour tous les scénarios climatiques (Tableau 25).

Tableau 25. 6 EVP/cm en lien avec le dragage

	Référence	WI1	WI2
<i>Avantages actualisés</i>			
Coûts de transport sauvés	41 558 149,59 \$	72 265 561,74 \$	52 806 347,22 \$
Avantages environnementaux	2 229 778,20 \$	1 638 244,69 \$	2 146 077,39 \$
<i>Coûts actualisés</i>			
Coûts de construction	7 498 848,75 \$	7 498 848,75 \$	7 498 848,75 \$
Coûts de décontamination	615 694,95 \$	615 694,95 \$	615 694,95 \$
Compensation d'habitat	650 000,00 \$	650 000,00 \$	650 000,00 \$
<i>Valeur actuelle nette</i>	35 023 384,09 \$	65 139 262,72 \$	46 187 880,91 \$

Lorsque les coûts de mise en œuvre du dragage sont doublés, toutes les valeurs actuelles nettes (VAN) demeurent positives, peu importe le scénario climatique (Tableau 26).

Tableau 26. Doublement des coûts du dragage

	Référence	WI1	WI2
<i>Avantages actualisés</i>			
Coûts de transport sauvés	25 880 475,76 \$	44 125 914,95 \$	32 757 917,09 \$
Avantages environnementaux	2 229 939,06 \$	1 638 362,88 \$	2 146 077,39 \$
<i>Coûts actualisés</i>			
Coûts de construction	14 997 697,50 \$	14 997 697,50 \$	14 997 697,50 \$
Coûts de décontamination	1 231 389,90 \$	1 231 389,90 \$	1 231 389,90 \$
Compensation d'habitat	650 000,00 \$	650 000,00 \$	650 000,00 \$
<i>Valeur actuelle nette</i>	11 231 327,42 \$	28 885 190,43 \$	18 024 907,08 \$

Le Tableau 27 démontre que les valeurs actuelles nettes (VAN) demeurent positives lorsque les coûts environnementaux, incluant les coûts de décontamination et les coûts de compensation environnementale, sont doublés.

Tableau 27. Doublement des coûts environnementaux du dragage

	Référence	WI1	WI2
<i>Avantages actualisés</i>			
Coûts de transport sauvés	25 880 475,76 \$	44 125 914,95 \$	32 757 917,09 \$
Avantages environnementaux	2 229 939,06 \$	1 638 362,88 \$	2 146 077,39 \$
<i>Coûts actualisés</i>			
Coûts de construction	7 498 848,75 \$	7 498 848,75 \$	7 498 848,75 \$
Coûts de décontamination	1 231 389,90 \$	1 231 389,90 \$	1 231 389,90 \$
Compensation d'habitat	1 300 000,00 \$	1 300 000,00 \$	1 300 000,00 \$
<i>Valeur actuelle nette</i>	18 080 176,17 \$	35 734 039,18 \$	24 873 755,83 \$

Des centaines de millions de mètres cubes de sédiments marins sont dragués chaque année dans le monde pour maintenir ou faciliter les systèmes de voies navigables, pour assurer la sécurité de la navigation maritime, pour construire des infrastructures maritimes et pour la protection des rives.

Nos enquêtes révèlent que le dragage peut impliquer 1) le rejet des sédiments dans les eaux courantes ou en eau libre; 2) le dépôt des sédiments dans des sites d'enfouissement en milieux marins ou terrestres approuvés par les administrations publiques; 3) la valorisation des sédiments par l'utilisation productive du matériel pour la restauration des habitats, l'ensablement de plages, la stabilisation des littoraux, la construction de parcs, la construction résidentielle, industrielle et d'infrastructures, le remplissage de mines abandonnées ou à des fins agricoles, horticoles ou forestières; et 4) l'utilisation de méthodes de dragage écologique. Nonobstant la méthode utilisée, les activités de dragage sont la source de multiples incidences sur le milieu physique dont il est impératif de tenir compte.

Par ailleurs, il n'y a pas de relation simple entre les coûts reliés aux activités de dragage et la profondeur de navigation. Les coûts des activités de dragage varient en fonction des types de sol, du volume de sédiments dragués, de la turbulence de l'eau et même de l'intensité du trafic maritime. Dans le but d'évaluer l'impact économique des activités de dragage au chenal navigable du Saint-Laurent dans le contexte de différents scénarios de changements climatiques, nous avons entrepris une analyse coûts-avantages. Le modèle incorpore, d'une part, les coûts d'opération et environnementaux associés aux activités de dragage, et d'autre part, les avantages reliés à la diminution relative des coûts de transport et ceux provenant d'une réduction relative des émissions de gaz à effet de serre. Les résultats révèlent que les avantages sont nettement supérieurs aux coûts engendrés par les opérations de dragage sous tous les scénarios de changement climatique. Une analyse de sensibilité des résultats obtenus confirme la robustesse de l'étude concernant la rentabilité économique des activités de dragage.

6.5. Les coûts-avantages de la minimisation du dégagement sous quille

6.5.1. Les coûts

Les coûts associés à la minimisation du dégagement sous quille sont principalement des coûts de mise en place et d'entretien de la technologie. Les coûts de capitalisation de cette technologie sont évalués à 1 000 000 \$ et les coûts d'entretien sont estimés à 100 000 \$ par année. Les coûts d'entretien diminuent progressivement d'année en année en raison du taux d'actualisation. Ceci représente des coûts actualisés de 3 248 214,86 \$. Les coûts ne dépendent pas des scénarios climatiques et sont donc égaux pour chacun des scénarios

6.5.2. Les avantages

Les avantages associés à la minimisation du dégagement sous quille concernent: 1) la diminution du coût de transport et 2) la diminution des émissions de GES. Les

avantages et coûts actualisés pour les différents scénarios climatiques sont présentés aux tableaux 28 à 30.

Les coûts de transport sauvés actualisés pour le scénario climatique de référence représentent 19 381 011,26 \$ et les avantages liés à la réduction des émissions de GES représentent 1 410 848,25 \$. Dans le cas du scénario climatique What-if #1, les avantages sont respectivement 26 588 699,61 \$ et 1 032 821,82 \$. Pour le scénario What-if #2, les résultats sont 22 056 172,61 \$ et 1 163 593,21 \$ respectivement.

Tableau 28. Avantages et coûts actualisés de la minimisation du dégagement sous quille (REF)

<u>Avantages actualisés</u>	
Coûts de transport sauvés	19 381 011,26 \$
Avantages environnementaux	1 410 848,25 \$
<u>Coûts actualisés</u>	
Coût de construction	1 000 000,00 \$
Coûts d'entretien	2 248 214,86 \$
<u>Valeur actuelle nette</u>	17 543 644,64 \$

Tableau 29. Avantages et coûts actualisés de la minimisation du dégagement sous quille (WI1)

<u>Avantages actualisés</u>	
Coûts de transport sauvés	26 588 699,61 \$
Avantages environnementaux	1 032 821,82 \$
<u>Coûts actualisés</u>	
Coût de construction	1 000 000,00 \$
Coûts d'entretien	2 248 214,86 \$
<u>Valeur actuelle nette</u>	24 373 306,56 \$

Tableau 30. Avantages et coûts actualisés de la minimisation du dégagement sous quille (WI2)

<u>Avantages actualisés</u>	
Coûts de transport sauvés	22 056 172,61 \$
Avantages environnementaux	1 163 593,21 \$
<u>Coûts actualisés</u>	
Coût de construction	1 000 000,00 \$
Coûts d'entretien	2 248 214,86 \$
<u>Valeur actuelle nette</u>	19 971 550,96 \$

6.5.3. Les analyses de sensibilité

Plusieurs analyses de sensibilité ont été effectuées afin d'évaluer la robustesse des résultats pour la minimisation du dégagement sous quille.

Le tableau 31 présente les coûts et les avantages lorsque le taux d'actualisation est de 2%. Ce changement exerce essentiellement un impact lorsque la mesure d'adaptation concerne le scénario climatique What-if #1 en raison de la distribution temporelle plus éloignée des avantages.

Tableau 31. Taux d'actualisation de 2% de la minimisation du dégagement sous quille

	Référence	WI1	WI2
<i>Avantages actualisés</i>			
Coûts de transport sauvés	23 312 885,03 \$	47 038 494,02 \$	27 897 832,60 \$
Avantages environnementaux	1 760 548,67 \$	1 927 638,52 \$	1 470 286,05 \$
<i>Coûts actualisés</i>			
Coût de construction	1 000 000,00 \$	1 000 000,00 \$	1 000 000,00 \$
Coût d'entretien	3 242 355,40 \$	3 242 355,40 \$	3 242 355,40 \$
<i>Valeur actuelle nette</i>	20 831 078,29 \$	44 723 777,14 \$	25 125 763,24 \$

Dans le cas d'une augmentation du taux d'actualisation à 6%, les impacts les plus significatifs sont associés au scénario climatique What-if #1, avec une réduction importante de la valeur actuelle nette (VAN) (Tableau 32).

Tableau 32. Taux d'actualisation de 6% de la minimisation du dégagement sous quille

	Référence	WI1	WI2
<i>Avantages actualisés</i>			
Coûts de transport sauvés	16 892 536,56 \$	15 487 092,43 \$	18 678 148,22 \$
Avantages environnementaux	1 210 037,81 \$	586 882,62 \$	990 896,67 \$
<i>Coûts actualisés</i>			
Coût de construction	1 000 000,00 \$	1 000 000,00 \$	1 000 000,00 \$
Coût d'entretien	1 676 183,38 \$	1 676 183,38 \$	1 676 183,38 \$
<i>Valeur actuelle nette</i>	15 426 390,99 \$	13 397 791,67 \$	16 992 861,51 \$

Une analyse de sensibilité fondée sur une perte de 6 EVP par centimètre d'eau révèle une nette augmentation de la valeur actuelle nette (VAN) pour tous les scénarios climatiques. Cette augmentation est concomitante à l'augmentation des avantages reliés aux coûts de transport sauvés (Tableau 33).

Tableau 33. 6 EVP/cm en lien avec la minimisation du dégagement sous quille

	Référence	WI1	WI2
<i>Avantages actualisés</i>			
Coûts de transports sauvés	31 058 431,73 \$	43 355 753,16 \$	35 469 995,59 \$
Avantages environnementaux	1 410 746,47 \$	1 032 747,31 \$	1 163 509,27 \$
<i>Coûts actualisés</i>			
Coût de construction	1 000 000,00 \$	1 000 000,00 \$	1 000 000,00 \$
Coût d'entretien	2 248 214,86 \$	2 248 214,86 \$	2 248 214,86 \$
<i>Valeur actuelle nette</i>	29 220 963,33 \$	41 140 285,60 \$	33 385 290,00 \$

Lorsque les coûts de construction sont doublés, l'impact sur chacune des valeurs actuelles nettes (VAN) est similaire puisque les coûts de construction ne dépendent pas des scénarios climatiques (Tableau 34).

Tableau 34. Doublement des coûts de construction de la minimisation du dégagement sous quille

	Référence	WI1	WI2
<i>Avantages actualisés</i>			
Coûts de transport sauvés	19 381 011,26 \$	26 588 699,61 \$	22 056 172,61 \$
Avantages environnementaux	1 410 848,25 \$	1 032 821,82 \$	1 163 593,21 \$
<i>Coûts actualisés</i>			
Coût de construction	2 000 000,00 \$	2 000 000,00 \$	2 000 000,00 \$
Coût d'entretien	4 496 429,73 \$	4 496 429,73 \$	4 496 429,73 \$
<i>Valeur actuelle nette</i>	14 295 429,77 \$	21 125 091,70 \$	16 723 336,09 \$

6.6. Les coûts-avantages reliés à la combinaison du dragage et de la minimisation du dégagement sous quille

6.6.1. Les coûts

Une analyse coûts-avantages basée sur une combinaison du dragage et de la minimisation du dégagement sous quille permet l'atteinte d'une plus grande profondeur de 60 cm le long du chenal navigable du Saint-Laurent sans ajouter de coûts environnementaux supplémentaires par rapport à l'option de draguer. Les coûts sont estimés à 12 012 758,56 \$ au total pour chacun des scénarios.

6.6.2. Les avantages

Les avantages économiques pour le scénario de référence sont estimés à 26 494 798,19 \$ sur le plan des coûts de transport sauvés alors que les avantages environnementaux sont estimés à 2 457 259,68 \$. Dans le cas du scénario What-if #1, les avantages sont respectivement de 56 319 740,80 \$ et de 2 047 485,49 \$. Dans le cas du scénario climatique What-if #2, les avantages sont respectivement de 35 596 831,80 \$ et de 2 649 931,69 \$. Les valeurs actuelles nettes (VAN) d'une combinaison des deux mesures d'adaptation révèlent que les avantages sont supérieurs aux coûts pour tous les scénarios climatiques (Tableau 35).

Tableau 35. Avantages-coûts actualisés d'une combinaison du dragage et de la minimisation du dégagement sous quille

	REF	WI1	WI2
<i>Avantages actualisés</i>			
Coûts de transport sauvés	26 494 798,19 \$	56 319 730,80 \$	35 596 831,80 \$
Avantages environnementaux	2 457 259,68 \$	2 047 485,49 \$	2 649 931,69 \$
<i>Coûts actualisés</i>			
Coût de dragage	7 498 848,75 \$	7 498 848,75 \$	7 498 848,75 \$
Coût de capitalisation (MDSQ)	1 000 000,00 \$	1 000 000,00 \$	1 000 000,00 \$
Coûts d'entretien (MDSQ)	2 248 214,86 \$	2 248 214,86 \$	2 248 214,86 \$
Coût de décontamination	615 694,95 \$	615 694,95 \$	615 694,95 \$
Compensation d'habitat	650 000,00 \$	650 000,00 \$	650 000,00 \$
<i>Valeur actuelle nette</i>	16 939 299,31 \$	46 354 457,73 \$	26 234 004,93 \$

6.6.3. Les analyses de sensibilité

Plusieurs analyses de sensibilité ont été effectuées afin d'évaluer la robustesse des résultats pour la combinaison du dragage et de la minimisation du dégagement sous quille.

Le tableau 36 présente les résultats d'une analyse de sensibilité fondée sur une réduction du seuil de dragage à 20 cm pour obtenir un gain de 40 centimètres plutôt que de 60 cm. Cette variation a pour effet d'augmenter les valeurs actuelles nettes (VAN) pour les scénarios climatiques de Référence et What-if #2. En fort contraste, cette diminution de la profondeur d'eau entraîne une diminution de la valeur actuelle nette (VAN) du scénario climatique What-if #1 de 46 M \$ à 38 M \$.

Tableau 36. Dragage à 20 cm en lien avec une combinaison du dragage et de la minimisation du dégagement sous quille

	Référence	WI1	WI2
<i>Avantages actualisés</i>			
Coûts de transport sauvés	25 880 475,76 \$	44 125 914,95 \$	32 757 917,09 \$
Avantages environnementaux	2 229 939,06 \$	1 640 031,99 \$	2 146 077,39 \$
<i>Coûts actualisés</i>			
Coûts de dragage	3 544 475,56 \$	3 544 475,56 \$	3 544 475,56 \$
Coûts de capitalisation (MDSQ)	1 000 000,00 \$	1 000 000,00 \$	1 000 000,00 \$
Coûts d'entretien (MDSQ)	2 248 214,86 \$	2 248 214,86 \$	2 248 214,86 \$
Coûts de décontamination	291 020,10 \$	291 020,10 \$	291 020,10 \$
Compensation d'habitat	650 000,00 \$	650 000,00 \$	650 000,00 \$
<i>Valeur actuelle nette</i>	20 376 704,30 \$	38 032 236,42 \$	27 170 283,95 \$

La seconde analyse de sensibilité consiste à augmenter la profondeur à draguer de 20 cm pour atteindre 80 cm. Cette analyse révèle que les valeurs actuelles nettes (VAN) des scénarios de Référence et What-if #2 sont réduites tout en augmentant les avantages sur le plan des coûts de transport sauvés et les avantages environnementaux (Tableau 37). À l'inverse, la valeur actuelle nette (VAN) du dragage à 60 cm augmente pour le scénario climatique What-if #1 de 46 m \$ à 50 M \$.

Tableau 37. Dragage à 60 cm en lien avec une combinaison du dragage et de la minimisation du dégagement sous quille

	Référence	WI1	WI2
<i>Avantages actualisés</i>			
Coûts de transport sauvés	26 494 798,19 \$	64 488 404,93 \$	35 621 304,18 \$
Avantages environnementaux	2 457 082,41 \$	2 356 052,44 \$	2 684 554,41 \$
<i>Coûts actualisés</i>			
Coûts de dragage	11 863 095,47 \$	11 863 095,47 \$	11 863 095,47 \$
Coûts de capitalisation (MDSQ)	1 000 000,00 \$	1 000 000,00 \$	1 000 000,00 \$
Coûts d'entretien (MDSQ)	2 248 214,86 \$	2 248 214,86 \$	2 248 214,86 \$
Coûts de décontamination	974 022,58 \$	974 022,58 \$	974 022,58 \$
Compensation d'habitat	650 000,00 \$	650 000,00 \$	650 000,00 \$
<i>Valeur actuelle nette</i>	12 216 547,69 \$	50 109 124,45 \$	21 570 525,67 \$

Le Tableau 38 démontre qu'une diminution du taux d'actualisation jusqu'à 2% augmente les valeurs actuelles nettes (VAN) de tous les scénarios de changements climatiques, notamment pour le scénario What-if #1 alors que la valeur actuelle nette (VAN) augmente de 46 M \$ à 88 M \$.

Tableau 38. Taux d'actualisation de 2% d'une combinaison du dragage et de la minimisation du dégagement sous quille

	Référence	WI1	WI2
<i>Avantages actualisés</i>			
Coûts de transport sauvés	31 525 653,24 \$	97 977 714,90 \$	45 408 986,66 \$
Avantages environnementaux	2 996 104,58 \$	3 744 505,92 \$	3 347 234,21 \$
<i>Coûts actualisés</i>			
Coûts de dragage	7 498 848,75 \$	7 498 848,75 \$	7 498 848,75 \$
Coûts de capitalisation (MDSQ)	1 000 000,00 \$	1 000 000,00 \$	1 000 000,00 \$
Coûts d'entretien (MDSQ)	3 242 355,40 \$	3 242 355,40 \$	3 242 355,40 \$
Coûts de décontamination	615 694,95 \$	615 694,95 \$	615 694,95 \$
Compensation d'habitat	650 000,00 \$	650 000,00 \$	650 000,00 \$
<i>Valeur actuelle nette</i>	21 514 858,71 \$	88 715 321,71 \$	35 749 321,76 \$

Le Tableau 39 démontre qu'une augmentation du taux d'actualisation à 6% entraîne une diminution significative des valeurs actuelles nettes (VAN) de tous les scénarios de changements climatiques. L'effet le plus important concerne le scénario What-if #1.

Tableau 39. Taux d'actualisation de 6% d'une combinaison du dragage et de la minimisation du dégagement sous quille

	Référence	WI1	WI2
<i>Avantages actualisés</i>			
Coûts de transport sauvés	23 166 040,78 \$	33 084 487,77 \$	29 953 978,16 \$
Avantages environnementaux	2 127 490,25 \$	1 174 044,07 \$	2 247 333,76 \$
<i>Coûts actualisés</i>			
Coûts de dragage	7 498 848,75 \$	7 498 848,75 \$	7 498 848,75 \$
Coûts de capitalisation (MDSQ)	1 000 000,00 \$	1 000 000,00 \$	1 000 000,00 \$
Coûts d'entretien (MDSQ)	1 676 183,38 \$	1 676 183,38 \$	1 676 183,38 \$
Coûts de décontamination	615 694,95 \$	615 694,95 \$	615 694,95 \$
Compensation d'habitat	650 000,00 \$	650 000,00 \$	650 000,00 \$
<i>Valeur actuelle nette</i>	13 852 803,95 \$	22 817 804,76 \$	20 760 584,84 \$

Une analyse de sensibilité fondée sur une augmentation du nombre d'EVP par centimètre d'eau représente un élément central du calcul des avantages économiques. En établissant les pertes à 6 EVP par centimètre de niveau d'eau, les avantages deviennent considérables sur le plan des coûts de transport sauvés (Tableau 40). Il en résulte une augmentation concomitante des valeurs actuelles nettes (VAN) pour tous les scénarios de changements climatiques.

Tableau 40. 6 EVP/cm en lien avec une combinaison du dragage et de la minimisation du dégagement sous quille

	Référence	WI1	WI2
<i>Avantages actualisés</i>			
Coûts de transport sauvés	42 557 189,53 \$	92 535 279,30 \$	57 438 847,58 \$
Avantages environnementaux	2 457 082,41 \$	2 047 485,49 \$	2 649 931,69 \$
<i>Coûts actualisés</i>			
Coûts de dragage	7 498 848,75 \$	7 498 848,75 \$	7 498 848,75 \$
Coûts de capitalisation SGDQ	1 000 000,00 \$	1 000 000,00 \$	1 000 000,00 \$
Coûts d'entretien SGDQ	2 248 214,86 \$	2 248 214,86 \$	2 248 214,86 \$
Coûts de décontamination	615 694,95 \$	615 694,95 \$	615 694,95 \$
Compensation d'habitat	650 000,00 \$	650 000,00 \$	650 000,00 \$
<i>Valeur actuelle nette</i>	33 001 513,38 \$	82 570 006,22 \$	48 076 020,71 \$

L'analyse de sensibilité fondée sur un doublement des coûts de construction révèle que les valeurs actuelles nettes (VAN) diminuent pour tous les scénarios de changements climatiques notamment pour celle du scénario de référence qui baisse de 16 M\$ à 5 M\$ (Tableau 41).

Tableau 41. Doublement des coûts de construction du dragage et de la minimisation du dégagement sous quille

	Référence	WI1	WI2
<i>Avantages actualisés</i>			
Coûts de transport sauvés	26 494 798,19 \$	56 319 730,80 \$	35 596 831,80 \$
Avantages environnementaux	2 457 259,68 \$	2 047 485,49 \$	2 649 931,69 \$
<i>Coûts actualisés</i>			
Coûts de dragage	14 997 697,50 \$	14 997 697,50 \$	14 997 697,50 \$
Coûts de capitalisation (MDSQ)	2 000 000,00 \$	2 000 000,00 \$	2 000 000,00 \$
Coûts d'entretien (MDSQ)	4 496 429,73 \$	4 496 429,73 \$	4 496 429,73 \$
Coûts de décontamination	1 231 389,90 \$	1 231 389,90 \$	1 231 389,90 \$
Compensation d'habitat	650 000,00 \$	650 000,00 \$	650 000,00 \$
<i>Valeur actuelle nette</i>	5 576 540,74 \$	34 991 699,16 \$	14 871 246,36 \$

Le Tableau 42 démontre que les valeurs actuelles nettes (VAN) demeurent positives lorsque les coûts environnementaux, incluant les coûts de décontamination et les coûts de compensation environnementale, sont doublés.

Tableau 42. Doublement des coûts environnementaux du dragage en lien avec une combinaison du dragage et de la minimisation du dégagement sous quille

	Référence	WI1	WI2
<i>Avantages actualisés</i>			
Coûts de transport sauvés	26 494 798,19 \$	56 319 730,80 \$	35 596 831,80 \$
Avantages environnementaux	2 457 259,68 \$	2 047 485,49 \$	2 649 931,69 \$
<i>Coûts actualisés</i>			
Coûts de dragage	7 104 172,50 \$	7 104 172,50 \$	7 104 172,50 \$
Coûts de capitalisation (MDSQ)	1 000 000,00 \$	1 000 000,00 \$	1 000 000,00 \$
Coûts d'entretien (MDSQ)	2 248 214,86 \$	2 248 214,86 \$	2 248 214,86 \$
Coûts de décontamination	1 231 389,90 \$	1 231 389,90 \$	1 231 389,90 \$
Compensation d'habitat	1 300 000,00 \$	1 300 000,00 \$	1 300 000,00 \$
<i>Valeur actuelle nette</i>	16 068 280,61 \$	45 483 439,03 \$	25 362 986,23 \$

7. CONCLUSION

L'analyse a permis de sélectionner le programme de minimisation du dégagement sous quille et le dragage en tant que meilleures mesures d'adaptation de l'industrie maritime et portuaire à Montréal aux défis de la baisse des niveaux d'eau sur le système Saint-Laurent.

Suite aux entrevues réalisées auprès d'intervenants du milieu académique, gouvernemental et industriel, au Canada et à l'international, plusieurs constats s'imposent. Premièrement, la minimisation du dégagement sous quille et le dragage proviennent de la volonté d'identifier des alternatives à la construction d'ouvrages d'art et au transfert des activités portuaires considérées plus désavantageuses sur le plan des impacts qui en résultent sur l'économie, la société et l'environnement. Les innovations à grandes échelles sont possibles dans le cadre de la stratégie maritime du gouvernement du Québec. Mais le choix de mesures d'adaptation à la baisse des niveaux d'eau dans le système Saint-Laurent est confronté à d'importants défis financiers. Les plans d'austérité financière au Canada et au Québec ralentissent l'avancée de grands travaux publics.

Deuxièmement, les mesures d'adaptation ne doivent pas être perçus comme indépendantes. Un programme de minimisation du dégagement sous quille doit être effectué parallèlement à des activités de dragage. Les conditions d'opération des deux mesures d'adaptation sont suffisamment complémentaires pour justifier la nécessité d'un groupement de pratiques pour répondre aux défis de la baisse des niveaux d'eau prévue par les scénarios d'Ouranos.

Troisièmement, le calendrier opérationnel constitue le principal défi et un élément clé du succès de l'adoption de mesures d'adaptation à la baisse des niveaux d'eau. Cette démarche doit être fondée sur des expériences passées et des études de prospective. Les scénarios des changements climatiques fournissent un outil pour estimer les niveaux d'eau et effectuer des analyses sur l'organisation des mesures d'adaptation. L'objectif consiste à fournir un ordre du jour pour le travail à effectuer par le gouvernement et l'industrie en vue de favoriser la mise en œuvre de mesures d'adaptation dans une perspective de développement durable. Les stratégies les plus efficaces sont celles qui visent des objectifs à court, moyen et long terme, selon des valeurs précises.

Dans ce contexte, le moyen le plus efficace d'implanter les mesures d'adaptation sélectionnées consiste à élaborer un cahier des charges qui les mettent en œuvre, en fonction de la temporalité des changements climatiques et de leurs coûts. Cette analyse permet de suggérer trois recommandations:

- Le développement d'un programme conjoint d'adaptation du transport maritime et portuaire à la baisse des niveaux d'eau qui intègre à la fois la minimisation du dégagement sous quille et le dragage.
- La mise en œuvre d'un programme de minimisation du dégagement sous quille permettant d'atténuer les problèmes de circulation des navires dans le contexte d'une baisse de niveau d'eau pouvant atteindre 20 centimètres sous le zéro des cartes.
- La réalisation d'un programme de dragage sélectif de 40 centimètres le long de certains segments du chenal navigable du Saint-Laurent entre Montréal et Québec représentant un volume d'environ 1,5 million m³ de sédiments.

L'analyse prolonge l'examen du contexte économique du transport maritime au port de Montréal et intègre une étude comparative des mesures d'adaptation à la baisse des niveaux d'eau sur la base de critères de capacité, de coûts, d'impacts environnementaux et sociaux et de compétitivité. Le choix de programmes de minimisation du dégagement sous quille et de dragage afin de répondre à une baisse des niveaux d'eau s'inscrit dans un continuum entre recherche fondamentale et empirique. De façon davantage marquée, les entrevues auprès des parties prenantes suggèrent d'élaborer un calendrier de mise en œuvre des mesures d'adaptation dans le cadre des prévisions des baisses significatives et prolongées des niveaux d'eau qui surviennent à brève échéance.

L'analyse coûts-avantages de l'ensemble des résultats démontre que dans le cas du scénario climatique de Référence, la mesure d'adaptation ayant la plus grande valeur actuelle nette (VAN) est le dragage (VAN = 19 345 871,12 \$). Dans le cas du scénario climatique What-if #1, la mesure d'adaptation qui offre les avantages les plus élevés est la combinaison des deux mesures d'adaptation qui permet d'atteindre une valeur actuelle nette (VAN) de 46 354 457,73 \$. Dans le cas du scénario climatique What-if #2,

la mesure d'adaptation qui présente la plus grande valeur actuelle nette (VAN) est le dragage avec une valeur estimée à 26 139 450,78 \$.

8. RÉFÉRENCES

ADEC (2012) *Étude de l'impact économique de l'industrie maritime au Québec*. Montréal, ADEC, 88 p.

Beaumont, N.J., Austen, M.C., Mangi, S.C. & Townsend, M. (2008) Economic valuation for the conservation of marine biodiversity, *Marine Pollution Bulletin*: 386-396.

Bürgerschaft der Freien und Hansestadt Hamburg (2014) *Schriftliche Kleine Anfrage des Abgeordneten Dr. Anjes Tjarks (GRUNE) vom 11.06.14 und Antwort des Senats*. [En ligne].

[\[http://www.buergerschaft-hh.de/Parldok/Cache/39713C6DD0450BD0BF0107A0.pdf\]](http://www.buergerschaft-hh.de/Parldok/Cache/39713C6DD0450BD0BF0107A0.pdf).

Cariou, Pierre & Notteboom, Theo (2013) Slow steaming in container liner shipping: is there any impact on fuel surcharge practices? *The International Journal of Logistics Management*, 24(1): 73-86.

Comtois, C & Dong, Jieshuang (2007) «Port competition in the Yangtze River delta», *Pacific Viewpoint*, 48(3): 299-311.

Comtois, C. & Slack, B. (2015b) *Analyse comparative des mesures d'adaptation aux changements climatiques du transport maritime au port de Montréal*, Étude économique régionale des impacts et de l'adaptation aux changements climatiques. Rapport au programme ressources hydriques, Consortium sur les changements climatiques Ouranos. Montréal: Ouranos, 47 p.

Comtois, C. & Slack, B. (2015a) *Identification, quantification et estimation économique des impacts des changements climatiques sur le transport maritime à Montréal*, Étude économique régionale des impacts et de l'adaptation aux changements climatiques. Rapport au programme ressources hydriques, Consortium sur les changements climatiques Ouranos. Montréal: Ouranos, 24 p.

Comtois, C. & Slack, B. (2014b) *Mesures d'adaptation du transport maritime et portuaire à la fluctuation des niveaux d'eau*, Étude économique régionale des impacts et de l'adaptation aux changements climatiques. Rapport au programme ressources hydriques, Consortium sur les changements climatiques Ouranos. Montréal: Ouranos, 34 p.

Comtois, C. & Slack, B. (2014a) *Contexte économique du transport maritime au port de Montréal*, Étude économique régionale des impacts et de l'adaptation aux changements climatiques. Rapport au programme ressources hydriques, Consortium sur les changements climatiques Ouranos. Montréal: Ouranos, 113 p.

Comtois, C. & Slack, B. (2005) *Transformations de l'industrie maritime: portrait international de développement durable appliqué*, Collection Études et Recherches en transport. Québec: Ministère des Transports du Québec, 247 p.

Consultants Jacques Bérubé Inc (1994) *Répercussions environnementales du dragage et de la mise en dépôt des sédiments*. Montréal: CJB, 126 p.

Costanza, Robert, d'Arge, Ralph, de Groot, Rudolf, Farber, Stephen, Grasso, Monica, Hannon, Bruce, Limburg, Karin, Naeem, Shahid, O'Neill, Robert V., Paruelo, Jose, Raskin, Robert G., Sutton, Paul & van den Belt, Marjan (1997) The value of the world's ecosystem services and natural capital, *Nature*, 387: 253-260.

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

Deegan, L.A., Kennedy, H.M. & NEILL, C. (1984) «Natural Factors and Human Modifications Contributing to Marsh Loss in Louisiana's Mississippi River Deltaic Plain», *Environmental Management*, 8(6): 519-528.

De Koninck, R. (2006) «Le delta du Mississippi: une lutte à finir entre l'homme et la nature», *Hérodote*, 121: 19-41.

Dredging, Environmental & Marine Engineering (DEME) (2014a) *Panama Canal*. [En ligne].

[\[http://www.deme-group.com/projects/panama-canal\]](http://www.deme-group.com/projects/panama-canal).

Dredging, Environmental & Marine Engineering (DEME) (2014b) *London Gateway Port*. [En ligne].

[\[http://www.deme-group.com/projects/london-gateway-port\]](http://www.deme-group.com/projects/london-gateway-port).

Dredging, Environmental & Marine Engineering (DEME) (2014c) *Sepetiba Bay*. [En ligne].

[\[http://www.deme-group.com/projects/sepetiba-bay\]](http://www.deme-group.com/projects/sepetiba-bay).

Ferland, Anne-Marie (2006) *Guide de l'analyse avantages-coûts des projets publics en transport. Partie 1. Précis méthodologique*. Québec: Ministère des transports du Québec, 72 p.

Harper, D.J. & Quigley, J.T. (2005) No net loss of fish habitat: a review and analysis of habitat compensation in Canada, *Environmental Management*, 36(3): 343-355.

Huard, David (2014) *Étude économique régionale des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques: le fleuve Saint-Laurent. Description des scénarios climatiques*, Étude économique régionale des impacts et de l'adaptation aux changements climatique. Rapport au programme ressources hydriques, Consortium sur les changements climatiques Ouranos. Montréal: Ouranos, 37 p.

Hwang, C.L. & Yoon, K. (1981) *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. New York: Springer-Verlag.

Hwang, C.L., Lai, Y.J. & Liu, T.Y. (1993) A new approach for multiple objective decision making. *Computers and Operational Research*, 20: 889–899.

International Maritime Organization IMO (2009) *Second GHG study Update*. London: IMO, Marine Environment Protection Committee, 289 p.

Rieussec, Erwan (2008) *Analyse comparative des différents modes de gestion des sédiments de dragage en milieux terrestre et marin*. Mémoire de maîtrise, Sherbrooke: Université de Sherbrooke, 136 p.

Song, Su (2014) Ship emissions inventory, social cost and eco-efficiency in Shanghai Yangshan port. *Atmospheric Environment* 82: 288-297.

United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD) (2012). *Review of maritime transport: Chapter 3 Freight rates and maritime transport costs*. Geneva: United Nations, pp. 57-79.

United States Army Corps of Engineers (USACE) (2012b) *Savannah Harbor Expansion Project Dredged Material Management Plan Update*. Savannah: USACE, 23 p.

United States Army Corps of Engineers (USACE) (2012a) *Final Re-evaluation Report. Savannah Harbor Expansion Project*. Savannah: USACE, 9 p.

United States Army Corps of Engineers (USACE) (2000) *Planning Guidance Notebook*. Washington: Department of the Army, 712 p.

Yoon, K. (1987) A reconciliation among discrete compromise situations. *Journal of Operational Research Society* 38: 277–286.

Yoon, K.P. & Hwang, C. (1995) *Multiple Attribute Decision Making: An Introduction*. California: SAGE publications.