

**HEC MONTRÉAL**

**Analyse coûts-bénéfices des mesures d'adaptation aux changements climatiques  
sur la Voie maritime du fleuve Saint-Laurent**

par

Olivier G. Leblanc

Sciences de la gestion  
(Économie appliquée)

*Mémoire présenté en vue de l'obtention  
du grade de maîtrise ès sciences  
(M. Sc.)*

Décembre 2015

© Olivier G. Leblanc, 2015

**HEC MONTRÉAL**

**Analyse coûts-bénéfices des mesures d'adaptation aux changements climatiques  
sur la Voie maritime du fleuve Saint-Laurent**

par

Olivier G.Leblanc

Sciences de la gestion  
(Économie appliquée)

*Mémoire présenté en vue de l'obtention  
du grade de maîtrise ès sciences  
(M. Sc.)*

Février 2016

© Olivier G.Leblanc, 2016

## Sommaire

---

Les changements climatiques auront un impact sur les sociétés humaines et sur plusieurs sphères de l'activité économique. Les systèmes hydrologiques seront particulièrement affectés, à travers une augmentation de la variation des niveaux d'eau. Le transport maritime, de par sa nature, est l'un des secteurs qui devra trouver des moyens de s'adapter rapidement. Cela est d'autant plus vrai dans le cas de la Voie maritime du Saint-Laurent et son port principal, Montréal. Celui-ci est la principale voie d'accès de l'Est canadien pour les marchandises provenant ou à destination de l'étranger.

Ce mémoire s'intéresse donc à plusieurs mesures d'adaptation qui visent à contrer les effets négatifs des changements climatiques sur les niveaux d'eau de la Voie maritime. À l'aide d'analyses coûts-bénéfices, ce mémoire tente de déterminer la viabilité économique de *minimiser le dégagement sous quille* ou de *draguer* de façon à maintenir les niveaux d'eau actuels. Le modèle que nous développons incorpore à la fois les bénéfices liés à la diminution relative des coûts de transport, les bénéfices provenant d'une réduction relative des gaz à effet de serre et les coûts environnementaux associés au dragage. Notre analyse utilise trois scénarios climatiques différents et chaque mesure d'adaptation est évaluée pour tous les scénarios.

Ce processus nous permet de conclure qu'une *combinaison* de la *minimisation du dégagement sous quille* et du *dragage* est la mesure la plus économiquement avantageuse. Les valeurs actuelles nettes varient entre 21,37 M\$ et 54,71M\$ selon le scénario climatique.

## Table des matières

Sommaire.....	i
Table des matières.....	ii
Liste des images, graphiques et tableaux.....	iv
Images.....	iv
Graphiques.....	iv
Tableaux.....	iv
Introduction.....	1
Chapitre 1 : Contexte.....	6
1.1 La voie navigable du Saint-Laurent.....	6
1.2 Les changements climatiques.....	9
1.3 Les mesures d'adaptation.....	12
1.4 La sélection d'une mesure d'adaptation.....	17
Chapitre 2 : Scénarios climatiques.....	20
2.1 Scénario de référence.....	21
2.2 Scénario What-If #1.....	22
2.3 Scénario What-If #2.....	24
Chapitre 3 : Revue de littérature.....	26
3.1 Les impacts environnementaux.....	26
3.2 La valeur monétaire des coûts environnementaux.....	29
3.3 Les avantages économiques.....	35
3.4 La valeur monétaire des avantages économiques.....	37
3.5 Les études spécifiques à la voie navigable du Saint-Laurent.....	38
3.6 La situation concurrentielle du port de Montréal.....	40
Chapitre 4 : Méthodologie.....	43
4.1 Le cadre d'analyse.....	43
4.2 Société cible.....	44
4.3 Le projet de référence.....	44
4.4 L'horizon temporel.....	45
4.5 Le taux d'actualisation.....	45
4.6 Estimation des coûts.....	46
4.7 Estimation des bénéfices.....	51
4.8 Analyses de sensibilité.....	69
4.9 Sommaire des coûts et bénéfices.....	73
Chapitre 5 : La minimisation du dégagement sous quille.....	74
5.1 Calcul des coûts.....	74
5.2 Calcul des bénéfices.....	75
5.3 Les valeurs actuelles nettes.....	75
5.4 Analyses de sensibilité.....	80
Chapitre 6 : Le dragage.....	82
6.1 Calcul des coûts.....	82
6.2 Calcul des bénéfices.....	83
6.3 Valeurs actuelles nettes.....	84
6.4 Analyses de sensibilité.....	88

Chapitre 7 : La combinaison des deux mesures .....	91
7.1 Calcul des coûts.....	91
7.2 Calcul des bénéfices .....	91
7.3 Valeurs actuelles nettes .....	92
7.4 Analyses de sensibilité .....	95
Chapitre 8 : Analyse des Résultats .....	99
8.1 Le scénario de <i>référence</i> .....	99
8.2 Le scénario <i>What-if #1</i> .....	100
8.3 Le scénario <i>What-if #2</i> .....	101
8.4 Sommaire.....	102
Chapitre 9 : Conclusion .....	104
9.1 Discussion et limites de l'étude.....	105
Bibliographie .....	108

## Liste des images, graphiques et tableaux

---

### Images

---

Image 1 : Le réseau Grands Lacs – Voie maritime du Saint-Laurent .....	7
Image 2 : Drague à succion autoporteuse à élinde traînante .....	15
Image 3 : Calcul du dégagement sous quille .....	16
Image 4 : Profondeur de la voie navigable du Saint-Laurent entre Montréal et Québec .....	47

### Graphiques

---

Graphique 1 : La variation des niveaux d'eau du scénario de référence .....	21
Graphique 2 : Distribution des niveaux d'eau du scénario de référence .....	22
Graphique 3 : La variation des niveaux d'eau du scénario What-if #1 .....	23
Graphique 4 : Distribution des niveaux d'eau du scénario What-If #1 .....	23
Graphique 5 : La variation des niveaux d'eau du scénario What-if #2 .....	24
Graphique 6 : Distribution des niveaux d'eau du scénario What-if #2 .....	25
Graphique 7 : Avantages et coûts SGDQ – Scénario REF .....	76
Graphique 8 : Avantages et coûts SGDQ – Scénario WI1 .....	77
Graphique 9 : Avantages et coûts SGDQ – Scénario WI2 .....	79
Graphique 10 : Avantages et coûts Dragage – Scénario REF .....	85
Graphique 11 : Avantages et coûts Dragage – Scénario WI1 .....	86
Graphique 12 : Avantages et coûts Dragage – Scénario WI2 .....	87
Graphique 13 : Avantages et coûts Combinaison – Scénario REF .....	92
Graphique 14 : Avantages et coûts Combinaison – Scénario WI1 .....	93
Graphique 15 : Avantages et coûts Combinaison – Scénario WI2 .....	94

### Tableaux

---

Tableau 1 : Typologie des mesures d'adaptation .....	13
Tableau 2 : Liste des analyses coûts-bénéfices étudiées .....	37
Tableau 3 : Les étapes de la méthodologie de l'USACE .....	54
Tableau 4 : Quantité de marchandises transitant au Port de Montréal .....	55
Tableau 5 : Provenance des marchandises conteneurisées, 2014 .....	56
Tableau 6 : Paires d'origines/destinations et caractéristiques de modélisation .....	63
Tableau 7 : Distance et consommation supplémentaire de carburant .....	67
Tableau 8 : Facteur d'émission par tonnes de carburant (kg/Tonne) .....	67
Tableau 9 : Coût en dollars par tonne d'émissions (\$2015) .....	68
Tableau 10 : Description des différentes variables utilisées dans les équations .....	70
Tableau 11 : Sommaire des coûts et des bénéfices .....	73

*Je tiens d'abord à remercier mes directeurs Paul Lanoie et Justin Leroux pour leurs précieux conseils, leurs intuitions économiques et leur encouragement pendant la rédaction de ce mémoire.*

*Je tiens également à remercier Claude Comtois et Brian Slack pour leurs générosités et d'avoir accepté de partager leurs connaissances du monde maritime québécois.*

*J'aimerais aussi remercier le Consortium de recherche Ouranos pour la construction des scénarios climatiques.*

*Je veux aussi remercier ma famille et tout particulièrement mon père, pour son courage et son support constant.*

*Un dernier merci à Céline pour son soutien inconditionnel.*

## Introduction

---

Les changements climatiques auront des conséquences importantes sur les sociétés humaines et les écosystèmes partout sur la planète. L'adaptation et les mesures d'atténuation à ces changements climatiques seront au cœur des politiques publiques au cours des prochaines décennies. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) est l'autorité mondiale sur le sujet. Dans son cinquième rapport sur l'état des changements climatiques, paru en novembre 2014, le groupe conclut que « Si on ne les maîtrise pas, les changements climatiques vont accroître le risque de conséquences graves, généralisées et irréversibles pour l'être humain et les écosystèmes <sup>1</sup> ». Ce constat est implacable et ne semble pas laisser de place au doute, les changements climatiques auront un impact sur les activités humaines. Le GIEC laisse toutefois planer une parcelle d'espoir et suggère des changements de comportement : « Nous disposons toutefois d'options pour nous adapter à ces changements et des activités rigoureuses d'atténuation peuvent limiter les conséquences de l'évolution du climat à une gamme gérable, d'où un avenir meilleur et plus viable. » Nous ne sommes plus du tout dans la rhétorique des possibilités, mais plutôt dans un discours faisant état de la nécessité pour l'homme à s'adapter.

Certaines des conséquences fréquemment soulevées par le GIEC et d'autres instances d'études des changements climatiques sont une augmentation du niveau des océans, une plus grande variabilité des températures et des précipitations, de même qu'une augmentation des phénomènes météorologiques extrêmes. Il va sans dire que l'impact des changements climatiques touchera toutes les sphères de l'activité humaine, que ce soit d'un point de vue social, politique ou économique. Nous pouvons également supposer que certains secteurs seront plus touchés que d'autres.

---

<sup>1</sup> « Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a été créé en 1988 en vue de fournir des évaluations détaillées de l'état des connaissances scientifiques, techniques et socio-économiques sur les changements climatiques, leurs causes, leurs répercussions potentielles et les stratégies de parade. » <http://www.ipcc.ch> Tiré du communiqué de presse du 2 novembre 2014.

Le transport maritime, la colonne vertébrale du commerce international, sera notamment l'un des secteurs qui devra s'adapter drastiquement. À travers des interventions gouvernementales et des initiatives privées, le secteur du transport commercial de marchandises devra trouver les moyens de palier à ces changements.

Le transport maritime de l'Est du Canada est complètement tributaire du système de navigation des Grands Lacs et du fleuve Saint-Laurent. C'est un corridor fluvial majeur, essentiel à l'économie canadienne en général, et québécoise et ontarienne en particulier. Comme nous l'avons mentionné précédemment, les changements climatiques auront un impact sur la variabilité des précipitations et des températures. Dans le cas du Saint-Laurent, cela implique une augmentation de l'incertitude quant aux niveaux d'eau. L'hydrologie du fleuve Saint-Laurent a été modifiée à de nombreuses reprises afin de faciliter les activités humaines et minimiser l'impact de la variabilité des conditions maritimes sur le commerce, le transport de passagers et les activités récréotouristiques. L'impact des changements climatiques impliquera également des mesures d'adaptation au niveau des infrastructures, du chenal de navigation, des flottes de navigation et des acteurs du milieu.

Le Port de Montréal est particulièrement vulnérable à une fluctuation des niveaux d'eau. Montréal est considérée comme un port océanique en milieu fluvial, c'est-à-dire que les bateaux océaniques sont capables de progresser loin à l'intérieur des terres pour atteindre la ville. C'est un avantage concurrentiel indéniable et c'est ce qui explique pourquoi le port de Montréal est une plaque intermodale importante dans le transport de marchandises en provenance (ou en destination) de l'Europe vers (depuis) les marchés très importants du Midwest américain<sup>2</sup>. Qui plus est, Montréal joue également un rôle prépondérant dans l'importation et l'exportation de marchandises du Québec et de l'Ontario vers le reste du monde. Cette position enviable est complètement tributaire de la capacité des bateaux océaniques à s'y rendre. Cette situation est encore plus critique pour certaines marchandises comme celles transportées par conteneurs puisque, pour ce type de transport, les ports sont

---

<sup>2</sup> Selon le port de Montréal, celui-ci attire environ le tiers du marché.

progressivement devenus homogènes et doivent se faire concurrence par les prix. Les principaux concurrents sont Halifax, New York-New Jersey (NYNJ) et Hampton Roads (VA). Ceux-ci sont moins vulnérables aux conditions qui pourraient toucher les ports québécois dans un contexte de changements climatiques puisqu'ils sont situés sur les côtes et seront soumis à une augmentation des niveaux d'eau.

Dans ce contexte, il est pertinent de se questionner sur les mesures d'adaptation aux changements climatiques nécessaires au maintien de la position économique du port de Montréal. Ces mesures d'adaptation auront nécessairement des impacts environnementaux, économiques et sociaux qu'il faudra qualifier et quantifier. Cette recherche s'intègre dans un projet de recherche plus important financé par Ressources Naturelles Canada et le Consortium Ouranos<sup>3</sup>. Le mandat principal est donc de quantifier, pour ensuite monétiser, les bénéfices et les coûts des différentes mesures d'adaptation. C'est à cette problématique que ce mémoire tentera de répondre en analysant certaines mesures d'adaptation possibles, en s'intéressant principalement au dragage de la voie navigable et à la minimisation du dégagement sous quille<sup>4</sup>.

Étant donné la présence de plusieurs mesures d'adaptation ayant des caractéristiques, des bénéfices et des coûts différents, il nous apparaît pertinent de répondre à cette question à l'aide d'une analyse coûts-bénéfices. Ces différences dans les coûts et les bénéfices pourront être comparées grâce à ce type d'analyse. Ces mesures d'adaptation représentent, d'une certaine manière, des améliorations ou des modifications à la voie navigable du Saint-Laurent. Ces dernières peuvent être au niveau technologique, législatif ou des infrastructures. Il ne s'agit pas de la première

---

<sup>3</sup> Le projet de recherche global est sous la responsabilité des professeurs de géographie Claude Comtois (Université de Montréal) et Brian Slack (Concordia). M. Comtois est directeur du Centre Interuniversitaire de Recherche sur les Réseaux d'Entreprises, la Logistique et le Transport. Ce sont des experts du milieu maritime québécois. Ils ont obtenu du financement du ministère des Ressources Naturelles du Canada et du consortium Ouranos. Les professeurs Paul Lanoie et Justin Leroux de HEC Montréal et moi-même compléterons l'analyse avantages-coûts des différentes mesures d'adaptation. Ce mémoire constitue l'analyse de certaines de ces mesures.

<sup>4</sup> De manière succincte, le dragage consiste à enlever des sédiments au fond d'un cours d'eau pour, dans notre cas, en augmenter sa profondeur. La minimisation du dégagement sous quille consiste à optimiser la distance entre le fond marin et la quille (le fond) d'un bateau en variant, par exemple, la vitesse grâce à des instruments technologiques et potentiellement des modifications réglementaires.

analyse coûts-bénéfices qui s'intéresse à des améliorations d'une voie navigable, loin s'en faut. Cependant, nous considérons que cette analyse constitue une contribution pertinente pour deux raisons principales.

Premièrement, cette analyse se fait dans un contexte de changements climatiques. C'est-à-dire que les mesures d'adaptation répondent à une problématique qui diffère de la problématique générale des analyses coûts-bénéfices réalisées précédemment. Ces dernières s'intéressaient principalement à des projets d'infrastructure motivés par des questions économiques. C'est-à-dire que l'augmentation de la profondeur d'un chenal a pour but principal d'augmenter l'activité économique d'une région. Dans cette recherche, le maintien d'une certaine profondeur a pour but de palier les effets qu'auront les changements climatiques sur le niveau des eaux.

Deuxièmement, parmi toutes les analyses coûts-bénéfices similaires que nous avons analysées, très peu d'entre elles quantifient et aucune ne monétisent les coûts ou les bénéfices environnementaux des projets. Notre analyse prend, par exemple, en considération des coûts pour la compensation d'habitats dans le cas de la mesure *dragage* et considère des bénéfices environnementaux reliés à la diminution relative des gaz à effet de serre pour toutes les mesures d'adaptation. Pour ce bénéfice, nous avons donc élaboré une méthodologie qui prend en considération la situation concurrentielle du port, à travers la perte ou le maintien de parts de marché, pour quantifier la diminution relative de carburant et conséquemment, de gaz à effet de serre. À notre connaissance, aucune analyse coûts-bénéfices sur le sujet ne réussit à incorporer à la fois les considérations économiques et environnementales.

Ce mémoire apporte des réponses intéressantes à la question des mesures d'adaptation aux changements climatiques dans un contexte de transport maritime. En effet, après une sélection de mesures d'adaptation pertinentes basée sur les travaux de Comtois et Slack (2014b, 2015), nous concluons qu'une combinaison de la *minimisation du dégagement sous quille* et du *dragage* permettra de produire des bénéfices supérieurs aux coûts comparativement à une situation où *aucune* mesure

d'adaptation n'est entreprise. Selon les scénarios climatiques, la valeur actuelle nette de la combinaison de ces deux mesures varient entre 21,37 M\$ et 54,71M\$, ce qui témoigne de la viabilité économique du projet.

Ce mémoire débute par une mise en contexte de la problématique et est suivi d'une présentation des trois scénarios de changements climatiques avec lesquels nous travaillerons. Ensuite, dans la troisième section, nous faisons une revue de littérature qui s'intéresse notamment à l'évaluation des bénéfices et à l'évaluation des coûts environnementaux reliés à la mesure d'adaptation *dragage*. La section 4 présente la méthodologie utilisée pour le calcul des coûts et des bénéfices. Les sections 5,6 et 7 présentent les principaux résultats des différentes mesures d'adaptation. La huitième section compare quant à elle les différentes mesures d'adaptation à l'intérieur des différents scénarios de changements climatiques. Enfin, nous retrouvons la conclusion de ce mémoire dans la dernière section.

## Chapitre 1 : Contexte

---

De manière à bien introduire la problématique des mesures d'adaptation en réponse aux changements climatiques, nous présenterons dans ce chapitre le contexte de la Voie maritime, du Port de Montréal et leurs relations avec les changements climatiques. Nous décrirons également les différentes mesures d'adaptation possible et l'argumentaire derrière la sélection de deux d'entre elles.

### 1.1 La voie navigable du Saint-Laurent

---

#### 1.1.1 *Le réseau Grands Lacs-Voie maritime du Saint-Laurent*

Le réseau Grands Lacs-Voie maritime du Saint-Laurent comprend deux segments distincts lorsqu'il est question des navires qui peuvent transiter par le système. Jusqu'à Montréal, la profondeur minimale des niveaux d'eau est de 11,3 m, alors qu'entre Montréal et les Grands Lacs, la profondeur minimale est plutôt de 8,2 m. Le port de Montréal est donc considéré comme un port océanique en milieu fluvial (Comtois & Slack, 2014a) puisque des bateaux pouvant contenir un peu plus de 4200 EVP<sup>5</sup> peuvent s'y rendre. À titre d'exemple, les ports de Philadelphie, de La Nouvelle-Orléans et d'Anvers sont également des ports intérieurs pouvant accueillir des bateaux de grandes tailles. Pour permettre le passage d'aussi gros navires, des travaux d'infrastructures importants ont dû être réalisés au fil des décennies.

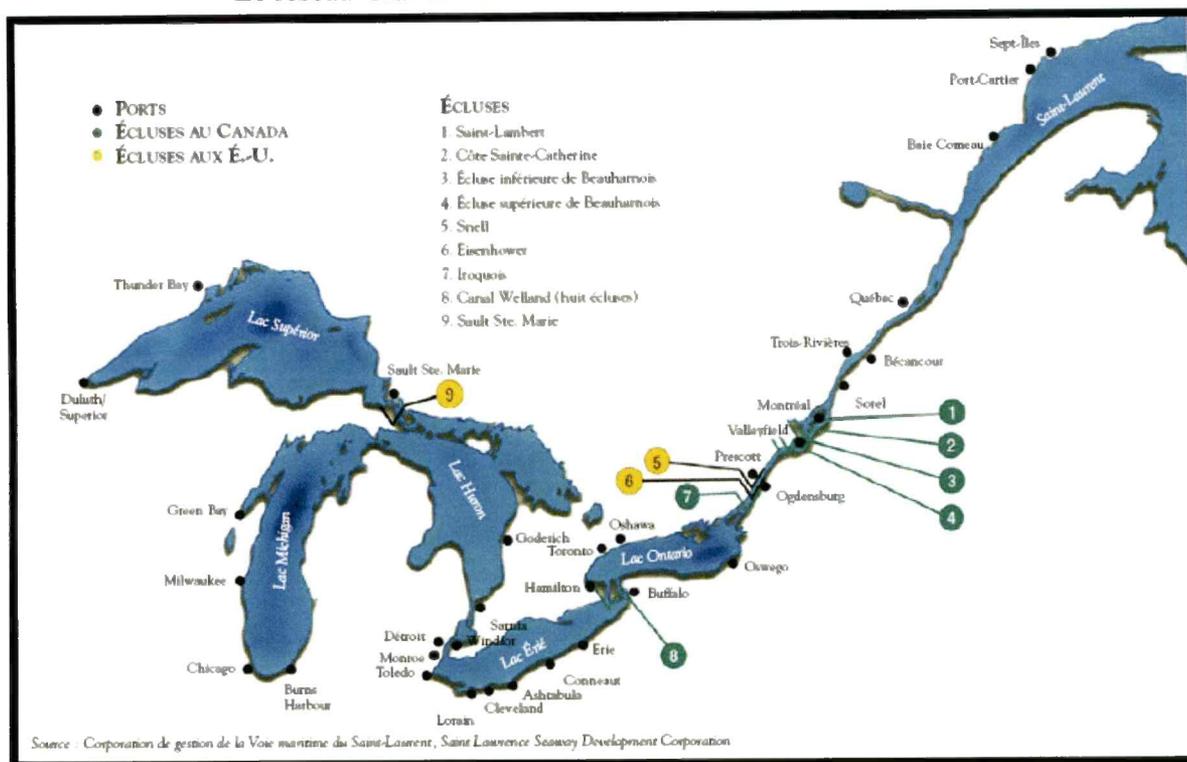
La voie navigable du Saint-Laurent est plusieurs fois centenaire. L'utilisation du Saint-Laurent pour le transport de marchandises et de personnes date de bien avant la colonisation européenne. Les travaux d'aménagement moderne commencent avec la construction de canaux et d'écluses dans la région de Montréal vers la fin du 18<sup>e</sup> siècle. L'ajout de nouveaux canaux et d'écluses de même que l'amélioration des voies

---

<sup>5</sup> Équivalent Vingt Pieds, une mesure standard pour les conteneurs.

navigables continuera au fil des années. Plusieurs canaux d'importance seront inaugurés au fil du 19<sup>e</sup> et 20<sup>e</sup> siècle. Le dragage du chenal de la voie maritime du Saint-Laurent, à l'est de Montréal, débute au début du 20<sup>e</sup> siècle pour atteindre une profondeur visée de 10,7 m. L'intérêt pour une voie navigable commerciale plus efficace pour atteindre les Grands Lacs à partir de Montréal s'accroît après la Deuxième Guerre Mondiale. C'est en 1959 que la Voie maritime du Saint-Laurent est inaugurée, avec la présence de la reine d'Angleterre et du vice-président américain. Les Grands Lacs sont enfin reliés aux marchés mondiaux. Par la suite, la profondeur du segment entre Montréal et les Grands Lacs est augmentée une première fois en 1993 et une deuxième fois en 2004 pour atteindre la profondeur actuelle de 8,2 m. Dans le cas du chenal de navigation entre l'Atlantique et Montréal, des dragages de capitalisation ont eu lieu en 1992 pour atteindre 11 mètres et en 1999 pour atteindre une profondeur de 11,3 m.

**Image 1**  
Le réseau Grands Lacs – Voie maritime du Saint-Laurent



Source : Corporation de gestion de la Voie maritime du Saint-Laurent (2007)

### 1.1.2 Le port de Montréal

Le port de Montréal se situe profondément à l'intérieur des terres sur le fleuve Saint-Laurent. L'Autorité du Port de Montréal (APM) dispose de deux sites, l'un à Montréal et l'autre un peu plus à l'est, à Contrecoeur. Le port manutentionne du vrac sec, des produits pétroliers, du vrac liquide, des céréales, du cargo général et des conteneurs. En 2013, le port a reçu 28 millions de tonnes métriques de marchandises, dont 1,4 million d'EVP<sup>6</sup>. En moyenne, près de 2200 bateaux sont accueillis chaque année à Montréal. Les conteneurs proviennent principalement d'Europe du Nord (44 %), de la Méditerranée (20 %) et d'Asie (14 %). Ces quantités de marchandises font de Montréal le deuxième port en importance au Canada et le 5e port accueillant le plus d'EVP sur la côte est de l'Amérique du Nord, derrière New York/New Jersey, Savannah, Hampton Roads et Charleston. Selon le Port de Montréal, la qualité des infrastructures intermodales permet aux marchandises en transit d'atteindre le nord-est des États-Unis en une journée de camion et le Midwest américain en deux jours de train. La distance entre l'Europe du Nord et Montréal est d'environ 8 jours et d'environ 11 jours pour la Méditerranée. Dans le cas de New York, c'est plutôt 9 et 11 jours. Il est évident que d'autres facteurs entrent en ligne de compte pour faire une comparaison juste entre les ports, ce que nous discuterons davantage.

Les retombées économiques du système Grands Lacs Saint-Laurent dans son ensemble sont considérables, elles sont estimées à un peu plus de 34,6 milliards de dollars par année (Martin Associates, 2011). Au Québec, la contribution au PIB québécois de l'industrie maritime est plutôt estimée à 2,3 milliards (Les Conseillers ADEC, 2012). Les mesures d'adaptation aux changements climatiques ont donc pour objectif de maintenir le statu quo en terme de profondeur de la voie navigable et en terme d'activité économique, dans la mesure du possible.

---

<sup>6</sup> Ces informations proviennent du site internet du Port de Montréal <http://www.port-montreal.com/fr/index.html>, consulté le 1<sup>er</sup> septembre 2015

## 1.2 Les changements climatiques

---

### 1.2.1 *Perspective mondiale*

L'influence des changements climatiques sur les écosystèmes et les sociétés humaines fait l'objet, depuis les dernières décennies, d'une importante et abondante recherche. Le consensus scientifique est clair, tel que décrit dans le rapport 2014 du GIEC : « Human influence on the climate system is clear, and recent anthropogenic emissions of greenhouse gases are the highest in history. Recent climate changes have had widespread impacts on human and natural systems. » (GIEC 2014, p. 2). Le GIEC est la référence en matière d'étude de l'impact des changements climatiques. L'organisme publie un rapport réunissant les plus récentes découvertes et les dernières prévisions de changements climatiques à environ tous les six ans. Le premier rapport date de 1990.

Le dernier rapport de 2014 est divisé en quatre parties : les effets et les causes des changements climatiques; les changements climatiques à venir; les avenues possibles de mitigation; et les politiques d'adaptation. Les experts sur le climat ne parlent jamais en termes de certitude, mais plutôt en termes de probabilité d'occurrence.

Parmi les changements les plus importants à être survenus au cours des dernières décennies, le GIEC estime une hausse moyenne des températures terrestres de 0,78 degré Celsius depuis l'ère préindustrielle, avec une grande variabilité selon les régions. Les couvertures glacières du Groenland et de l'Antarctique ont diminué et les glaciers ont également généralement reculé à travers la planète, c'est-à-dire qu'ils perdent en importance. Le niveau des océans a augmenté en moyenne de 0,19 m depuis le début du 20<sup>e</sup> siècle et cette tendance devrait se poursuivre.

Le GIEC estime que la probabilité que les changements climatiques proviennent en partie de l'activité humaine est très élevée. Par exemple, un lien a été établi entre l'activité humaine et l'augmentation des gaz à effet de serre, la diminution des masses glacières, ce lien serait la cause dominante de l'augmentation des températures.

Le GIEC estime également l'évolution probable des changements climatiques à travers le temps. Selon le groupe, les émissions de gaz à effet de serre vont continuer de causer davantage de réchauffement climatique et de changements importants et potentiellement irréversibles sur les écosystèmes.

Qui plus est, dans plusieurs régions, les changements dans les précipitations et la fonte des neiges et des glaces vont affecter les systèmes hydrologiques et, par conséquent, les ressources d'eaux en termes de qualité et de quantité (GIEC, 2014). Dans le cas de l'Amérique du Nord, le système hydrologique des Grands Lacs et du fleuve Saint-Laurent est déjà affecté et cet impact ne fera que s'accroître (Mortsch, et al. 2000).

#### *1.2.2 Les changements climatiques dans la voie navigable des Grands Lacs et du Saint-Laurent, leurs impacts*

Les Grands Lacs sont la principale source d'alimentation en eau du fleuve Saint-Laurent. Les changements climatiques, comme mentionné précédemment, auront un impact profond sur les systèmes hydrologiques. Le niveau des océans devrait monter à cause de la fonte des calottes glaciaires des pôles et du Groenland, cette fonte étant la conséquence de la hausse des températures moyennes. Les systèmes hydrologiques à l'intérieur des terres seront les plus susceptibles d'être affectés en termes de qualité et de quantité d'eau. Le lac Ontario et le lac Supérieur sont les deux grands lacs qui sont soumis à un contrôle des niveaux d'eau à l'aide d'ouvrages d'art<sup>7</sup>. Néanmoins, le niveau du lac Supérieur a connu ses plus grandes variabilités en 1986 et en 2007. Dans la majorité des cas, la variation autour de la moyenne pour ces deux lacs est de 0,8 et 0,9 mètre selon (Gronewold et al., 2013). En plus de l'Amérique du Nord, les plus grandes variabilités et les périodes prolongées de bas niveau d'eau inquiètent significativement les acteurs maritimes européens (Jonkeren et al., 2013).

---

<sup>7</sup> Les ouvrages d'art incluent les digues, les barrages, etc.

Actuellement, les Grands Lacs connaissent des périodes records de niveaux d'eau trop faibles (Gronewold & Stow, 2014), particulièrement dans le lac Supérieur, le lac Michigan et le lac Huron et dans une moindre mesure dans le lac Ontario<sup>8</sup>. La question fondamentale est de déterminer si les changements observés font partie d'un cycle hydrologique ou sont plutôt le résultat d'un changement de régime occasionné par les changements climatiques. La recherche est abondante sur le sujet puisque le bassin des Grands Lacs est un laboratoire parfait pour voir l'impact des changements climatiques sur les systèmes hydrologiques intérieurs. Plusieurs scénarios de prévision de niveaux d'eau sont disponibles dans la littérature, chacun utilisant une méthodologie spécifique ou s'adaptant d'une précédente (Gronewold et al., 2013).

Dans le cas des Grands Lacs, les niveaux d'eau sont influencés par les précipitations, l'évapotranspiration et le drainage terrestre. Les données sur les niveaux d'eau et le budget aquatique sont mesurées depuis environ une centaine d'années, ce qui donne une bonne indication des tendances. Depuis la fin des années 90, par contre, la baisse moyenne du niveau des eaux coïncide avec une augmentation des températures moyennes de l'eau et une augmentation de l'évapotranspiration (Gronewold et al., 2013).

La majorité des études consultées soulèvent la forte probabilité d'une baisse moyenne du niveau des eaux dans les Grands Lacs et le fleuve Saint-Laurent pendant les mois d'été. C'est le cas de Mortsch et al. (2000), de Lofgren et al. (2002) dans la majorité des scénarios/années, de Gronewold et Stow (2014) pour les Grands Lacs uniquement et de Bartolai et al. (2015). À l'inverse, d'autres auteurs signalent que la méthodologie utilisée dans les modèles de changements climatiques cités précédemment pourrait mener à une surestimation de la baisse des niveaux d'eau et qu'il existe également une possibilité de hausse des niveaux. C'est le cas de Lofgren

---

<sup>8</sup> Le lac Ontario est soumis à un contrôle rigoureux des niveaux d'eau grâce à plusieurs ouvrages humains. Le débit est notamment contrôlé par la Commission mixte internationale (CMI). [http://www.ijc.org/fr\\_/Great\\_Lakes\\_Water\\_Quantity](http://www.ijc.org/fr_/Great_Lakes_Water_Quantity) le 1er septembre 2015.

et al. (2011), qui mettent en doute le fait d'utiliser la température de l'air comme « proxy » à l'évaporation.

### **1.3 Les mesures d'adaptation**

---

#### *1.3.1 Définition des mesures d'adaptation*

L'impact des changements climatiques peut être atténué si les sociétés humaines prennent les moyens nécessaires. À ce titre, il existe une grande quantité de mesures d'adaptation possible pour minimiser les impacts des changements climatiques dans les corridors maritimes à l'intérieur des terres.

En ce qui a trait au concept plus général de ce que nous appellerons *mesures d'adaptation*, les chercheurs s'entendent généralement sur le fait qu'elles peuvent prendre plusieurs formes, degrés et intensités. Dans un texte sur les conséquences des changements climatiques sur le transport maritime européen, Jonkeren et al. (2013) spécifient que les mesures d'adaptations peuvent prendre deux formes : des mesures directes de mitigation ou des changements de comportements. Similairement, de Loë et al. (2001) font plutôt état de trois formes possibles : accepter les pertes, prévenir les effets ou changer les comportements. Le fait d'accepter les pertes survient quand les autres options sont trop coûteuses ou irréalisables. Prévenir les effets inclut les mesures physiques de prévention comme les barrages. Le fait de changer les comportements inclut changer l'usage d'une infrastructure, changer complètement de localisation ou même changer complètement les comportements des consommateurs pour réduire leurs émissions de gaz à effet de serre (GES). En réalité, la littérature est plutôt consensuelle quant à la définition des mesures d'adaptation.

Face à une augmentation de la variabilité des niveaux d'eau, les ports ont différentes options pour y faire face. Comme le mentionnent plusieurs études concernant l'impact des changements climatiques sur le transport maritime intérieur, la problématique la plus importante sera une baisse des niveaux d'eau (Millerd, 2011;

Jonkeren et al. 2013; Dorling et al., 2014). Les mesures d'adaptation qui pourraient être les plus pertinentes à notre analyse sont donc le dragage, les ouvrages d'art, le transfert des activités portuaires, la diminution du dégagement sous quille et le déploiement d'une nouvelle flotte (Comtois et Slack, 2014b).

### 1.3.2 Classification des mesures d'adaptation

Dans un document parallèle à cette étude, Comtois et Slack (2014a) décrivent une série de mesures d'adaptation disponibles au transport maritime pour pallier une fluctuation des niveaux d'eau. Nous reprendrons d'abord la typologie de de Loë et al. (2001) pour classifier les mesures d'adaptation et nous les décrirons par la suite.

**Tableau 1**  
Typologie des mesures d'adaptation

<i>Mesure d'adaptation</i>	<i>Accepter les pertes</i>	<i>Prévenir les effets</i>	<i>Changer les comportements</i>
Ne rien faire	<b>X</b>		
Le dragage		<b>X</b>	
Les ouvrages d'art		<b>X</b>	
La minimisation du dégagement sous quille		<b>X</b>	
Le transfert des activités portuaires			<b>X</b>
Le déploiement d'une nouvelle flotte			<b>X</b>

### 1.3.3 Description des mesures d'adaptation

#### *Ne rien faire*

La mesure d'adaptation de ne rien faire est l'équivalent direct d'accepter les pertes. Aucune mesure d'adaptation n'est entreprise pour pallier l'effet des changements climatiques. Cette situation entraîne vraisemblablement des coûts

importants puisque le coût des marchandises importées augmentera étant donné la hausse des coûts de transport.

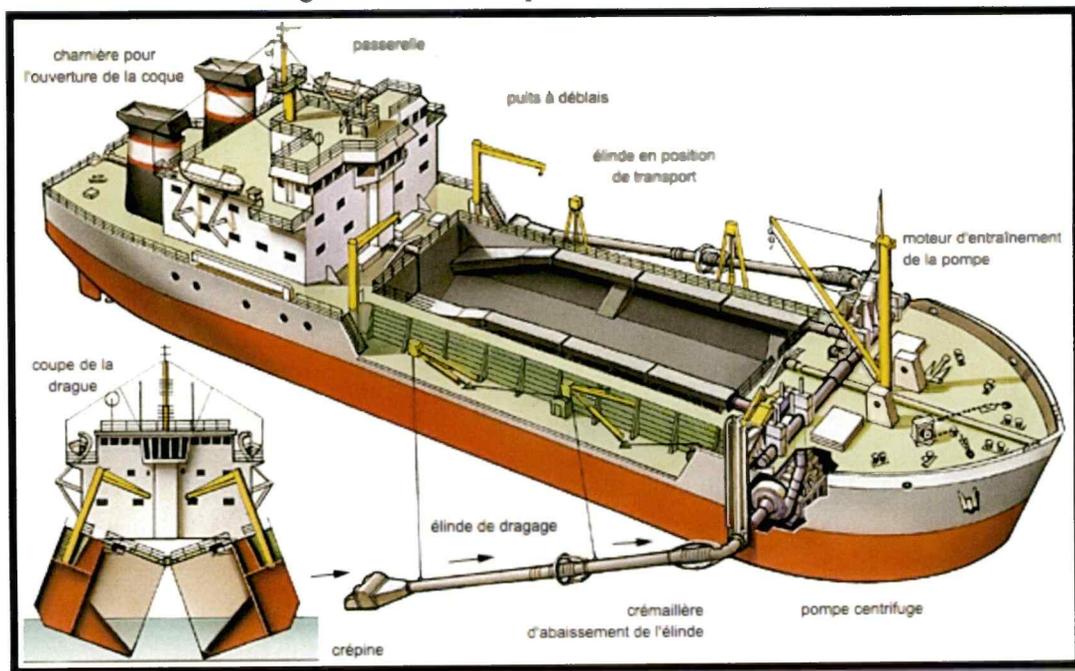
### *Le dragage*

Le dragage des voies de transport maritime, qu'il soit d'entretien ou de capitalisation, est une pratique fréquente et courante dans les corridors maritimes. Il s'agit d'une mesure d'adaptation qui vise à maintenir ou atteindre une certaine profondeur d'eau qui a été modifiée par le déplacement de quantité importante de sédiments. Le dragage permet également de décontaminer des portions de lacs ou de rivière et de mettre en valeur de nouveaux terrains grâce à la remise des sédiments sur terre. La voie maritime du Saint-Laurent annonce une profondeur minimale de 11,3 m suite à un dragage de capitalisation en 1999. Les différentes phases de dragage de capitalisation ont eu lieu au début du 20<sup>e</sup> siècle et en 1990.

Le processus de dragage comprend trois étapes. Il faut d'abord excaver les sédiments au fond de la rivière ou du lac. Par la suite, ces sédiments sont transportés grâce à des barges ou des pompes hydrauliques. Enfin, il est possible d'utiliser les sédiments pour des projets de construction ou il peut y avoir un rejet dans des sections plus profondes.

Les deux principaux types de dragues sont les dragues mécaniques et les dragues hydrauliques. Le choix de l'une ou l'autre des méthodes dépend de l'environnement, de la quantité, de la distance, etc. Les dragues mécaniques prennent les sédiments directement à l'aide de godets, de rétrocaveuses ou des bennes. Dans le cas des dragues hydrauliques, les sédiments sont mélangés à de grandes quantités d'eau pour les rendre plus malléables. Il est alors possible de les retirer avec des suceuses stationnaires, des désagrégateurs ou des dragues à succion à élinde traînante. L'image 2 illustre une drague à succion à élinde traînante, un type de drague utilisée sur la Voie maritime pour l'entretien.

**Image 2**  
Drague à suction autoportée à élinde traînante



Source : Larousse (2015)

Le dragage est soumis à une réglementation stricte au Canada et est administré par le ministère des Pêches et Océans (MPO). Le Port de Montréal est responsable de l'entretien de l'une des sections, près de Montréal.

### *Les ouvrages d'art*

Les ouvrages d'art sont des séries de constructions humaines visant à réguler la fluctuation des niveaux d'eau. Ces ouvrages sont divers et comprennent par exemple des digues, des barrages ou le raccourcissement des zones de littoral pour contenir les eaux. Ce genre de mesures d'adaptation survient généralement sous la forme de grands projets et est souvent très coûteux.

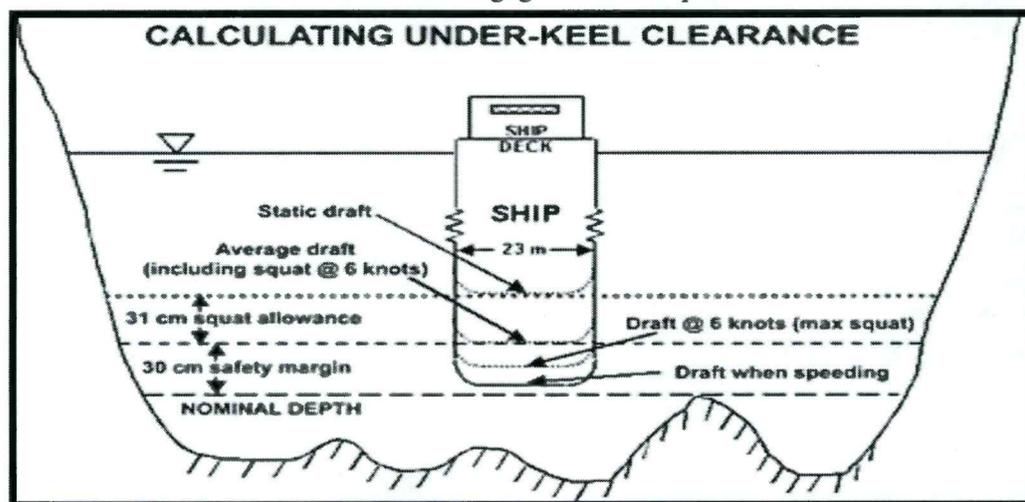
### *Le transfert des activités portuaires*

Cette mesure d'adaptation vise à déplacer complètement les infrastructures maritimes vers une zone où l'impact des changements climatiques sur la variation des niveaux d'eau est moins important. Il va sans dire que cette mesure d'adaptation est radicale et implique des investissements monétaires importants. Qui plus est, elle peut impliquer une combinaison de plusieurs autres mesures d'adaptation pour préparer le terrain.

### *La minimisation du dégagement sous quille*

La profondeur nécessaire pour qu'un bateau puisse naviguer dépend de plusieurs variables, qui incluent entre autres la vitesse, le poids, la largeur du corridor maritime, etc. Par exemple, un bateau d'un certain tonnage peut avoir besoin d'une profondeur moins importante s'il navigue moins vite ou s'il utilise un système d'information géographique plus performant. La prochaine image illustre comment un navire peut avoir besoin d'un dégagement sous quille plus ou moins grand selon la vitesse à laquelle il circule. La traduction des termes est disponible sous l'image.

**Image 3**  
Calcul du dégagement sous quille



Source : Transport Canada (2002)

Traduction : *Ship* : Bateau ; *Deck* : Pont ; *Static draft* : Tirant d'eau immobile ; *Average draft* : Tirant d'eau moyen ; *Knots* : Nœuds ; *Squat allowance* : Allocation d'enfoncement dynamique ; *Safety margin* : Marge de sécurité ; *Draft @ 6 knots* : Tirant d'eau à une vitesse de 6 Nœuds ; *Draft when speeding* : Tirant d'eau en mouvement ; *Nominal Depth* : Profondeur nominale

La minimisation du dégagement sous quille combine un changement de réglementation (voir *safety margin* dans l'image 3) quant à la profondeur minimale et l'utilisation de systèmes d'informations géographiques très performants pour déterminer la vitesse optimale selon le niveau d'eau pour respecter les règlements de la Garde Côtière. La principale problématique de cette mesure d'adaptation est le risque qui y est associé en termes d'échouement de bateau. Un bateau échoué peut entraîner des conséquences environnementales très importantes, en particulier s'il transporte des matières dangereuses. Nous ferons fréquemment allusion à cette mesure par l'appellation Système de Gestion du Dégagement sous Quille (SGDQ) en référence à son nom anglais *Under Keel Clearance Management System (UKCMS)*.

#### *Le déploiement d'une nouvelle flotte*

Plusieurs corridors fluviaux font usage d'une flotte spécifique aux conditions de navigation du chenal maritime. Il s'agit de déployer davantage de plus petits bateaux ou de créer des bateaux de capacités similaires avec des tirants d'eau moins importants. Cette mesure d'adaptation présente des défis tant en termes de coûts que de logistique. En effet, des bateaux de type « barges très larges » ne sont pas adaptés aux infrastructures traditionnelles de déchargement des conteneurs et ne peuvent pas toujours opérer des lignes océaniques.

### **1.4 La sélection d'une mesure d'adaptation**

---

Dans le contexte de la voie navigable du Saint-Laurent, les mesures d'adaptation les plus crédibles et faciles à mettre en application sont le dragage et la minimisation du dégagement sous quille. Ce sont les conclusions de Comtois et Slack (2015) après une analyse de toutes les mesures mentionnées précédemment.

Les auteurs ont appliqué la méthode FFOM (Forces – Faiblesses – Opportunités Menaces ou SWOT en anglais) et la méthode TOPSIS (Technique for Order

Preference by Similarity to Ideal Solution) pour sélectionner les mesures d'adaptations à analyser. Préalablement, les auteurs avaient écrit un rapport contenant une description exhaustive des différentes mesures d'adaptation. Ils y expliquaient également les principaux avantages et inconvénients de chacune des mesures (Comtois et Slack, 2014b).

#### 1.4.1 Analyse FFOM

Dans le cas du dragage, les auteurs soulèvent notamment comme avantages que le dragage permet la baisse du coût de transport malgré des coûts importants et une perturbation potentielle des écosystèmes aquatiques et des littoraux. Qui plus est, le dragage peut permettre l'accroissement et l'ouverture de nouveaux marchés, mais fait face à peu d'acceptabilité sociale.

Pour ce qui est des ouvrages d'art, ceux-ci augmentent la valeur des actifs portuaires et améliorent la sécurité et l'efficacité. Cependant, les coûts sont très importants et l'amortissement est très lent. Ces ouvrages d'art permettent l'augmentation de la compétitivité portuaire et de la résilience des infrastructures. Cependant, ce type d'ouvrage implique la participation de multiples partenaires financiers difficile à coordonner et un déséquilibre important entre les coûts et les bénéfices.

Les auteurs analysent également le transfert d'installations portuaires. Ils reconnaissent que de nouvelles installations portuaires permettent de changer des équipements vieillissants et de transférer les activités portuaires à l'extérieur de la ville. Le transfert des activités portuaires implique cependant une perte potentielle d'actifs fonciers importants et d'un réseau intermodal important. Malgré tout, un transfert pourrait impliquer la sélection d'un nouveau site plus adéquat en termes de localisation et d'opérations. Au final toutefois, ils réitèrent qu'il s'agit d'un risque financier très important.

Finalement, les auteurs analysent l'option d'adaptation de la minimisation du dégagement sous quille. Les auteurs soulignent que l'utilisation d'un tel système

permet des gains opérationnels et de productivité importants. Cependant, l'augmentation potentielle de la vitesse dans les zones plus profonde grâce à ce système peut augmenter l'érosion côtière. Ce système diminue les risques du transport maritime, mais pourrait impliquer la réduction de l'effort gouvernemental de production de données de niveaux d'eau.

#### 1.4.2 Analyse TOPSIS

Les auteurs poursuivent leur analyse en sélectionnant les mesures d'adaptation pertinentes à une évaluation en utilisant la méthode TOPSIS. Cette méthode classe par ordre de préférence les mesures d'adaptation en se basant sur un ensemble de critères. Selon cette méthode, les auteurs concluent que les deux mesures d'adaptation les plus pertinentes sont le dragage et la minimisation du dégagement sous quille. Ces mesures sont suivies du transfert des activités portuaires et des ouvrages d'art.

#### 1.4.3 Sélection

Les auteurs concluent leur analyse en sélectionnant deux mesures d'adaptation, le dégagement sous quille et le dragage. Dans le contexte de cette recherche, nous évaluerons ces différentes mesures séparément et conjointement, ce qui nous donnera trois analyses coûts bénéfiques distinctes. Dans le cas du dragage, ils recommandent une augmentation de la profondeur de **40 centimètres**. Pour ce qui est du dégagement sous quille, les auteurs estiment que l'installation d'appareils de gestion du dégagement sous quille permettra un gain de **20 centimètres**. Un plus grand accent sera mis sur à la mesure d'adaptation dragage puisqu'il s'agit de celle présentant les plus grandes problématiques environnementales.

## Chapitre 2 : Scénarios climatiques

---

Ce mémoire inclut des résultats de travaux connexes provenant de plusieurs acteurs du milieu maritime québécois et de groupes de recherche sur les changements climatiques. Nous avons déjà mentionné à plusieurs reprises les travaux de Claude Comtois et de Brian Slack. Dans le cas des intrants reliés aux changements climatiques, le Consortium Ouranos (Huard 2014) a quant à lui fourni les scénarios de variation des niveaux d'eau, que nous détaillons dans ce chapitre.

Les chercheurs d'Ouranos ont développé plusieurs scénarios (que nous nommons *what-if* puisqu'il s'agit de leur nomenclature) qui doivent être utilisés par les différents groupes de travail de ce consortium de recherche. Ces scénarios climatiques sont un intrant fondamental dans cette analyse coûts-bénéfices et méritent donc une brève description. Dans le cas du groupe de travail sur le transport maritime, trois scénarios de variations de niveaux d'eau distincts ont été réalisés :

1. Scénario de référence (REF)
2. Scénario *What-If* #1 (WI1)
3. Scénario *What-If* #2 (WI2)

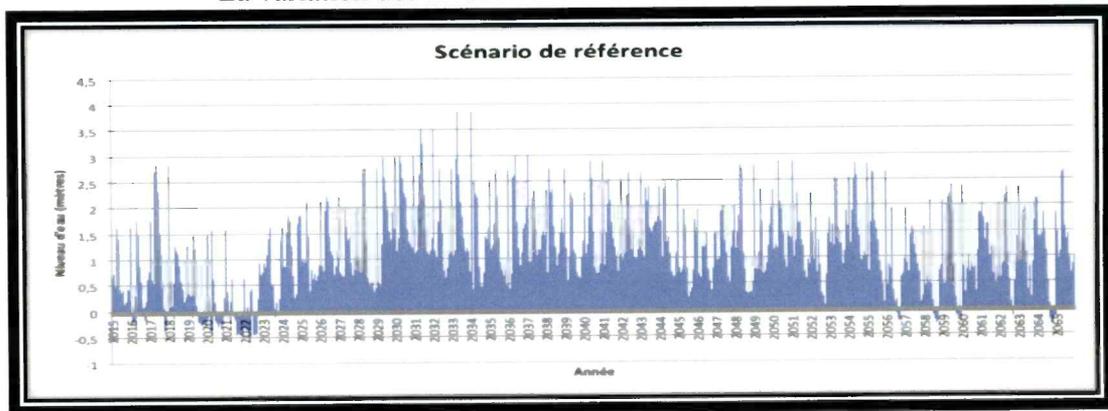
Ces scénarios couvrent la période entre 2015 et 2065. Ils incluent 2400 périodes puisqu'il s'agit de quart de mois. Les niveaux d'eau des scénarios varient autour du zéro des cartes. En résumé, une valeur négative implique une diminution de la profondeur alors qu'une valeur positive implique une augmentation de la profondeur.

## 2.1 Scénario de référence

---

Le scénario de référence utilise les données d'Environnement Canada des débits reconstitués à Sorel. La période utilisée va de 1963 à 2013. Huard (2014) réplique les données des 50 dernières années et les reproduit pour les cinquante prochaines. Le graphique suivant illustre la variation des niveaux d'eau pour chacune des périodes.

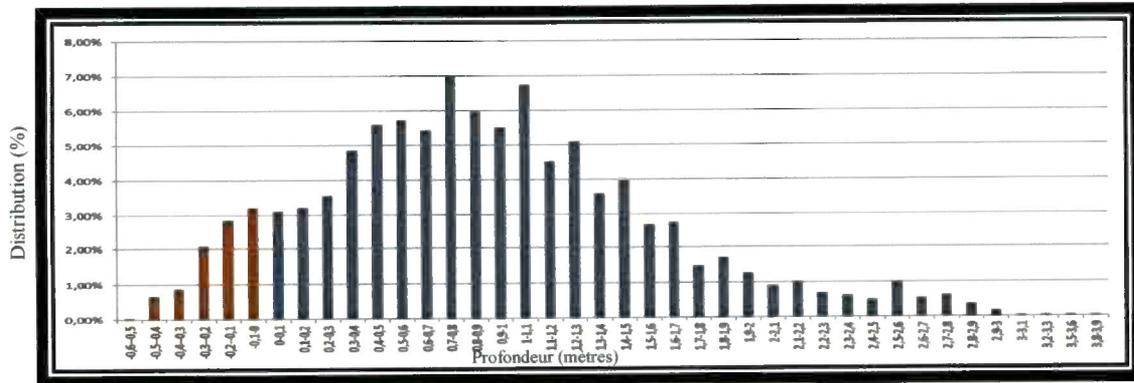
**Graphique 1**  
La variation des niveaux d'eau du scénario de référence



Nous constatons que les périodes de faibles niveaux d'eau se produisent principalement au début de la période avec de plus faibles variations négatives vers la fin. Les variations négatives ne dépassent que très rarement 50 centimètres et ne vont jamais plus bas que 60 centimètres.

Le prochain graphique illustre la distribution des niveaux d'eau pour les cinquante périodes du projet. Les barres rouges représentent le pourcentage d'occurrence de variations négatives de la profondeur.

**Graphique 2**  
Distribution des niveaux d'eau du scénario de Référence

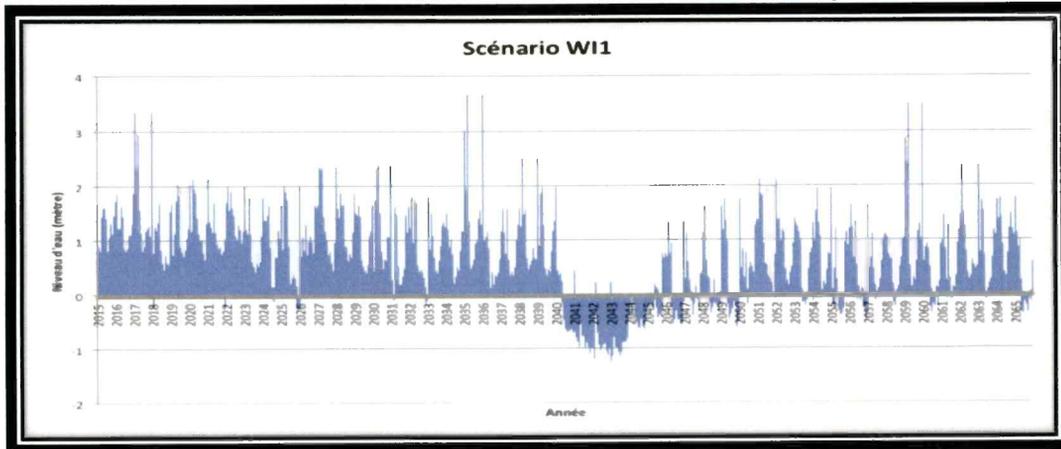


L'amplitude des variations négatives ne dépasse que très rarement 60 centimètres et les plus fréquentes sont 10, 20 et 30 centimètres.

## 2.2 Scénario What-If #1

Ce scénario utilise le scénario chaud et sec de la méthodologie de la Commission Mixte Internationale (CMI). Cette méthodologie est similaire à celle que nous avons évoquée à la section 1.2.2. Les auteurs ont choisi de se limiter au scénario chaud et sec des simulations provenant des modèles globaux. Par la suite, ces simulations climatiques deviennent un intrant des modèles d'estimations de niveaux d'eau des Grands Lacs. Les intrants principaux du modèle sont les températures, les précipitations, le vent, la couverture nuageuse, l'humidité et la radiation. Les modèles hydrologiques permettent de calculer l'évapotranspiration, le ruissellement et le stockage dans les lacs. Par la suite, les auteurs extrapolent ces données pour les niveaux et débits du fleuve Saint-Laurent. Le graphique suivant illustre les variations de niveaux d'eau au cours des périodes à l'étude.

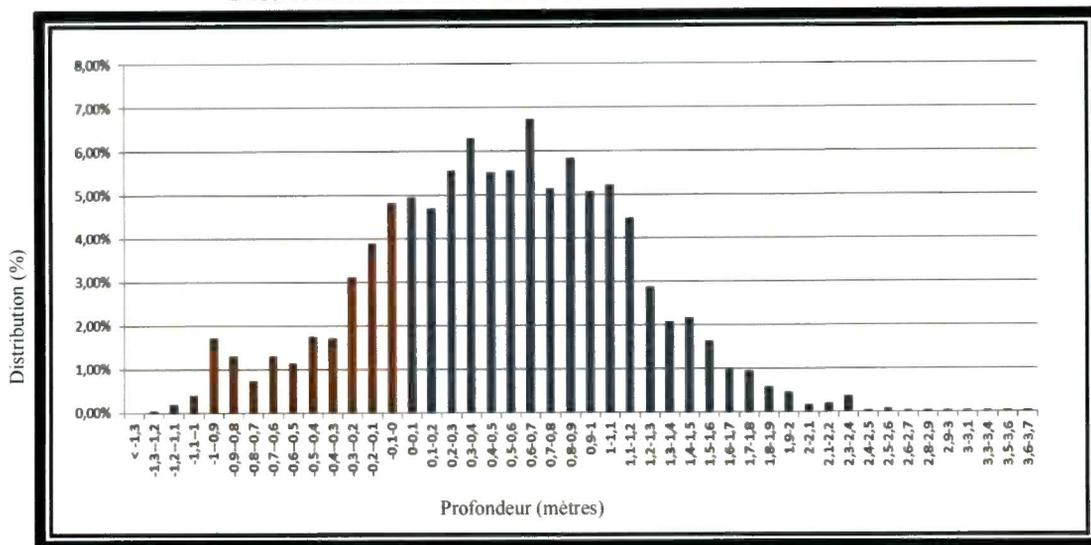
**Graphique 3**  
La variation des niveaux d'eau du scénario *What-if #1*



Nous constatons qu'il y a une importante période de bas niveau d'eau entre les années 2040 et 2050, ce qui aura un impact significatif sur les résultats. Qui plus est, nous remarquons également que plusieurs périodes de bas niveaux d'eau de moindre durée se reproduisent par la suite.

Le prochain graphique présente la distribution des niveaux d'eau pour les cinquante périodes :

**Graphique 4**  
Distribution des niveaux d'eau du scénario *What-if #1*



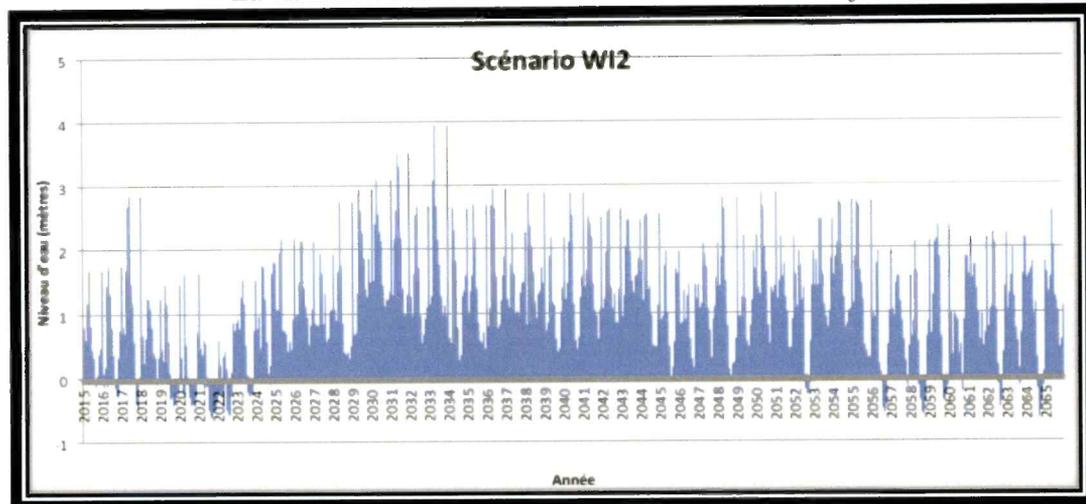
Ce scénario implique des périodes de faibles niveaux d'eau très fréquentes avec des amplitudes pouvant atteindre plus de 50 cm dans plus de 5 % du temps et des variations négatives dans plus de 20% du temps. Nous prévoyons que c'est dans ce scénario que nous observerons les plus grands bénéfices associés aux mesures d'adaptation.

### 2.3 Scénario What-If #2

---

Ce scénario utilise les apports nets aux bassins<sup>9</sup> (Net Basin Supply, NBS) pour déterminer les niveaux et débits futurs du fleuve. Les auteurs considèrent cette méthodologie moins rigoureuse que celle utilisée dans le scénario What-IF #1, mais argumentent que les résultats sont obtenus plus rapidement. Le scénario est construit en appliquant des variations marquées aux débits observés historiquement, bref en accentuant les variations du scénario de référence. C'est-à-dire qu'ils augmentent les apports hivernaux et diminuent les apports estivaux.

**Graphique 5**  
La variation des niveaux d'eau du scénario *What-if #2*

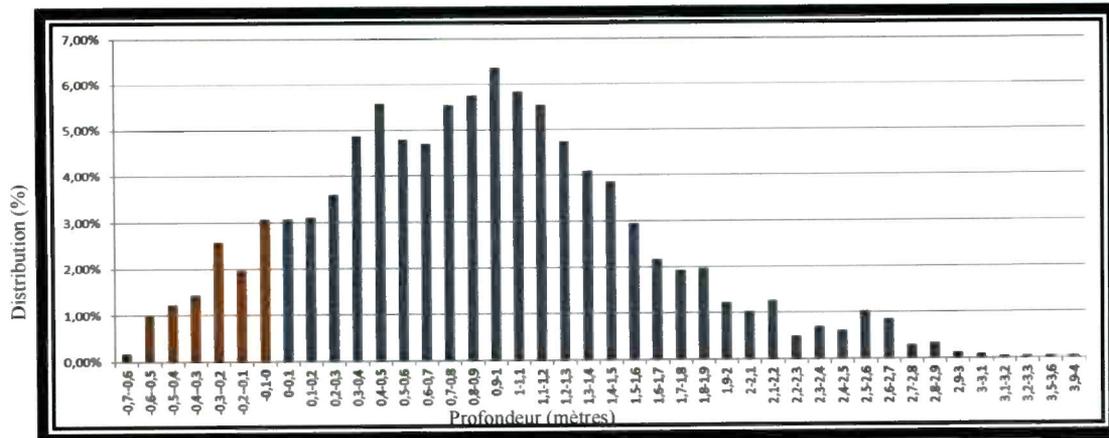


<sup>9</sup> Les apports nets aux bassins consistent de la somme des précipitations moins l'évaporation de surface

C'est sans surprise que nous constatons que les variations de niveaux d'eau se produisent presque dans les mêmes périodes que le scénario de référence, avec toutefois une plus grande amplitude. Cela est cohérent avec la méthodologie utilisée.

Le graphique suivant présente la distribution des niveaux d'eau pour les cinquante années du projet :

**Graphique 6**  
Distribution des niveaux d'eau du scénario What-if #2



Nous constatons que des variations négatives surviennent dans un peu plus de 10% du temps, ce qui est légèrement supérieur aux observations du scénario de référence.

## Chapitre 3 : Revue de littérature

---

Cette revue de la littérature s'intéressera principalement aux bénéfices reliés aux mesures d'adaptation, leurs coûts et également aux études similaires qui ont été menées dans le passé. Nous débuterons par les impacts environnementaux principalement associés au dragage et sur la façon de les monétiser. Par la suite, nous analyserons les différents bénéfices associés aux mesures d'adaptation et comment nous pouvons les quantifier. Nous détaillerons également deux études qui s'approchent de la nôtre de manière à déterminer ce qui les distingue, mais également pour déterminer les points communs.

### 3.1 Les impacts environnementaux

---

Les principaux impacts environnementaux des mesures d'adaptation qui ont été sélectionnées sont principalement le résultat du dragage. En effet, la minimisation du dégagement sous quille est surtout le résultat d'une amélioration technologique et n'implique que très peu de perturbations environnementales.

Le dragage, qu'il soit d'entretien, de capitalisation ou environnemental, est potentiellement disruptif pour l'environnement. Plusieurs facteurs entrent en ligne de compte et plusieurs chercheurs et organismes se sont penchés sur la question. Le dragage spécifique aux activités maritimes est extrêmement fréquent et la majorité des ports mondiaux, peu importe la taille, y ont recours périodiquement. De manière générale, ces activités surviennent pour permettre la navigation sécuritaire de la flotte actuelle ou pour permettre la navigation de plus grands bateaux dans le cas de dragage de capitalisation.

L'analyse environnementale du dragage varie grandement entre les autorités portuaires, les pays et les régions du monde. Nous utiliserons principalement de la littérature scientifique canadienne et québécoise sur le sujet. En effet, plusieurs

analyses environnementales exhaustives ont déjà été effectuées. Nous contre-vérifions néanmoins ces résultats avec une étude française sur le sujet (GÉODE, 2012).

Selon Les Consultants Jacques Bérubé inc. (1994), MPO (1997), CJB Environnement Inc. (2006), Rieussec (2008) et Bouchard (2014), les impacts environnementaux potentiels sont :

1. La dégradation de l'environnement sonore;
2. La détérioration de la qualité de l'air;
3. La détérioration de la qualité de l'eau;
4. La contamination des sédiments; et
5. Les impacts négatifs sur la faune et la flore aquatique.

### 3.1.1 La dégradation de l'environnement sonore

Le dragage de sédiments en milieu maritime entraîne systématiquement une dégradation de l'environnement sonore pendant la construction. Cet effet provient de l'activité des dragueuses et des camions qui transportent les sédiments dragués, s'ils doivent être transportés par voie terrestre. Néanmoins, le dragage sur le Saint-Laurent implique généralement le rejet en eau libre, ce qui vient réduire drastiquement le potentiel d'inconfort sonore. Selon Rieussec (2008), cet impact est passager et peu important.

### 3.1.2 La dégradation de la qualité de l'air

Les transports maritime, ferroviaire et routier sont les sources les plus importantes de gaz à effet de serre. Les GES sont la principale cause probable du réchauffement climatique terrestre (GIEC, 2014). L'opération de dragage en soi ne représente pas un élément important de la détérioration de la qualité de l'air. En effet, même si l'opération nécessite beaucoup de carburant, cela reste extrêmement marginal au

niveau global. Selon Rieussec (2008), les émissions de CO<sub>2</sub> des activités de dragage ne représenteraient que 0.0005 % des émissions totales émises par le transport maritime. Ce dernier est cependant responsable de 1,1 % des émissions de GES québécoises (MDDELCC, 2015).

### 3.1.3 La dégradation de la qualité de l'eau

Au niveau 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 possible 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 comme potentiellement problématique.

### 3.1.4 La contamination des sédiments

Le chenal de la voie maritime du Saint-Laurent est à plusieurs endroits principalement constitué de sédiments fins comme le silt ou l'argile (Les Consultants Jacques Bérubé inc., 1994). Ces sédiments sont particulièrement propices à l'accumulation de polluants puisque ces fines particules ont tendance à s'amalgamer avec les polluants. Il est donc possible que certaines portions de la voie maritime, qui doivent être draguées dans le contexte de baisse des niveaux d'eau, seraient considérées comme un site pollué qui doit être restauré. Dans ces situations, des précautions et des procédures supplémentaires doivent être prises, ce qui augmente sensiblement les coûts. Lorsque ces contaminants sont remis en dépôt dans une autre section du fleuve, il peut y avoir une modification de la qualité chimique de l'eau et des sédiments. Ultiment, cela a un impact sur les habitats de la faune et la flore (Bouchard, 2014).

### 3.1.5 Les impacts sur la faune et la flore aquatique

#### — *Végétation aquatique* —

Les effets sur la végétation aquatique sont généralement considérés comme marginaux si les activités de dragage sont situées suffisamment loin des côtes (Rieussec, 2008).

#### — *Faune benthique et ichthyenne* —

La faune benthique inclut les mollusques, les éponges, etc. C'est la faune qui vit au fond du fleuve. Il semblerait que l'effet à long terme du recouvrement du fond marin, et donc de cette faune, dépend de la taille du projet (Rieussec, 2008). En effet, ce type de faune recolonise généralement les sédiments après une certaine période de temps. Cependant, il n'est pas exclu que le dragage en question dans cette étude ait un effet disruptif important sur les habitats de la faune benthique étant donné la taille du projet potentiel.

L'impact sur les poissons (faune ichthyenne) dépend principalement de la qualité de l'eau et du changement de composition des sols dû au rejet des sédiments en eau libre. La mobilité des poissons diminue sensiblement l'exposition des différentes espèces aux effets du dragage (Rieussec, 2008). Néanmoins, le dragage peut avoir un effet néfaste sur les habitats.

#### — *Faune avienne* —

L'impact sur les oiseaux des activités de dragage est considéré comme marginal, peu importe la taille d'un projet (Rieussec, 2008). En effet, les oiseaux s'habituent rapidement à la présence des dragues et des bateaux de transport.

## **3.2 La valeur monétaire des coûts environnementaux**

---

L'évaluation des coûts environnementaux du dragage est l'une des contributions importantes que nous nous efforcerons d'apporter avec ce mémoire.

L'attribution d'une valeur monétaire à des impacts environnementaux permet de mettre en relation des coûts et des bénéfices et ainsi analyser des projets de manière objective. Plusieurs études ont quantifié les coûts monétaires des impacts environnementaux cités dans la section précédente. Ces études n'étaient pas nécessairement exclusives aux opérations de dragage. Les analyses coûts-bénéfices qui intègrent l'ensemble des coûts environnementaux sont assez rares. Lorsqu'ils sont pris en considération, soit un seul élément est pris en compte ou un ratio augmentant les coûts de construction est utilisé.

### 3.2.1 La biodiversité marine

Les études quantifiant les impacts sur la biodiversité marine agrègent généralement la faune et la flore. Ils attribuent par exemple des valeurs différentes à chacun des habitats.

Beaumont et al. (2008) présentent plusieurs méthodes de monétisation des impacts environnementaux sur la biodiversité marine provenant de la littérature. Ils proposent par exemple d'utiliser la valeur marchande des produits qui seront affectés par la pollution marine. Ils utilisent également des méthodes d'évaluation contingente et de coûts d'évitement<sup>10</sup> pour quantifier certains services disponibles en provenance de la biodiversité marine. Bref, les auteurs avancent une méthode d'évaluation pour chaque élément de la biodiversité marine qui pourrait être affecté par diverses sources de pollution, tout en prévenant le lecteur que certains éléments ne peuvent être monétisés, comme la résistance et la résilience d'un écosystème, ou l'héritage culturel. À titre d'exemple, ils considèrent que la fourniture de nourriture par l'environnement marin a une valeur de 513 M de livres sterling (2004) par année pour l'ensemble du territoire britannique, en utilisant une approche de marché. Plus près de

---

<sup>10</sup> L'évaluation contingente vise à attribuer une valeur à des biens non-marchands grâce, par exemple, à des questionnaires pour déterminer le consentement à payer des individus pour conserver ce bien. La méthode des coûts d'évitement, comme son nom l'indique, cherche à estimer les coûts qui sont évités par des actions présentes de conservation ou d'entretien.

nos besoins, ils estiment par évaluation contingente que la valeur de ne pas utiliser la biodiversité marine est comprise entre 0,5 et 1,1 trillion de livres sterling (2004) par année. Ils concluent leur recherche en discutant une valeur monétaire unique par hectare d'écosystème affecté. En citant des travaux précédents, ils avancent une valeur de 252 \$ US/Hectare. Certains scientifiques ont critiqué ces résultats en justifiant que cette valeur n'est pas nécessairement applicable à tous les systèmes maritimes. En effet, le résultat provient d'une étude sur une section d'océan, et la généralisation peut s'avérer problématique. Néanmoins, cette technique propose des avantages de simplicité évidents. Dans notre situation, l'utilisation de ce type de valeur pour monétiser les coûts environnementaux du dragage n'est pas nécessairement applicable étant donné la plus faible biodiversité marine au chenal de navigation du fleuve Saint-Laurent relativement aux autres environnements du fleuve (De la Chenelière et al. 2015).

Costanza et al. (1997) entreprennent la gigantesque tâche d'attribuer une valeur monétaire à chaque hectare, pour chaque année, d'un habitat. Cette étude s'intéresse aussi bien aux habitats terrestres que marins. Pour arriver à ces résultats, ils ont rassemblé toutes les études disponibles sur le sujet et les ont agrégées. Les auteurs comprennent les défauts méthodologiques de cette approche, mais expliquent qu'il s'agit d'un cadre d'analyse et d'un point de départ. Ils attribuent par exemple une valeur de 8 498 US \$ (1994) à un hectare de biodiversité disparu par année pour une rivière ou un fleuve. Dans notre cas, cette valeur est probablement surestimée étant donné la biodiversité plus faible du chenal de navigation par rapport aux autres environnements (De la Chenelière et al. 2015).

La manière d'inclure les coûts environnementaux varie d'une étude à l'autre. Par exemple, dans un article sur un projet de voie navigable au Paraguay, les auteurs prennent en considération que les coûts environnementaux vont augmenter les coûts de construction (Bucher et Huszar, 1995). Cette manière de faire présente l'avantage d'inclure les impacts environnementaux dans l'analyse coûts-bénéfices, mais il n'y a pas de quantification précise, seulement un ratio d'augmentation appliqué aux coûts

de construction. Dans une étude sur le projet de dragage et d'agrandissement du port de Gladstone en Australie (Economic Associates Ltd, 2009), les auteurs incluent les coûts environnementaux dans leur analyse, mais se limitent aux dommages directs et indirects sur les habitats. Ils utilisent les valeurs de Costanza et al. (1997). Dans le projet de Gladstone, la destruction d'habitat est significative et permanente puisqu'il s'agit d'un projet d'agrandissement.

Au Canada, le ministère des Pêches et Océans (MPO) oblige les promoteurs de projets qui détruisent des habitats marins à créer des habitats de compensation (Alexander et al., 2010). Des coûts devront donc être calculés si 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) analysent 124 projets de compensation d'habitats ordonnés par le MPO. Parmi ces projets, 80 ont eu lieu dans un chenal de rivière pour un total d'environ 350 000 m<sup>2</sup> de surface compensatoire. Les coûts moyens de compensation environnementale des habitats de poissons sont de 85 \$/m<sup>2</sup> et, dans 80 % des cas, le nombre de m<sup>2</sup> de l'habitat de compensation est deux fois plus grand que la surface de l'habitat affectée. Il y a cependant beaucoup de variabilité dans les superficies et les coûts. Ces derniers peuvent varier entre 0,24 \$ et 1074 \$. Il s'agit d'une méthode alternative d'évaluer les coûts environnementaux.

### 3.2.2 La contamination des sédiments

La décontamination des sédiments contaminés est un aspect fondamental pour préserver la qualité de l'eau et les habitats fauniques. Nous devons donc envisager la possibilité qu'il y ait des sédiments contaminés dans le chenal de navigation, et comme le mentionne Les Consultants Jacques Bérubé Inc. (1994) : « Il faut donc prévoir des mesures de sécurité très précises destinées à limiter les impacts environnementaux tant au site d'extraction que durant le transport, le traitement ou la

mise en dépôt des déblais de dragage.<sup>11</sup> ». Nous comprenons donc que la décontamination de sédiments est une procédure coûteuse. Wasserman et al. (2013) utilisent des coûts de dragage environnementaux de 22,39 US \$/m<sup>3</sup> (2010) selon des données du corps des ingénieurs de l'armée américaine (USACE). Les auteurs utilisent des coûts de 14,40 US \$/m<sup>3</sup> pour des sédiments non contaminés. En termes de ratio, cela signifie que les coûts de draguer un mètre cube de sédiments contaminés est 55 % plus dispendieux que de draguer des sédiments non contaminés. Il est toutefois possible d'observer une plus grande variabilité dans les coûts, comme le mentionne D'Arcy et al.(2005) qui estiment des coûts pouvant aller jusqu'à 100 \$/m<sup>3</sup> sans les coûts de décontamination.

### 3.2.3 Les émissions de gaz à effet de serre

La monétisation des gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone a fait l'objet de recherches exhaustives sur le sujet. Il s'agit d'une externalité négative extrêmement importante de la consommation d'énergie fossile. La production locale d'une tonne de gaz à effet de serre a un coût social global. La méthodologie la plus fréquemment utilisée pour estimer le coût d'une tonne de carbone par exemple est le coût social du carbone (*social cost of carbon, SCC*). Le calcul du SCC repose sur des modèles d'évaluations intégrées (*integrated assessment models (IAM)*). La valeur utilisée aux États-Unis repose sur trois modèles IAM, le FUND, le DICE et le PAGE. Ces trois modèles ont été élaborés au début des années 1990. De manière succincte, ces modèles transforment les émissions en concentrations de gaz à effet de serre, les concentrations en changement de température et les changements de température en dommages économiques (Greenstone, Kopits et Wolverton, 2011). En 2010, la valeur du SCC du gouvernement américain était de 21 US \$ par tonne avec des analyses de sensibilité devant être faites à 5 \$, 35 \$ et 65 \$. Ces valeurs ont par la suite été revues à la hausse en 2013 pour atteindre 33 \$ par tonne de carbone (Interagency Working Group on Social Cost of Carbon, 2013). Au Québec, la monétisation des émissions de

---

<sup>11</sup> Les Consultants Jacques Bérubé Inc., 1994, p. 6

gaz à effet de serre représente également un enjeu de taille. Il s'agit d'une pratique courante dans l'analyse économique des projets de transport (Ferland, 2006). Dans cette dernière étude, les coûts obtenus sont très semblables à ceux émergeant des recherches américaines.

Il existe également une autre approche pour monétiser les coûts sociaux du carbone. Il s'agit d'une approche dite indirecte qui cherche à déterminer le prix d'une tonne de carbone grâce aux comportements observés dans une industrie déjà réglementée. C'est le *shadow price of carbon policy*. C'est le cas notamment dans les situations où il existe des permis d'émission qui peuvent être échangés sur les marchés. Le prix du permis devient un proxy pour le coût social d'une tonne de carbone. Mandell (2011) mentionne plusieurs autres auteurs qui ont critiqué cette méthode puisque les prix obtenus peuvent être le résultat de décisions politiques. Qui plus est, il conclut en mentionnant que cette méthode est peu applicable au monde du transport étant donné sa faible réglementation relative en termes de permis d'émission. Ce prix doit plutôt être dérivé des politiques publiques visant à réduire les émissions de GES, ce qui s'avère être un exercice moins précis.

#### 3.2.4 Les fenêtres environnementales

Les fenêtres environnementales sont les périodes pendant lesquelles les impacts du dragage sur l'environnement sont minimisés, en raison par exemple des conditions climatiques ou des comportements des différentes espèces de poissons. Le fait de draguer à des périodes précises peut entraîner des coûts économiques supplémentaires (DOER, 1998), mais permet de minimiser les coûts environnementaux. Les projets québécois adhèrent à cette philosophie, ce qui réduit les effets perturbateurs sur l'environnement.

### 3.3 Les avantages économiques

---

Le dragage des voies maritimes ou les améliorations technologiques telles que la minimisation du dégagement sous quille pour maintenir ou augmenter la profondeur d'un chenal produisent des impacts économiques positifs indéniables. Ceux-ci sont nombreux et sont souvent agrégés dans les analyses économiques de tels projets. Qui plus est, ils sont souvent reliés entre eux.

#### *3.3.1 La diminution des coûts de transport*

La plus grande profondeur dans un chenal de navigation permet le passage de plus gros navires. L'industrie maritime est un secteur où les rendements d'échelles sont très importants. La tendance n'est donc plus dans l'augmentation de la fréquence, mais plutôt dans l'augmentation de la taille des bateaux pour réduire les coûts unitaires. De plus, des chenaux plus profonds réduisent les délais et les coûts qui y sont associés (USACE, 2002).

#### *3.3.2 Le maintien de l'activité économique*

Dans le contexte d'une baisse des niveaux d'eau associés aux changements climatiques, la perte de capacité des navires entraîne une baisse de l'activité économique régionale. Il s'agit d'une perte en termes d'activité économique directe ou indirecte, d'une perte de revenus et d'emplois (Dorling et al. 2014 ; Comtois et Slack, 2014a ; Les Conseillers ADEC, 2012 ; Ryan, 2013). Un autre gain d'activité économique inclut d'éviter le déplacement d'une portion des parts de marché d'un port vers l'autre (Bückmann et al. 2005).

### 3.3.3 L'augmentation de la sécurité

La plus grande profondeur d'un chenal réduit considérablement les risques d'accidents et d'échouement de bateaux (USACE, 2002 et 2014).

### 3.3.4 L'utilisation secondaire des sédiments de dragage

Dans le cas des projets de dragage, il existe principalement une catégorie de bénéfices intangibles potentiels. Comme le mentionnent Grigalunas et Opaluch (2003), dans une analyse critique du rapport du Corps des ingénieurs de l'armée américaine sur l'augmentation de la profondeur de la rivière Delaware (USACE, 2002), les sédiments dragués peuvent être utilisés dans d'autres projets. Dans ce cas, c'est notamment pour la revitalisation d'une plage et la protection d'une zone sensible. Les sédiments dragués dans le Saint-Laurent sont généralement déplacés vers une zone plus profonde du chenal, ce qui empêche une utilisation secondaire.

### 3.4 La valeur monétaire des avantages économiques

---

Nous avons recensé plusieurs analyses coûts-bénéfices qui quantifiaient monétairement les avantages économiques. Il s'agit principalement d'études américaines et de quelques études australiennes. Le tableau suivant associe les études aux corridors maritimes ou ports analysés.

**Tableau 2**  
Liste des analyses coûts-bénéfices étudiées

<i>Études</i>	<i>Sujet</i>
Bureau of Transport Economics (1975)	Amélioration du port Pirie (Australie)
Waxmonsky (1997)	Dragage de ports des Grands Lacs
Waxmonsky (1999)	Dragage du port Érié
USACE (2002)	Dragage de la rivière Delaware
Economic Associates (2009)	Dragage du port de Gladstone (Australie)
Ryan (2013)	Dragage de la rivière Mississippi
USACE (2014)	Dragage du port de Portsmouth

À la lumière de nos lectures, il semble y avoir deux méthodologies prépondérantes. L'une d'entre elles utilise principalement les coûts de transport sauvés comme bénéfice économique principal. L'autre méthodologie utilise plutôt le maintien ou l'augmentation de l'activité économique comme avantage prépondérant. Dans l'une ou l'autre des méthodologies, les marchandises sont comptabilisées différemment.

L'étude du Bureau of Transport Economics (1975) considère que les bénéfices monétaires incluent l'augmentation du transport de marchandises et un gain relatif de part de marché pour certaines marchandises comme le grain. Dans les analyses coûts-bénéfices de Waxmonsky (1997, 1999), ce dernier prend uniquement en considération les coûts de transport sauvés. Il fait cet exercice pour plusieurs types de marchandises et pour plusieurs profondeurs différentes. Dans le cas des études du Corps des

ingénieurs de l'armée américaine (USACE, 2002, 2014), ces derniers considèrent également les coûts de transport sauvés. Ils mentionnent aussi une utilisation secondaire des sédiments de dragage sans toutefois les quantifier.

L'analyse économique du projet de dragage et d'agrandissement du port de Gladstone en Australie présente plusieurs éléments intéressants (Economic Associates Ltd, 2009). Les bénéfices incluent le consentement à payer (CAP) de la part des firmes pour l'utilisation des services du port et la valeur des nouveaux terrains créés par l'utilisation secondaire des sédiments. Pour déterminer le CAP, les auteurs du rapport utilisent comme proxy les taxes d'utilisation du port, en moyenne 2,75 \$ par tonne supplémentaire. Cette manière de procéder sous-entend que le projet générera des exportations accrues, et donc une augmentation de l'activité économique. Dans une étude de 2013 sur le dragage de capitalisation de la rivière Mississippi (Ryan, 2013), l'auteur estime que la profondeur supplémentaire entrainera une augmentation du volume de marchandises et une augmentation de l'activité économique. À titre de bénéfices, il considère l'augmentation des dépenses, les taxes, l'augmentation des revenus des citoyens et la création d'emploi. L'étude de Dorling et al. (2014) utilise également une méthodologie basée sur le maintien de l'activité économique, nous en discutons davantage dans la prochaine section.

### **3.5 Les études spécifiques à la voie navigable du Saint-Laurent**

---

Dans le cas du système maritime Grands Lacs Saint-Laurent, un nombre important d'études s'est penché sur les conséquences économiques et environnementales des mesures d'adaptation. Cela s'explique par l'importance fondamentale du réseau dans l'économie canadienne et américaine. Nous trouvons une certaine dichotomie entre les études à prépondérance économique et celles à connotation plus environnementale. Millerd (2005, 2011) est un auteur prolifique sur les coûts économiques de l'impact des changements climatiques sur les Grands Lacs. Ses contributions nous seront utiles à titre de comparaison, bien que la société

concernée ne soit pas tout à fait la même. Il soulève quelques mesures d'adaptation de même que les coûts opérationnels qui y sont associés. Au niveau de l'analyse environnementale des conséquences associées au dragage, nous disposons d'une gamme importante d'informations puisque chaque nouveau projet de dragage doit faire l'objet d'une analyse environnementale (Les Consultants Jacques Bérubé inc. 1994; CJB Environnement Inc. 2006; Rieussec 2008).

Nous disposons également d'études exhaustives sur l'impact des changements climatiques sur le système hydrologique Grands Lacs Saint-Laurent. Nous utiliserons ces études pour comparer nos résultats en ce qui a trait aux scénarios hydrologiques, aux mesures d'adaptations et aux coûts économiques.

La première est une étude assez récente qui s'intéresse à l'impact des bas niveaux d'eau occasionnés par les changements climatiques dans le bassin hydrologique des Grands Lacs canadiens (Dorling et al., 2014). C'est une recherche exhaustive des impacts économiques causés par les changements climatiques. Les auteurs quantifient donc les conséquences de la fluctuation des niveaux d'eau sur plusieurs industries et sur les consommateurs. Par exemple, ils s'intéressent aux activités maritimes récréatives, à la génération d'hydroélectricité, à la valeur des maisons et au transport commercial. Nous sommes évidemment intéressés par leurs résultats qui touchent le transport commercial maritime. Ils établissent les pertes économiques associées à la baisse des niveaux d'eau à 1.98 milliard de dollars d'ici 2050. Ces pertes proviennent principalement de la perte de capacité de transport de marchandises et de l'augmentation des coûts d'entretien. Notre recherche diffère de la leur parce que la société que nous étudions est plus réduite et parce que nous nous intéressons prioritairement aux mesures d'adaptation, étant donné les impacts des changements climatiques. Leur recherche est donc une analyse de la mesure d'adaptation *ne rien faire*.

Une deuxième étude se rapproche davantage de ce que nous tentons d'amener comme contribution (D'Arcy et al. 2005). Les auteurs s'intéressent au même sujet que dans la première étude, mais l'abordent avec un angle complètement différent. Il

s'agit d'une étude plus technique qu'économique, bien que les auteurs s'attardent sur la question des coûts de construction et d'entretien. En première partie, les auteurs évaluent l'amplitude et la localisation géographique de la baisse appréhendée des niveaux d'eau sur le Saint-Laurent. Dans l'un de leurs scénarios pessimistes, les auteurs estiment une baisse de plus d'un mètre à Montréal et de 30 cm à Trois-Rivières. Qui plus est, la baisse des niveaux d'eau ne serait problématique qu'à l'ouest de Bécancour, ce qui semble cohérent avec les scénarios que nous utiliserons et qui justifieraient, selon nous, le recours au dragage dans certaines parties du fleuve. En deuxième partie, les auteurs séparent les scénarios en trois amplitudes de fluctuations possibles. À partir de ces scénarios, ils envisagent des mesures d'adaptation différentes selon l'amplitude des variations. Pour une baisse de plus de 15 cm, ils considèrent le dragage comme étant un outil possible. Au-delà de 50 cm, ils envisagent plutôt une réorganisation des activités portuaires et maritimes. Pour ce qui est de l'estimation des coûts, ils situent les coûts approximatifs du dragage pour l'ensemble du projet entre 42 et 70 millions de dollars (\$2005) en excluant les coûts environnementaux. Ils soulèvent également la possibilité d'un transfert par les compagnies maritimes, de leurs activités vers un port de la côte est, ce que nous souhaitons éviter. Cette étude reste cependant très technique et ne prend pas nécessairement en compte tous les bénéfices des mesures d'adaptation, de même que l'ensemble des coûts<sup>12</sup> associés à la mesure d'adaptation qu'est le dragage. Nous remédierons à cette situation dans notre étude, qui sera moins technique et plus économique.

### **3.6 La situation concurrentielle du port de Montréal**

---

La standardisation progressive du transport maritime et l'intégration presque complète des ports dans les chaînes logistiques mondiales rendent ceux-ci de plus en plus substituables entre eux. L'apparition du conteneur est la principale cause de cette homogénéisation des ports entre eux. Cette situation est notamment observée dans les

---

<sup>12</sup> Les coûts de décontamination et les coûts de compensation d'habitats par exemple.

ports du Nord de l'Europe (Notteboom, 2009) et en Amérique du Nord (O'Keefe, 2003). La concurrence entre les ports se joue maintenant en termes de coûts, de l'efficacité de l'intermodalité et non plus seulement uniquement sur la taille de l'arrière-pays d'un port (Wan, Zhang et Yuen, 2013). C'est vraiment la capacité d'accéder à l'arrière-pays qui est cruciale (Zhang, 2008). L'intégration des ports dans les chaînes de valeur mondiale est critique pour le succès et la croissance d'un port (Magal et Sammons, 2008).

Cette situation est particulièrement observable dans la relation du port de Montréal avec ses concurrents (Guy et Urli, 2006). Comme le mentionne O'Keefe (2003), Montréal reste une porte d'entrée importante, mais perd du terrain au profit de New York qui dispose de capacités financières plus importantes. La position géographique avantageuse du port de Montréal dans l'axe origine-destination Amérique du Nord – Europe a cependant des implications en termes de positionnement dans les autres marchés. (Guy et Alix, 2007). Par exemple, le port de Montréal est éloigné des ports asiatiques et des marchés émergents de l'Amérique du Sud et de l'Afrique. Également, en raison de sa situation de port océanique en milieu fluvial, la capacité de réagir à l'augmentation graduelle de la taille des bateaux est limitée (Guy et Alix, 2007). Cette situation géographique particulière implique également que les bateaux en provenance de l'étranger, mais surtout de l'Europe, sont complètement chargés et déchargés à Montréal. Malgré la petite taille du marché québécois, la qualité des liens ferroviaires reliant le Midwest est suffisamment grande pour augmenter l'attractivité du port.

Il n'en demeure pas moins qu'un changement de conditions concurrentielles a un impact potentiel sur les parts de marchés d'un port. Dans un article présentant un modèle de parts de marché en Europe du Nord, Bückmann et al. (2005) trouvent que la part du port d'Anvers serait de 32 % au lieu de 24 % si les coûts de résistance de l'accès au port étaient nuls. Ces coûts incluent par exemple la réduction obligatoire de la vitesse. Les parts de marché sont très sensibles à une augmentation des coûts

comme Veldman et Bückmann (2003) le montraient dans une autre application de leur modèle.

Dans un contexte nord-américain, Luo et Grigalunas (2002) estiment la part de marché d'un port à conteneurs hypothétique au Rhode Island, sur la côte Atlantique. Les auteurs mentionnent l'importance d'ajouter les ports de Montréal et d'Halifax dans l'analyse concurrentielle. Lorsqu'ils le font, les auteurs trouvent que ces ports pourraient accaparer plus de 600 000 EVP au port de NYNJ sous certaines conditions du modèle. Les raisons principales étant que Montréal est plus près de l'Europe et des marchés du Midwest américain. Ces résultats sont conséquents avec ceux de Guy et Urli (2006). Dans cette étude, les auteurs établissent que les compagnies maritimes ont une préférence pour installer des activités dans ces deux centres portuaires, Montréal et NYNJ. Malgré la plus petite taille de Montréal et la moins grande profondeur, les auteurs suggèrent que la qualité du lien intermodal et l'accès plus rapide au Midwest américain expliquent pourquoi les compagnies maritimes continuent d'avoir plusieurs liaisons directes avec Montréal. Les auteurs soulignent que, bien que Montréal soit généralement considérée comme un marché distinct, il ne faut pas oublier que les conteneurs transigeant par le port le font à travers l'arrière-pays très concurrentiel du port de NYNJ.

### 4.1 Le cadre d'analyse

---

De manière à bien analyser la problématique et prendre la majorité des éléments en considération, nous avons choisi d'adopter une approche de type analyse coûts-bénéfices. Nous considérons que ce sera une analyse *ex ante*. Nous justifions cette décision par le fait que l'impact des changements climatiques se fera sentir dans plusieurs années, mais les mesures d'adaptation doivent être implantées prochainement. L'un des éléments que nous trouvons regrettables dans les études que nous avons consultées est l'absence fréquente de la considération environnementale. Nous pallierons cette situation dans notre analyse en utilisant les ressources d'informations environnementales à notre disposition pour identifier les impacts et les monétiser, le cas échéant. De manière générale, une analyse coûts-bénéfices détermine la pertinence d'un projet de la manière suivante :

$$VAN = \sum_{t=1}^T \frac{B_t - C_t}{(1+r)^t}$$

où  $VAN$  est la valeur actuelle nette;

$B_t$  est la somme des bénéfices au temps  $t$  ;

$C_t$  est la somme des coûts au temps  $t$  ; et

$r$  est le taux d'actualisation.

Cette méthodologie nous permettra de comparer la rentabilité entre les différents scénarios et projets, de manière à sélectionner le plus viable. Les scénarios de changements climatiques utilisés sont décrits au chapitre 2. Les sections suivantes expliqueront les composantes de la formule de la valeur actuelle nette et les particularités méthodologiques d'une analyse coûts-bénéfices.

## **4.2 Société cible**

---

De manière à déterminer la société cible, et donc l'étendue de notre étude, nous devons préalablement déterminer qui sera affecté par la variation des niveaux d'eau et à quel degré, et qui sera affecté par les mesures d'adaptation. Les utilisateurs principaux de la voie navigable du Saint-Laurent sont les compagnies de transport maritime, les plaisanciers et les compagnies de transport de passagers. Les plaisanciers ne seront que très peu affectés par les baisses de niveau d'eau puisque le dégagement sous quille nécessaire pour les bateaux récréotouristiques est faible. La fluctuation des niveaux d'eau affectera donc principalement le transport maritime de marchandises. Une baisse des niveaux d'eau occasionnera une hausse des coûts de transport, qui se reflètera dans le prix des produits et dans une perte d'activités économiques à la fois pour le port de Montréal et pour l'état québécois à cause d'une baisse relative du transport maritime. Les bénéfices ne sont donc pas limités à la société québécoise puisque les compagnies maritimes qui sauvent des coûts de transport peuvent être étrangères. D'un point de vue environnemental, le dragage a le potentiel d'affecter la société québécoise vivant le long du fleuve Saint-Laurent à des degrés variables. En effet, le dragage peut causer des répercussions environnementales néfastes. D'un autre côté toutefois, la réduction des émissions polluantes affectera l'ensemble de la planète. Nous considérerons donc la société mondiale dans cette étude puisque la réduction des émissions de GES est bénéfique pour tous.

## **4.3 Le projet de référence**

---

Contrairement aux études qui visent à analyser l'impact d'approfondir un système de navigation, nous nous intéressons plutôt aux mesures d'adaptation qui permettent de maintenir le niveau actuel. Malgré cette subtilité, l'idée globale reste la même, une situation sans projet et une situation avec projet. Nous considérons que le projet de référence soit la situation sans projet, ou plutôt la mesure d'adaptation

*accepter les pertes.* Nous comparerons ce projet de référence avec la situation où le projet de dragage ou le projet de minimisation du dégagement sous quille sont effectués. Finalement, cet exercice devra être fait pour les trois scénarios de changements climatiques qui ont été décrits au chapitre 2.

#### **4.4 L'horizon temporel**

---

L'impact des changements climatiques sur la voie navigable du Saint-Laurent sera ressenti sur un horizon temporel important, mais qui ne pourrait être observable que d'ici une ou plusieurs dizaines d'années. La nécessité de se prémunir contre de tels impacts est cependant très actuelle. Nous utiliserons un horizon temporel de 50 ans pour être cohérents avec les scénarios de changements climatiques qui vont jusqu'en 2065.

#### **4.5 Le taux d'actualisation**

---

La sélection d'un taux d'actualisation approprié est fondamentale dans une analyse coûts-bénéfices. La répartition des coûts et des bénéfices se fait sur plusieurs années, cinquante dans ce cas-ci, et la valeur temporelle de ceux-ci est différente en fonction des années. Le principe de base derrière le taux d'actualisation est qu'il existe une préférence temporelle pour la consommation présente plutôt que future (Secrétariat du Conseil du Trésor du Canada, 2007). Ce même Secrétariat du Conseil du Trésor (SCT) suggère l'utilisation d'un taux d'actualisation de 8 %, calculé par Jenkins et Kuo (2007). Ce taux est le résultat d'une moyenne pondérée du taux de rendement de l'investissement reporté, du taux d'intérêt (net d'impôt) sur l'épargne intérieure et du coût marginal des entrées de capitaux étrangers supplémentaires.

Dans une étude de 2010, Boardman et al. suggèrent d'entrée de jeu que le taux d'actualisation proposé par le SCT serait surestimé de manière substantielle. En utilisant la même méthodologie que Jenkins et Kuo (2007), les auteurs estiment plutôt

un taux d'actualisation de 5 %. Les auteurs remettent aussi complètement en question la méthodologie du SCT en argumentant que le taux d'actualisation devrait plutôt refléter la volonté d'échanger de la consommation future pour de la consommation actuelle. C'est ce qu'ils appellent le taux d'intérêt de consommation (CRI). De façon à déterminer ce taux, les auteurs maximisent une fonction d'utilité sociale intertemporelle où le CRI est la valeur qui égalise deux unités de consommation à travers le temps. Dans le cas d'un projet de 50 ans et moins qui ne crée pas d'effet d'éviction des investissements privés, les auteurs recommandent l'utilisation d'un taux de 3,5 % avec des analyses de sensibilité à 2,5 et 7 %. C'est effectivement notre cas et c'est le taux d'actualisation que nous utiliserons (Boardman et al., 2010).

## **4.6 Estimation des coûts**

---

### *4.6.1 Investissement initial*

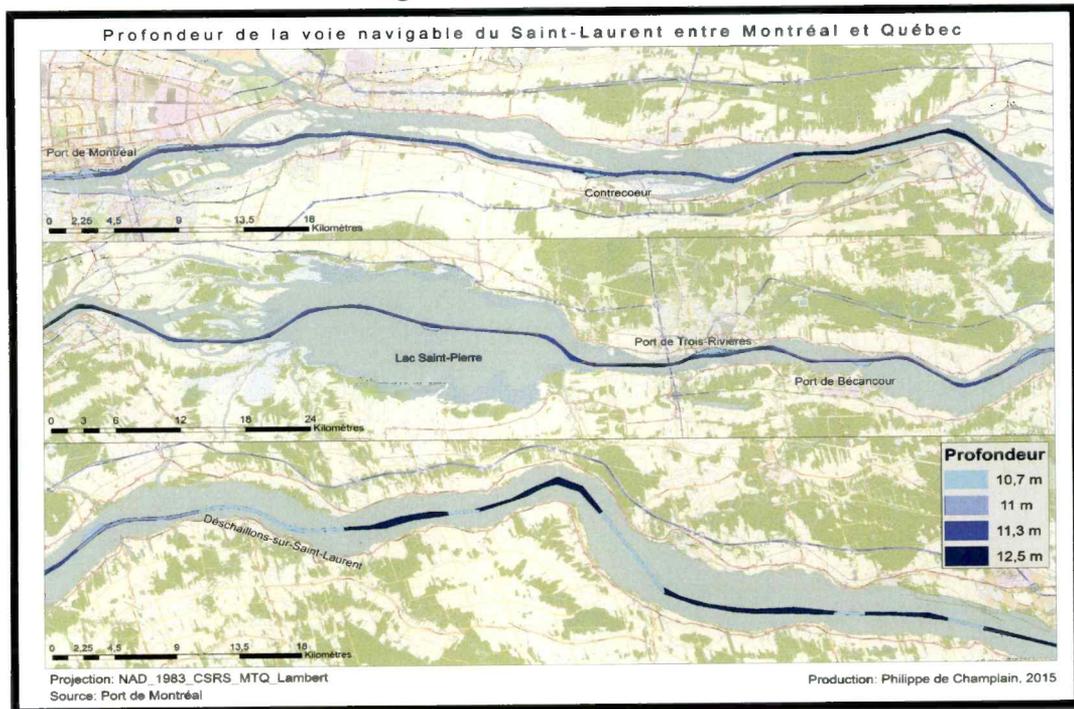
#### *4.6.1.1 Le dragage*

Les coûts de dragage ou, en d'autres mots, les coûts opérationnels ou de construction, dépendent de plusieurs variables : l'équipement utilisé, les types de sol à draguer, les salaires, la quantité et les fenêtres environnementales (Güler, 2002, et DOER, 1998). Outre cela, il ne semble pas y avoir d'autres coûts de construction. Le dragage d'entretien dépend des mêmes variables et peut être calculé annuellement. Il n'est toutefois pas pris en compte dans cette analyse puisque celui-ci survient dans la situation sans projet et dans celle avec projet. Les données sur le coût de dragage sont fournies par le port de Montréal sur la base des contrats historiques. Il existe une grande variation dans les coûts de dragage tirés de la littérature puisqu'ils sont spécifiques à chaque projet. En règle générale toutefois, le coût moyen se situe entre 33 \$ et 100 \$ du mètre cube dans le système du Saint-Laurent (D'Arcy et al., 2005).

Dans notre cas, nous utiliserons les valeurs de Comtois et Slack (2014a). Ils estiment le coût moyen de draguer un mètre cube à 75 \$. Ce montant a été revu et approuvé par le port de Montréal, l'instance responsable du dragage dans la section de

la voie maritime jusqu'à un peu après Trois-Rivières. Il est important de rappeler que ce n'est pas toute la voie navigable qui devra être draguée, mais seulement quelques parties. Il n'y a que quelques endroits qui ont une faible profondeur, mais la partie la plus problématique est près de la municipalité de Deschailons-sur-Saint-Laurent, comme le montre la prochaine image. Nous ne considérons pas les coûts du dragage d'entretien puisque ce type de dragage survient avec ou sans le projet.

**Image 4**  
 Profondeur de la voie navigable du Saint-Laurent entre Montréal et Québec



Source : Port de Montréal et cartographie par Philippe de Champlain, 2015

#### 4.6.1.2 La minimisation du dégagement sous quille

Comtois et Slack (2015) estiment les coûts des systèmes technologiques qui minimisent le dégagement sous quille à 1 M\$ en coût de construction et des coûts d'entretien de 100 000\$ par année. Ces coûts incluent notamment l'achat et l'entretien des équipements émettant les signaux GPS et les mises à jour de logiciels.

#### 4.6.2 Effets sur l'environnement

Contrairement à des améliorations technologiques qui permettent la minimisation du dégagement sous quille, le dragage de sédiments dans les cours d'eau a des effets potentiellement néfastes sur l'environnement. Ces effets sont variables et n'ont pas nécessairement la même amplitude selon les projets et les sections de la voie navigable. Nous avons analysé plusieurs rapports environnementaux québécois pour déterminer quels effets nécessitent d'être monétisés. Comme mentionné au Chapitre 3, nous avons préalablement établi que ces effets seront de cinq types :

1. La dégradation de l'environnement sonore;
2. La détérioration de la qualité de l'air;
3. La détérioration de la qualité de l'eau;
4. La contamination des sédiments; et
5. des impacts négatifs sur la faune et la flore aquatique.

Nous procéderons à une description exhaustive de la manière dont nous comptabiliserons ces effets, en nous basant sur la littérature et sur des rencontres avec des experts du milieu.

##### *4.6.2.1 La dégradation de l'environnement sonore*

Le dragage de sédiments en milieu maritime entraîne systématiquement une dégradation de l'environnement sonore pendant la construction. Toutefois, selon Rieussec (2008), cet impact est passager et peu important, ce qui nous mène à prendre la décision de normaliser ce coût à zéro.

##### *4.6.2.2 La dégradation de la qualité de l'air*

L'opération de dragage en soi ne représente pas un élément important de la détérioration de la qualité de l'air. En effet, même si l'opération nécessite beaucoup de carburant, cela reste extrêmement marginal. Ce faisant, nous ne comptabiliserons pas ces coûts directs dans notre analyse.

#### 4.6.2.3 La dégradation de la qualité de l'eau

Au niveau 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 possible remise en circulation de polluants dans la voie navigable. Nous normalisons cet impact à zéro puisque la dégradation de la qualité de l'eau a un effet sur les habitats de la faune aquatique, que nous traiterons plus loin. Nous prenons cette décision dans le but d'éviter le double comptage.

#### 4.6.2.4 Effets sur la faune et la flore

##### — Faune aquatique —

Nous décidons d'utiliser le principe d'aucune perte nette sur les habitats de poissons pour quantifier les effets sur la faune aquatique. Nous utiliserons donc les coûts de construction d'un habitat de compensation.

Le Port de Montréal et le MPO 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 m<sup>2</sup> 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 destinée à des projets futurs, comme l'expansion du terminal Contrecoeur par exemple. Le projet de dragage considéré ici ne détruira probablement pas suffisamment d'habitats pour épuiser la banque de réserve. Nous utiliserons néanmoins l'entièreté de la banque d'habitat de compensation, ce que nous jugeons être une hypothèse conservatrice. Cela correspond à des coûts de 2,35 \$/m<sup>2</sup>, ce qui est cohérent avec les valeurs utilisées par Harper et Quigley (2005) et plus élevé que les estimations de Costanza, et al. (1997).

##### — Faune Avienne —

L'impact sur les oiseaux des activités de dragage est considéré comme marginal, peu importe la taille du projet (Rieussec, 2008). Nous normalisons cet impact à zéro.

#### 4.6.2.5 La contamination des sédiments

Le chenal de la voie maritime du Saint-Laurent est à plusieurs endroits principalement constitué de sédiments fins comme le silt ou l'argile (Les Consultants Jacques Bérubé inc., 1994). Ces sédiments sont particulièrement propices à l'accumulation de polluants et il est donc possible que certaines portions de la voie maritime qui doivent être draguées soient considérées comme un site pollué. Dans ces situations, des précautions et des procédures supplémentaires doivent être prises, ce qui augmente sensiblement les coûts. Nous tenons à mentionner qu'il s'agit d'une possibilité, ce qui signifie que l'inverse soit aussi possible, c'est-à-dire que les sédiments ne soient pas suffisamment contaminés pour faire l'objet d'un tel traitement.

Nous comprenons également que la décontamination de sédiments est une procédure coûteuse. Wasserman et al. (2013) utilisent des coûts environnementaux de dragage de 22,39 US \$/m<sup>3</sup> (2010) selon la méthodologie du Corps des ingénieurs de l'armée américaine alors que D'Arcy et al. (2005) estiment des coûts pouvant aller jusqu'à 100 \$/m<sup>3</sup> sans les coûts de décontamination. Comme mentionnés précédemment, nous utiliserons la donnée de Comtois et Slack (2014a) de 75 \$/m<sup>3</sup> pour les sédiments non contaminés. Toujours dans Wasserman et al. (2013), les auteurs utilisent des coûts de 14,40 US\$/m<sup>3</sup> pour des sédiments non contaminés. En termes de ratio, cela signifie que les coûts de draguer un mètre cube de sédiments contaminés est 55 % plus dispendieux que de draguer des sédiments non contaminés<sup>13</sup>. Cela implique donc que dans notre cas, le coût de draguer des sédiments contaminés sera de 117 \$/m<sup>3</sup>.

En ce qui a trait à la quantité de sédiments contaminés, nous ne disposons pas d'informations exactes puisqu'il s'agit d'une étude exploratoire. Néanmoins, nous avons des informations concernant les quantités de sédiments contaminés du dernier projet de dragage d'envergure sur le Saint-Laurent. En 1998, la Société du Port de Montréal<sup>14</sup> a entrepris des travaux pour faire passer la profondeur d'eau de 11 à 11,3 m. Il s'agissait d'un dragage sélectif puisque la majorité des sections du Saint-

<sup>13</sup>  $14,40 / 22,39 = 0,55$  ;  $75/0,55 = 117$ .

<sup>14</sup> La société du port de Montréal a été remplacé par l'Autorité du Port de Montréal.

Laurent sont plus profondes et puisque l'action des marées permet le passage de bateaux à certaines périodes. En bref, près de 2 % de la voie navigable a été draguée à des niveaux variables, dans le but d'atteindre 11,3 m. À l'époque, le ministère des Pêches et des Océans avait effectué un examen préalable avant d'autoriser le projet (MPO 1997). Ce rapport contient en annexe la synthèse des matériaux à draguer. La qualité des sédiments à draguer était évaluée selon les impacts potentiels sur l'environnement<sup>15</sup>. Les sédiments pouvaient donc faire partie de quatre catégories selon les critères du ministère de l'Environnement du Québec et du Canada (Environnement Canada; Centre Saint-Laurent; ministère de l'Environnement du Québec, 1992). Parmi les quatre classes<sup>16</sup> (1 à 4), seulement la classe 4 se trouve au-dessus du seuil d'effets néfastes. Ce faisant, « les matériaux dragués doivent être traités ou confinés de façon sécuritaire ». Des 220 000 mètres cubes qui ont été dragués durant ce projet, 5 % avait été classifiés de classe 4 et avaient subi un traitement différent des autres sédiments. Nous appliquerons les mêmes proportions dans notre étude. En résumé, cela coûte 75\$/m<sup>3</sup> pour draguer des sédiments non-contaminés et 117\$/m<sup>3</sup> pour draguer des sédiments potentiellement contaminés.

#### **4.7 Estimation des bénéfices**

---

##### *4.7.1 Les coûts de transport sauvés*

L'utilisation des coûts de transport sauvés pour évaluer les bénéfices associés à la pertinence d'un projet de transport est courante et même récurrente dans l'évaluation de projets maritimes. La prémisse de cette méthodologie est de 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 américaine (USACE) dans l'évaluation des projets de dragage qui tombent sous sa

---

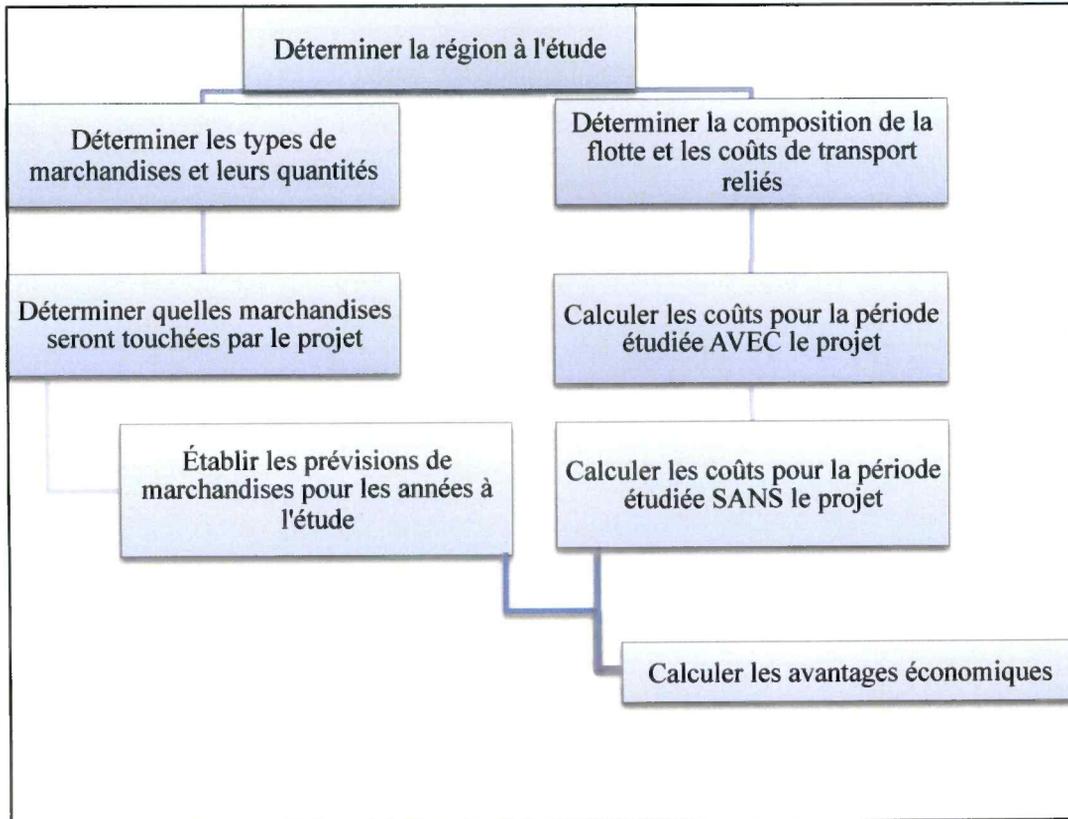
<sup>15</sup> L'évaluation de la qualité des sédiments a été revue depuis.

<sup>16</sup> Environnement Canada et le Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec utilisent différents critères pour établir la qualité des sédiments. Ces niveaux de qualité vont de la classe 1, la meilleure, à la classe 4, la pire.

responsabilité. Dans notre cas, il s'agit de comparer le maintien du statu quo grâce aux mesures d'adaptation avec la situation *ne rien faire*. En d'autres mots, il s'agit de déterminer la variation du coût moyen de transporter un EVP entre la situation avec projet et la situation sans projet.

Le corps des ingénieurs de l'armée américaine utilise systématiquement cette méthodologie dans le calcul de leurs bénéfices dans leurs projets de dragage et d'amélioration d'une voie navigable. Nous nous basons sur le manuel de référence pour la planification des projets de travaux civils (USACE 2000) pour bien appliquer leur méthodologie. Cette méthode se décline en plusieurs étapes. Il s'agit d'abord de déterminer la région à l'étude. Dans cette étape, il faut déterminer les différents marchés touchés par le projet, de même que les origines et les destinations des flux de marchandises. Dans un premier temps, il s'agit de déterminer la composition et les quantités de ces flux de marchandises. Par la suite, et il s'agit d'une légère modification à la méthodologie de l'USACE puisque l'information nous est disponible au préalable, nous déterminons quelles marchandises seront touchées par le projet. Ensuite, nous procédons aux prévisions des quantités de marchandises qui seront transportées pendant la durée du projet. Il faut alors calculer les coûts moyens unitaires journaliers de transporter un EVP avec et sans le projet, pour toutes les périodes à l'étude. Finalement, il s'agit de comparer les coûts de la situation sans projet avec ceux quand le projet a lieu et nous obtenons les avantages économiques nets de ce projet. La figure suivante résume les étapes.

**Tableau 3**  
Les étapes de la méthodologie de l'USACE



Source : USACE (2000)

Nous décrirons dans les prochaines sections comment nous appliquerons chacune des étapes de cette méthodologie. Il nous apparaît important de mentionner que nous modifions légèrement cette méthodologie en déterminant dès le départ quelles marchandises seront affectées par la variation des niveaux d'eau due aux changements climatiques. Nous prenons cette décision puisque ces informations sont déjà disponibles, ce qui allège l'analyse.

#### 4.7.1.1 Déterminer la région à l'étude

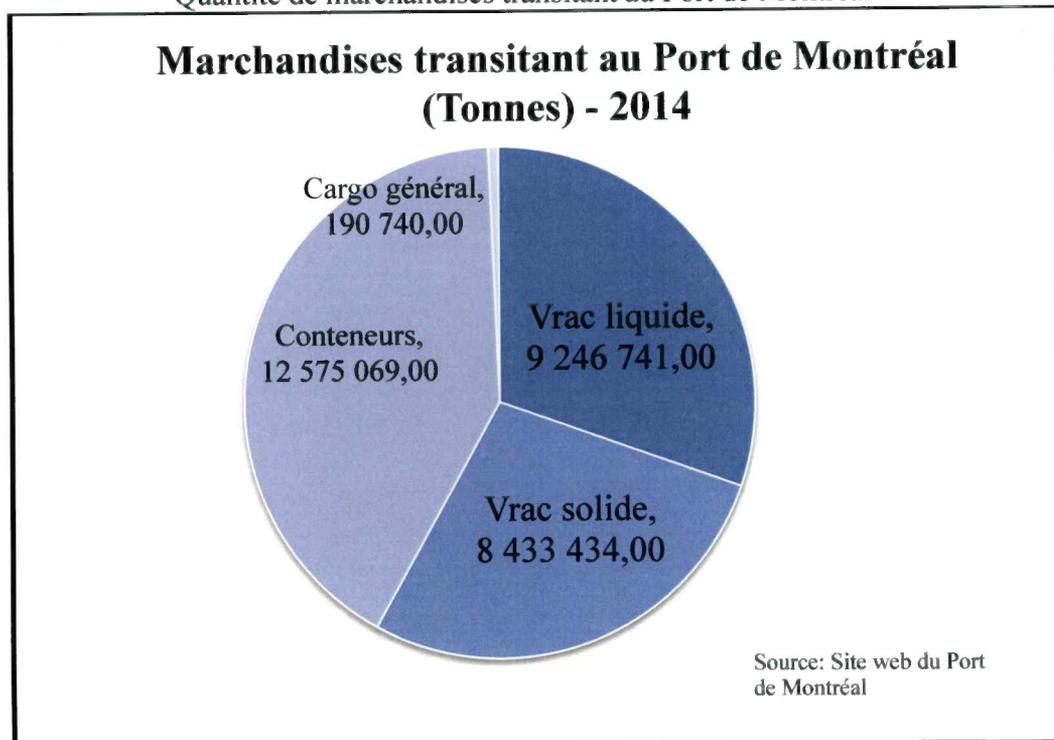
Notre étude s'intéresse principalement à la région de Montréal et ses ports puisque les activités de dragage et des améliorations technologiques affecteront principalement cette région. Nous expliquerons la raison de ceci dans la prochaine section. Nous avons également préalablement démontré que le port de Montréal est en

compétition directe avec les ports de NYNJ et celui de Hampton Roads pour une portion des marchandises conteneurisées transportées à travers le port. Plus spécifiquement, il s'agit de la concurrence avec ces régions pour les conteneurs en provenance (à destination) du Midwest américain vers (depuis) l'Europe et la Méditerranée. Nous incluons également ces ports dans notre analyse puisque nous postulons qu'une certaine portion des marchandises sera déplacée vers ces ports sous certaines conditions, qui dépendent principalement des scénarios climatiques et de l'amplitude des baisses selon les périodes.

#### 4.7.1.2 Déterminer les types de marchandises et leurs quantités

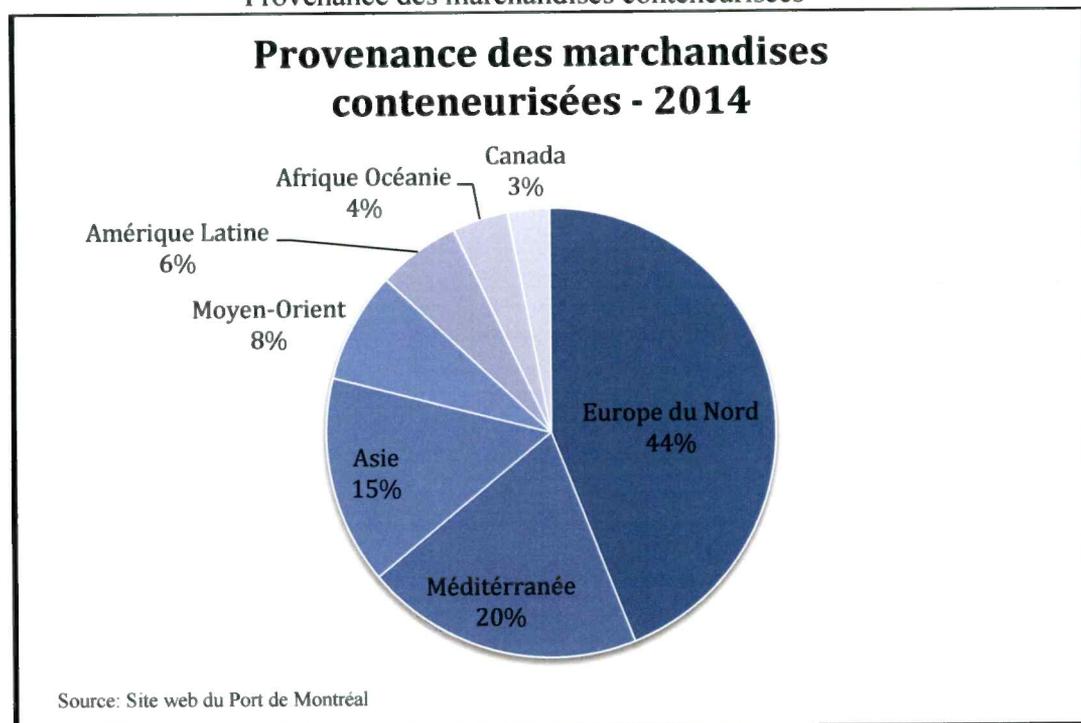
Le port de Montréal est l'un des ports importants de la côte est nord-américaine. Chaque année, des quantités importantes de marchandises circulent sur les quais. La figure suivante illustre les quantités et les proportions relatives de chacune des marchandises pour l'année 2014 :

**Tableau 4**  
Quantité de marchandises transitant au Port de Montréal



De manière à mettre ces quantités en perspective, le port de Montréal est le 12<sup>e</sup> port en importance en Amérique du Nord pour le trafic de conteneurs, à 12,5M de tonnes ou 1,4 M de EVP. Géographiquement, Montréal se place au 4<sup>e</sup> rang sur la côte Est Atlantique, derrière NYNJ à un peu plus de 5,7M de EVP, Savannah avec 3,35M et Hampton Roads avec environ 2,4M. En résumé, Montréal est un port d'importance, mais qui n'a pas la même capacité que ses concurrents NYNJ et Hampton Roads pour le transport des conteneurs. La figure suivante décrit la provenance des conteneurs au port de Montréal.

**Tableau 5**  
Provenance des marchandises conteneurisées



Nous savons donc que le Port de Montréal reçoit un peu plus de 30M de tonnes de marchandises chaque année. Il nous reste maintenant à déterminer quelles marchandises seront affectées par une variation des niveaux d'eau sur la voie navigable du Saint-Laurent.

#### *4.7.1.3 Déterminer quelles marchandises seront touchées par le projet*

Les différentes mesures d'adaptation que nous étudions dans ce mémoire permettent toutes des gains de profondeur de navigation. Par rapport au statu quo, il nous faut maintenant déterminer quel sera l'impact d'un maintien d'une certaine profondeur sur chacune des marchandises qui transitent sur la voie maritime et plus particulièrement à Montréal.

Suite à des discussions avec des experts du milieu maritime québécois, M. Comtois et M. Slack, la variation des niveaux d'eau attribuables aux changements climatiques n'affectera réellement que le transport des conteneurs. En effet, le comportement des compagnies maritimes pour le transport du vrac sec ou liquide n'est pas aussi dépendant des niveaux d'eau que pour le transport des conteneurs. Pour cette raison, nous nous concentrons uniquement sur le transport des conteneurs. Les prochaines sous-sections expliquent pourquoi.

#### *Le vrac sec*

Le trafic de vrac sec est notamment constitué de grains et d'autres types de marchandises comme des minéraux. Généralement, le grain provient des prairies canadiennes ou du Midwest américain et est acheminé vers l'international, notamment à partir du port de Montréal. Selon Comtois et Slack (2014a), le transport de vrac sec diffère de celui des conteneurs pour les raisons suivantes :

1. Les services sont irréguliers;
2. les affrètements de court et de long termes n'obéissent pas aux mêmes règles de marché;
3. les navires de vrac sec servent un seul client à la fois, donc une seule quantité;
4. les navires sont plus souvent au départ du Canada et reviennent souvent vides; et
5. le vrac sec doit souvent être stocké avant l'expédition.

Lorsque les vraquiers ne peuvent être chargés complètement au port de Montréal, ils complètent leurs chargements plus en aval du fleuve, où les profondeurs sont plus importantes, ce qui nous incite à normaliser ce coût à zéro.

#### *Le vrac liquide*

Le trafic de vrac liquide fait principalement référence au transport de produits pétroliers, de produits chimiques et des produits alimentaires. Les plus gros bateaux sont ceux qui transportent du pétrole brut, principalement à cause des importations de celui-ci. Cependant, toujours selon Comtois et Slack (2014a, p.109), « L'impact des niveaux d'eau sur le transport de vrac liquide n'est pas important ». Cela est dû au fait que les navires déchargent une partie de leur cargaison à Québec, avant d'arriver aux endroits problématiques quant aux niveaux d'eau. Ce faisant, nous normaliserons ce bénéfice potentiel à zéro.

#### *Les conteneurs*

Le trafic maritime de porte-conteneurs est, comme nous l'avons mentionné précédemment, le trafic le plus sensible aux variations à la baisse des niveaux d'eau. Comtois et Slack (2014a) considèrent que calculer l'impact monétaire d'une baisse est complexifié par les éléments suivants :

- Les capacités de chargement varient en fonction des navires;
- plusieurs navires voyagent systématiquement allégés;
- le poids des conteneurs est variable; et
- il y a un manque de données sur le volume de marchandises non transportées durant les périodes de faibles niveaux d'eau.

Comtois et Slack (2014a) calculent que la baisse d'un centimètre de niveau d'eau équivaut à une perte de 3,01 EVP par bateau. Ils basent leurs calculs sur l'analyse d'un échantillon de 135 observations en 2013 sur plusieurs routes maritimes. Ils concluent que la perte centimètre de tirant d'eau occasionne 3,01 EVP par centimètre. Les auteurs ont comparé leurs résultats avec ceux de Transport Québec (3,8), Transport Canada (6) et le USACE (11,5) (Rapporté dans Comtois et Slack (2014a)).

Étant donné la proximité des résultats avec ceux de Transport Québec et puisqu'il s'agit de la même zone d'étude, ils recommandent l'utilisation de la valeur de Transport Québec de 3,8 EVP /cm.

#### *4.7.1.4 Établir les prévisions de marchandises pour les années à l'étude*

La croissance du transport de conteneurs a littéralement explosé depuis la fin des années 70. La standardisation progressive des équipements et la flexibilité des conteneurs en étant les principales raisons. Selon des données de la Conférence des Nations Unies sur le Commerce et le Développement (UNCTAD 2012), le transport de conteneurs a cru d'environ 7 % par année depuis 2009. Dans le cas du port de Montréal, la croissance est, en moyenne, de 2,4 % par année. Nous appliquerons cette moyenne de croissance du port pour les années à venir. À ce rythme, la capacité de manutention du Port de Montréal sera atteinte en 2023. Pour déterminer la capacité maximale de manutention du Port de Montréal, nous nous fions aux données du port pour les installations en opération plus la capacité additionnelle qu'apportera la réalisation des travaux déjà en cours dans le secteur du quai Viau. Cela nous donne une capacité maximale de 1.75 M de conteneurs annuellement. Nous ne prenons pas en considération l'expansion du port à Contrecoeur. En effet, les travaux ne sont pas commencés et nous préférons maintenir une position conservatrice dans nos estimations. Lorsque la capacité maximale est atteinte, nous conservons ce trafic pour le reste des années du projet sous étude. Nous appliquons le taux de croissance sur le nombre de bateaux, plutôt que sur le nombre de conteneurs.

#### *4.7.1.5 Déterminer la composition de la flotte et les coûts de transport reliés*

Dans le cadre de notre évaluation, nous utiliserons un bateau type pour déterminer les coûts de transport reliés. La majorité des porte-conteneurs qui naviguent sur le Saint-Laurent se situe entre 2000 et 5000 EVP en termes de capacité. En théorie, le port de Montréal pourrait recevoir des navires de type post-panamax qui peuvent contenir plus de 5000 EVP, mais, en raison des variations de niveaux d'eau et des

risques associés, ceux-ci ne sont pas pleins lorsqu'ils franchissent les zones moins profondes.

Pour calculer les coûts de transport journalier, nous utiliserons plusieurs sources de données. Nous avons recours à cette multitude de sources puisque les compagnies maritimes ne rendent pas leurs structures de coût disponible. Pour approximer ces coûts journaliers, 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 CAD\$ 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 4283 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 du IFC 380 à Rotterdam, prix de 428,97 CAD\$ par tonne. Nous sommes conscient 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. En résumé, cela nous donne des coûts de transport journalier de 57 822,48 CAD\$.

#### *4.7.1.6 Calculer les coûts présents et futurs de transporter chaque type de marchandise avec et sans projet*

Les coûts de transport sauvés représentent la différence entre le coût moyen de transporter un conteneur entre une origine et une destination avec et sans la mesure d'adaptation à l'étude. Nous avons établi que le coût de transport moyen approximatif est de 57 822,48\$ par jour. Nous savons que la quantité moyenne de conteneurs par bateau est de 3831,25 EVP. Qui plus est, nous savons également qu'une variation négative d'un centimètre de niveau d'eau entraîne une perte de 3,8 EVP par bateau. Avec ces informations, nous sommes en mesure d'établir un coût moyen journalier par EVP pour la situation avec projet et pour la situation sans projet.

En fonction des gains en centimètres de chacune des mesures d'adaptation et avec les niveaux d'eau pour les 50 prochaines années, par quart de mois, nous faisons face à trois cas possibles pour chacune des périodes :

1. La variation de niveau d'eau est positive. Dans ce cas, il n'y a pas de coûts sauvés puisqu'il s'agit d'une situation où les changements climatiques n'ont pas d'effets négatifs sur le transport maritime.
2. La variation de niveau d'eau est négative, mais celle-ci est inférieure au gain de la mesure d'adaptation en valeur absolue. Dans ce cas, il y a des coûts de transport sauvés qui dépendent de la variation de niveaux d'eau.
3. La variation de niveau est négative et supérieure au gain de la mesure d'adaptation en valeur absolue. Dans ce cas, il y a des coûts de transport sauvés qui dépendent du gain en niveau d'eau de la mesure d'adaptation.

Nous sommes principalement intéressés par les cas 2 et 3, puisque le premier n'a pas d'impact négatif et il n'y a pas besoin de calculer la variation du coût moyen. Pour calculer les coûts moyens, nous utilisons les formules suivantes :

1. Lorsque  $\Delta \text{Niveau\_Eau} > 0$ , alors il n'y a aucune variation

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

$$\Delta W_t = 0$$

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

$$CM(W)_{m,t} = \frac{\text{Coût\_Moyen\_Journalier}\$_m}{Q - \Delta W_t}$$

$$CM(WO)_{m,t} = \frac{\text{Coût\_Moyen\_Journalier}\$_m}{Q - \Delta WO_t}$$

3. Lorsque  $\Delta \text{Niveau\_Eau} < -\gamma \text{ cm}$ , alors

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

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

$$CM(W)_{m,t} = \frac{\text{Coût\_Moyen\_Journalier}\$_m}{Q - \Delta W_t}$$

$$CM(WO)_{m,t} = \frac{\text{Coût\_Moyen\_Journalier}\$_m}{Q - \Delta WO_t}$$

où:

$Q$  = Quantité moyenne de conteneurs (EVP) par bateau

$\gamma$  = gain en cm de la mesure d'adaptation

$\Delta$  = 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 dépendent également de la distance parcourue entre les différentes origines et destinations des marchandises qui transitent par le port de Montréal. Le tableau 7 résume les temps de transit calculés entre les différentes régions du monde, Montréal et la destination finale, le cas échéant. Pour chaque région, nous utilisons un port type, ce qui allège la tâche de calcul. Nous utilisons quelques hypothèses, notamment que la vitesse moyenne commerciale est de 19,5 nœuds/heure (Cariou 2010), ce qui est une vitesse se situant entre des pratiques de *slow-steaming* et les vitesses de fabrication. Pour les temps moyens en port, nous utilisons des données provenant de Comtois et Slack (2014c) Ces temps en port sont

importants puisque la vitesse à laquelle les bateaux sont chargés et déchargés a un impact direct sur les coûts de transport sauvés.

Le positionnement concurrentiel du port de Montréal fait en sorte 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. Cet état de fait est particulièrement susceptible de survenir pour les conteneurs entre l'Europe et le Midwest américain. Ce genre de situation a été fréquemment modélisé et les résultats abondent dans ce sens<sup>17</sup>. Par rapport au scénario de référence, l'option de draguer, d'installer un système de monitoring du dégagement sous quille ou un mélange des deux pour maintenir le *statu quo*, implique un maintien des parts de marchés dans les marchés où le port de Montréal est en concurrence avec d'autres ports. Comme le mentionne une étude du Port de Montréal<sup>18</sup>, celui-ci est en concurrence avec deux autres ports de la côte est pour le trafic conteneurisé en provenance/destination d'Europe vers le Midwest américain. Ces ports sont NYNJ et le port de Hampton Roads. Le transbordement est une activité fort lucrative pour une économie locale et une diminution de la capacité de chargement implique une baisse des parts de marchés d'un port au profit d'un autre.

Qui plus est, nous établissons que, pour le marché du Midwest, pour les conteneurs provenant d'Europe et de Méditerranée transitant par Montréal, il y a un déplacement d'une certaine portion du marché vers les concurrents NYNJ et Hampton Roads. Nous faisons cette hypothèse en regard à la littérature étudiée au chapitre 3, ainsi qu'après discussion avec M. Comtois et M. Slack, mandataires du projet global et spécialistes de la question. Nous déterminons la portion de conteneurs qui serait potentiellement transférée en utilisant les parts de marché existantes. Selon le port de Montréal, le marché du Midwest représente 17 % des activités conteneurisées du port de Montréal. L'Europe du Nord et la Méditerranée représentent 64 % des marchés à l'extérieur de

---

<sup>17</sup> Revoir la section sur la situation concurrentielle du port de Montréal pour davantage d'informations.

<sup>18</sup> Cette étude peut être obtenue sur le site internet du port de Montréal : <http://www.port-montreal.com/fr/strategie-adaptation-avril2014.html> consultée le 1er septembre 2015.

l'Amérique du Nord. Enfin, la part de marché du port de NYNJ est de 28,6 % et celle de Hampton Roads est de 26,6 %. Parmi les EVP perdus à cause de la baisse des niveaux d'eau, nous attribuons un déplacement de 3,11<sup>19</sup> % vers New York et un déplacement de 2,89<sup>20</sup> % vers Hampton Roads en Virginie. Le déplacement vers ces ports est induit lorsque la variation du niveau d'eau est négative, en raison d'une perte compétitivité.

Le tableau suivant résume les paires d'origine-destination et leurs caractéristiques de modélisation :

**Tableau 6**  
Paires d'Origine/Destination et caractéristiques de modélisation

Origine/Destination	Port	Temps de transit (en jours)	Temps au port (en jours)	Part totale <sup>21</sup> (%)
Europe – MTL	Rotterdam	10,77	2,45	38
Europe – MTL – Midwest	Rotterdam	10,77	2,45	2
Europe – NYNJ – Midwest	Rotterdam	11,25	1,09	2,1
Europe – HR – Midwest	Rotterdam	11,96	0,63	1,9
Méditerranée — MTL	Valence <sup>22</sup>	12,25	2,45	17
Méditerranée – MTL – Midwest	Valence	12,25	2,45	1
Méditerranée - NYNJ – Midwest	Valence	12,28	1,09	1
Méditerranée – HR – Midwest	Valence	12,86	0,63	1
Asie – MTL	Singapore	34,81	2,45	15
Moyen-Orient – MTL	Jebel Ali (EAU)	27,70	2,45	8
Amérique du Sud – MTL	Santos	20,12	2,45	6
Afrique – MTL	Durban	27,27	2,45	4
Canada – MTL	St John's	3,60	2,45	3
Total				100

Source : <https://www.searates.com/reference/portdistance/> et Comtois et Slack (2014c)

<sup>19</sup>  $0,17 * 0,64 * 0,286 = 0,0311$

<sup>20</sup>  $0,17 * 0,64 * 0,266 = 0,0289$

<sup>21</sup> Basée sur les quantités d'EVP.

<sup>22</sup> Le port de Valence est le port de la méditerranée duquel Montréal reçoit le plus de marchandises.

Nous détenons maintenant les informations sur les coûts journaliers des transporteurs, les temps de transit en mer et au port des différentes origines et destinations de même que les parts de marchés associés. Nous avons également les prévisions de trafic pour toutes les périodes. Nous pouvons maintenant procéder au calcul des bénéfices économiques que sont les coûts de transport sauvés.

Similairement au calcul des coûts moyens unitaires journaliers, nous faisons face aux mêmes trois cas de figure pour le calcul des coûts de transports sauvés. Les équations suivantes sont utilisées pour les calculs:

1. Lorsque  $\Delta \text{Niveau\_Eau} > 0$ , alors

$$\text{Avantages} = 0$$

2. Lorsque  $0 > \Delta \text{Niveau\_Eau}$  et  $> -\gamma \text{ cm}$ , alors

$$\text{Avantages} =$$

$$\sum_{t=1}^{2400} \sum_{r=1}^{13} \sum_{m=1}^2 [(CM(WO)_{m,t} - CM(W)_{m,t}) * \theta_r * NbJ_{r,m} * Pr\acute{e}vision_t * (Q)]$$

3. Lorsque  $\Delta \text{Niveau\_Eau} < -\gamma \text{ cm}$ , alors

$$\text{Avantages} =$$

$$\sum_{T=1}^{2400} \sum_{R=1}^{13} \sum_{M=1}^2 [(CM(WO)_{m,t} - CM(W)_{m,t}) * \theta_r * NbJ_{r,m} * Pr\acute{e}vision_t * (Q - \Delta W_t)]$$

où

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

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

$\theta_r$  = Part de marché

#### 4.7.2 L'amélioration de la qualité de l'air

Ce qui n'est pas considéré dans les bénéfices économiques de réduction des coûts de transport est la détérioration de la qualité de l'air qu'induit un déplacement d'une portion des activités vers des ports de la côte est américaine en raison d'une baisse du niveau des eaux.

La prémisse de départ est que la route de transport de marchandises entre l'Europe et le Midwest pour le marché des conteneurs qui passent par Montréal est significativement moins polluante que les autres routes qui passent par New York ou la Virginie. Le port de Montréal est donc un port d'importance desservant efficacement le Midwest américain en provenance de l'Europe et de la Méditerranée. Pour cette raison, un déplacement de certaines marchandises vers d'autres ports pour des raisons commerciales entraînerait une augmentation relative des gaz à effet de serre. Cette augmentation relative des GES correspond à l'augmentation de la distance parcourue par un bateau pour atteindre ces autres ports (NYNJ et HR). Cette distance supplémentaire parcourue entraîne de facto une augmentation de la consommation de carburant. Dans le même ordre d'idée, une augmentation de carburant entraîne une augmentation des émissions de GES. Finalement cette réduction relative des GES, lorsque les conditions de niveaux d'eau sont respectées, entraîne des bénéfices environnementaux qu'il est possible de quantifier. Encore une fois, nous faisons face à trois cas de figure :

1. La variation de niveau d'eau est positive. Dans ce cas, il n'y a pas de bénéfices environnementaux puisqu'il s'agit d'une situation où les changements climatiques n'ont pas d'effets négatifs sur le transport maritime. En effet, les variations négatives n'entraînent pas de déplacement vers les ports concurrents.
2. La variation de niveau d'eau est négative, mais celle-ci est inférieure en valeur absolue au gain de la mesure d'adaptation. Dans ce cas, il y a des bénéfices environnementaux puisque le déplacement de certaines marchandises vers des ports concurrents n'aurait pas existé si le projet avait eu lieu. Puisque le gain en centimètres de la mesure d'adaptation est supérieur à la variation, la mesure

annule complètement l'effet négatif, ce qui évite que certains conteneurs transitent par d'autres ports.

3. La variation de niveau est négative et supérieure au gain de la mesure d'adaptation. Dans ce cas, il n'y a pas de bénéfices environnementaux puisqu'il y a le déplacement de certaines marchandises dans la situation avec projet et sans projet. En effet, lorsque la variation est supérieure au gain de la mesure d'adaptation, il y a tout de même un déplacement d'activités vers les ports concurrents. De plus, puisque la relation entre la consommation de carburant et le chargement d'un navire n'est pas linéaire, nous n'appliquons pas de proportionnalité. Dès qu'un conteneur est acheminé vers d'autres ports, nous considérons qu'il y a consommation supplémentaire de carburant et ce faisant, il n'y a pas de réduction relative des émissions polluantes comme dans le deuxième cas.

Pour calculer la consommation de carburant supplémentaire occasionnée par le déplacement de certaines marchandises, nous avons besoin de connaître la consommation moyenne de carburant d'un bateau type. Ce bateau devant être près de la moyenne des bateaux qui circulent sur le fleuve Saint-Laurent. Par souci de constance dans les données, nous reprenons la même source que dans la section précédente, Cariou et Notteboom (2013), qui estiment la consommation moyenne de carburant à 84 tonnes/jours à une vitesse commerciale moyenne de 19,5 nœuds/heure. Avec cette vitesse et cette consommation de carburant moyenne, nous sommes à même de calculer la consommation supplémentaire puisque nous avons la différence de la distance en km que les navires doivent traverser. Nous prenons seulement en considération les périodes où les navires sont en mer et pas lorsqu'ils sont au port. Ces caractéristiques sont résumées dans le tableau suivant :

**Tableau 7**  
Distance et consommation supplémentaire de carburant

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

Source : <https://www.searates.com/reference/portdistance/> et Port de Montréal (2015)

Nous devons maintenant déterminer les émissions polluantes causées par cette distance parcourue supplémentaire.

Nous utilisons d'abord les facteurs d'émission par tonne de carburant tirés de The International Maritime Organization (2009) pour déterminer les quantités de GES émises par tonnes de carburant.

Le tableau suivant résume ces informations :

**Tableau 8**  
Facteur d'émission (i) par tonne de carburant (kg/Tonne)

CO <sub>2</sub>	3190
CO	7,4
HC	0,4
NO <sub>x</sub>	85
SO <sub>x</sub>	10
PM	1,2
CH <sub>4</sub>	0,3

Source : The International Maritime Organization (2009)

Finalement, la littérature économique a préalablement déterminé des valeurs pour les émissions polluantes et une manière de ramener celles-ci en kg équivalents de CO<sub>2</sub> ou de les comptabiliser tous séparément. Nous utiliserons les valeurs qui se retrouvent dans Ferland (2006). Ces valeurs sont en effet très près de celles utilisées aux États-Unis (Interagency Working Group on Social Cost of Carbon, 2013).

**Tableau 9**  
Coût en dollars par tonne d'émissions (\$2015)

CO <sub>2</sub>	41,11
CO	1863,43
HC	6779,83
NO <sub>x</sub>	8647,92
SO <sub>x</sub>	3683,80
PM	5128,23
CH <sub>4</sub>	1127*

Source : Ferland (2006) et \* Song (2014)

Finalement, pour calculer les bénéfices associés à la diminution relative de GES, nous faisons encore une fois face à trois cas de figure. En résumé, le bénéfice du cas 2 correspond aux émissions qui ne sont pas émises par une *fraction*  $\theta_r$  de bateau<sup>23</sup>. Bref, contrairement aux coûts de transport sauvés qui utilisent l'unité EVP, nous traitons ce bénéfice en terme de bateaux. Puisque ce bénéfice est relié aux scénarios climatiques, nous nous attendons à ce que les avantages soient les plus grands dans le scénario de *référence*, suivi de *WI2* et *WI1*. En effet, puisque les amplitudes des variations sont moins importantes dans les premiers scénarios, les mesures d'adaptation sont plus efficaces puisqu'elles permettent de d'induire moins déplacement de conteneurs vers d'autres marchés. Dans le cas du scénario *WII*, puisque les variations sont parfois très importantes dans certaines périodes, les mesures d'adaptation sont souvent moins efficaces et entraînent parfois des déplacements vers d'autres marchés même si la

<sup>23</sup> Par exemple, si la prévision d'EVP pour une période est de 28 805 EVP, ce qui correspond à 7,5 bateaux, la consommation de carburant supplémentaire induite par le déplacement de conteneurs vers l'O-D Europe – NYNJ – Midwest est de  $0,021 \times 7,5 \times 25 = 4$  tonnes de carburant.

mesure est mise en place. Et comme nous l'avons mentionné, puisque la relation entre un navire, son chargement et la consommation de carburant n'est pas linéaire, nous ne calculons pas un *deuxième* ratio de proportionnalité sur la consommation de carburant (voir note 22) lorsque nous sommes dans le cas 3.

Les équations suivantes résument le calcul des bénéfices :

1. Lorsque  $\Delta \text{Niveau\_Eau} > 0$ , alors  $\text{Avantages} = 0$

2. Lorsque  $0 > \Delta \text{Niveau\_Eau} > -\gamma$ , alors  $\text{Avantages} =$

$$\sum_{T=1}^{2400} \sum_{R=1}^{13} \sum_{i=1}^7 \theta_r * \text{Prévision}_t * \frac{\Delta km_{r,t}}{\text{km/h}} * \frac{\text{Tonnes de carburant}}{\text{Heures}}$$

$$* \text{Facteur\_Émission}_i * \frac{\$}{\text{kg}}$$

3. Lorsque  $\text{Niveau\_Eau} < -\gamma$ , alors  $\text{Avantages} = 0$

où

$\gamma = \text{Gain en cm de niveau d'eau de la mesure d'adaptation}$   
 et la destination (r)

$\text{Prévision} = \text{prévision du nombre de bateaux selon la période } t$

$\theta_r = \text{Part de marché}$

#### 4.8 Analyses de sensibilité

---

Tel que mentionné dans (Ferland 2006), il est essentiel de se prêter à l'exercice de faire des analyses de sensibilité pour s'assurer de la résilience des résultats. Avant d'expliquer les différentes analyses, nous jugeons pertinent de rappeler les variables utilisées dans les équations :

**Tableau 10**

Description des différentes variables utilisées dans les 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. Voir chapitre 2.
$\gamma$	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. Voir section 1.3 et 1.4.
$\Delta W$ et $\Delta WO$	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. Voir section 4.7.1.3.
<i>Coût_Moyen_Journalier</i> \$	Coût moyen d'opérer un bateau type (entre 2000 et 6000 EVP). Addition de 21 789 \$ selon UNCTAD (2012) et de la consommation de carburant avec un coût moyen de 428,97 \$/tonne. Ce qui donne un total de 57 822,48 \$. Voir section 4.7.1.5.
$Q$	Quantité moyenne de conteneurs dans le bateau type que nous utilisons, 3831,25 EVP. Voir section 4.7.1.6.
$CM(W)$ et $CM(WO)$	Coût moyen journalier de transporter 1 EVP pendant une journée. Voir équation.
$\theta$	Part de marché (ratio) des différentes régions du monde dans le commerce des conteneurs qui transitent par le Port de Montréal. Voir tableau 5 et 6.
<i>NbJ</i>	Temps, en jours, de parcourir la distance entre les différentes régions et le Port de Montréal et temps moyen passés dans les différents ports. Voir tableau 6.
<i>Prévision</i>	Prévision du nombre de bateaux qui transitent par le port pour chacune des périodes t. Voir section 4.7.1.4.
$\Delta km$	Distance supplémentaire à parcourir pour les bateaux lorsqu'une variation négative des niveaux d'eau entraîne un déplacement de conteneurs vers des ports concurrents. Voir tableau 7.
<i>Facteur_émission</i>	Facteur d'émissions polluantes de la consommation de carburant de type bunker. Voir tableau 8.
$\frac{\$}{kg}$	Coût social par tonne d'émissions polluantes. Voir tableau 9.

Nous procéderons donc aux analyses de sensibilité suivantes :

1. Diminution du taux d'actualisation à 2,5 %
  - Cette réduction du taux d'actualisation nous permettra de déterminer la viabilité du projet lorsque celui diminue.
2. Augmentation du taux d'actualisation à 7 %
  - Cette augmentation du taux d'actualisation nous permettra de déterminer la viabilité du projet lorsque celui augmente.
3. Augmentation du nombre d'EVP/cm à 6 EVP/cm
  - Le nombre d'EVP/cm est l'un des éléments ayant le plus d'impact dans notre calcul des coûts de transport sauvés. Puisque nous avons pris l'une des données les plus conservatrices au départ, nous analyserons les résultats avec une donnée plus optimiste.
4. Réduction de moitié du prix de l'essence
  - Le prix du carburant est également l'un des éléments qui a une grande influence sur les résultats. Une réduction de celui-ci vient réduire les coûts de transport sauvés. Nous choisissons de seulement utiliser une réduction parce qu'une augmentation aurait sensiblement le même effet que l'analyse avec 6 EVP/cm.
5. Variation de la profondeur draguée à 20 cm
  - La profondeur à draguer peut être changée puisqu'elle dépend uniquement des décideurs.
6. Variation de la profondeur draguée à 60 cm
  - La profondeur à draguer peut être changée puisqu'elle dépend uniquement des décideurs.

7. Doubler les coûts de construction

- Les coûts de construction sont souvent des éléments qui peuvent varier lors de la construction de grands projets, c'est pourquoi nous choisissons de les doubler pour évaluer la résilience des différentes mesures d'adaptation.

8. Doubler les coûts environnementaux

- Il est intéressant de déterminer si une augmentation des coûts environnementaux du projet aura un impact significatif sur la VAN.

#### 4.9 Sommaire des coûts et bénéfices

Nous concluons cette section en récapitulant les coûts et bénéfices qui seront quantifiés, de quelle manière et à quelle étape du projet.

**Tableau 11**  
Sommaire des coûts et des bénéfices

<i>Coûts et Bénéfices</i>	<i>Méthodologie</i>	<i>Temps</i>
<b>Coûts</b>		
Investissement initial	75 \$/m <sup>3</sup> * Quantité (m <sup>3</sup> )	T = 0
Environnement sonore	Normalisation à 0	T = 1, ..., 50
Qualité de l'air	Normalisation à 0	T = 1, ..., 50
Qualité de l'eau	Normalisation à 0	T = 1, ..., 50
Végétation aquatique	Normalisation à 0	T = 1, ..., 50
Faune aquatique	650 000\$	T = 0
Décontamination de sédiments	117 \$/m <sup>3</sup> * Quantité (m <sup>3</sup> )	T = 0
<b>Bénéfices</b>		
Baisse des coûts de transport		
— Conteneurs	Méthodologie de l'USACE	T = 1, ..., 50
— Vrac Sec	Normalisation à 0	T = 1, ..., 50
— Vrac liquide	Normalisation à 0	T = 1, ..., 50
Qualité de l'air	Quantité GES (tonnes) * X <sub>i</sub> \$/tonnes	T = 1, ..., 50

## Chapitre 5 : La minimisation du dégagement sous quille

---

La mesure d'adaptation *minimisation du dégagement technologique* consiste à installer des équipements technologiques supplémentaires sur la voie navigable pour suivre les niveaux d'eau en temps réels. Nous rappelons que Comtois et Slack (2015) estiment le gain de niveaux d'eau à **20 centimètres**.

### 5.1 Calcul des coûts

---

Les coûts associés à la minimisation du dégagement sous quille sont principalement les coûts de la mise en place de la technologie et l'entretien de cette dernière. Nous tenons à mentionner qu'une partie de l'infrastructure est déjà en place et que l'ajout d'équipements supplémentaires a pour but de rendre la technologie plus précise. Cette précision supplémentaire a comme objectif de permettre aux navires de pouvoir circuler sur toutes les portions du fleuve en ajustant leur vitesse dans les zones moins profondes.

Selon Comtois et Slack (2015), les coûts de capitalisation de cette technologie sont de 1 000 000\$ et les coûts d'entretien sont de 100 000 \$ par année. Les coûts d'entretien diminuent donc progressivement d'année en année en raison du taux d'actualisation. Les coûts de capitalisation et d'entretien représentent des coûts actualisés de 3 445 557,87 \$. Les coûts ne dépendent pas des scénarios climatiques et sont donc égaux pour chacun des scénarios. Nous faisons l'hypothèse que les coûts d'entretien feront en sorte que cette technologie sera viable pour toute la durée du projet.

## 5.2 Calcul des bénéfices

---

Les bénéfices associés à la minimisation du dégagement sous quille sont de deux ordres. Il y a premièrement les bénéfices reliés à la réduction des coûts de transport et deuxièmement les bénéfices associés à la réduction relative des émissions de gaz à effet de serre. Nous calculons ces avantages à l'aide des équations et des caractéristiques présentées à la section méthodologique.

Dans le cas où nous nous trouvons dans le scénario climatique de *référence*, les coûts de transport sauvés actualisés représentent 20 182 954,16\$ et les bénéfices reliés à la réduction des GES représentent quant à eux 1 479 399,10\$. Dans le cas du scénario climatique *What-if #1*, les bénéfices sont respectivement 30 577 439,44\$ et 1 200 688,40\$. Finalement, pour le scénario *What-if #2*, c'est respectivement 23 205 188,72\$ et 1 223 463,85\$. Les bénéfices sont les plus élevés lorsque nous sommes dans le scénario de changement climatique *What-if #1*, ce qui n'est pas surprenant étant donné la longue période de bas niveaux d'eau entre 2040 et 2050.

## 5.3 Les valeurs actuelles nettes

---

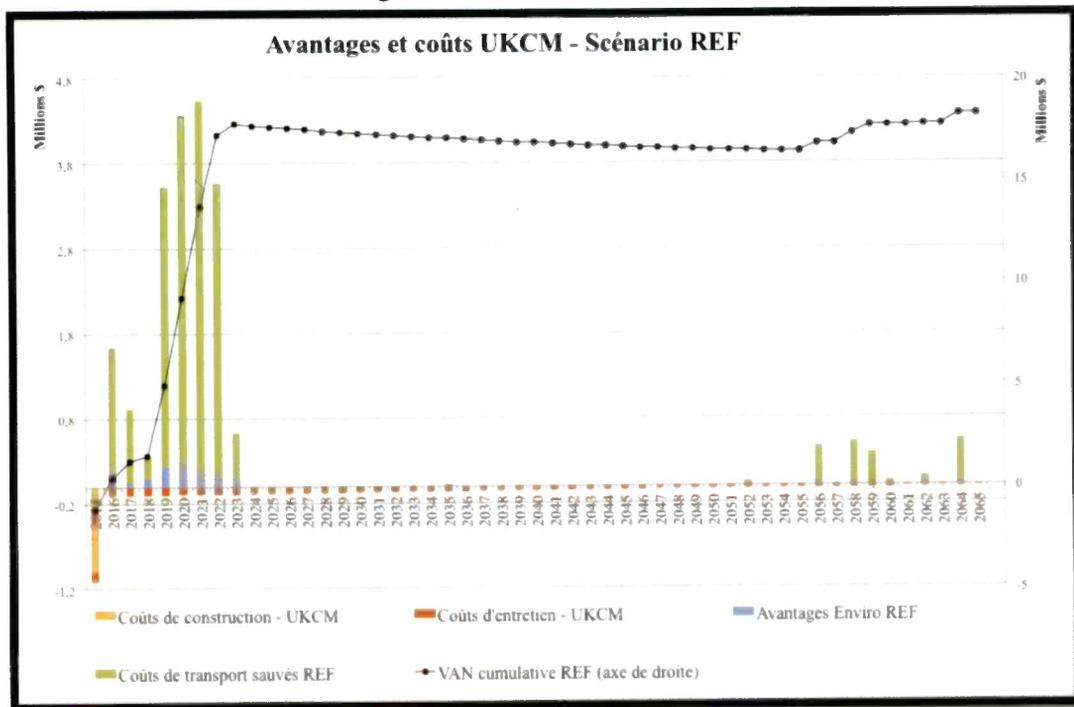
### 5.3.1 Scénario climatique de référence

Dans le cas du scénario de référence, la mesure d'adaptation *minimisation du dégagement sous quille* correspond à une valeur actuelle nette de 18 216 795,38\$. La VAN est donc positive. Le tableau suivant résume les différents avantages et coûts, de même que la VAN :

<i>Bénéfices actualisés</i>	
Coûts de transport sauvés	20 182 954,16 \$
Bénéfices environnementaux	1 479 399,10 \$
<i>Coûts actualisés</i>	
Coût de construction	1 000 000,00 \$
Coûts d'entretien	2 445 557,87 \$
<i>Valeur actuelle nette</i>	18 216 795,38 \$

Le graphique suivant met en relation les coûts et les bénéfices en fonction des périodes. Évidemment, les coûts de construction sont à la première année de la période de référence. Les coûts d'entretien sont répétés chaque année et diminuent graduellement en raison de l'actualisation des valeurs. Les bénéfices quant à eux surviennent également dès le début du projet et pour cette raison, la VAN devient positive dès la deuxième période.

**Graphique 7**  
Avantages et coûts SGDQ – Scénario REF



### 5.3.2 Scénario climatique *What-if #1*

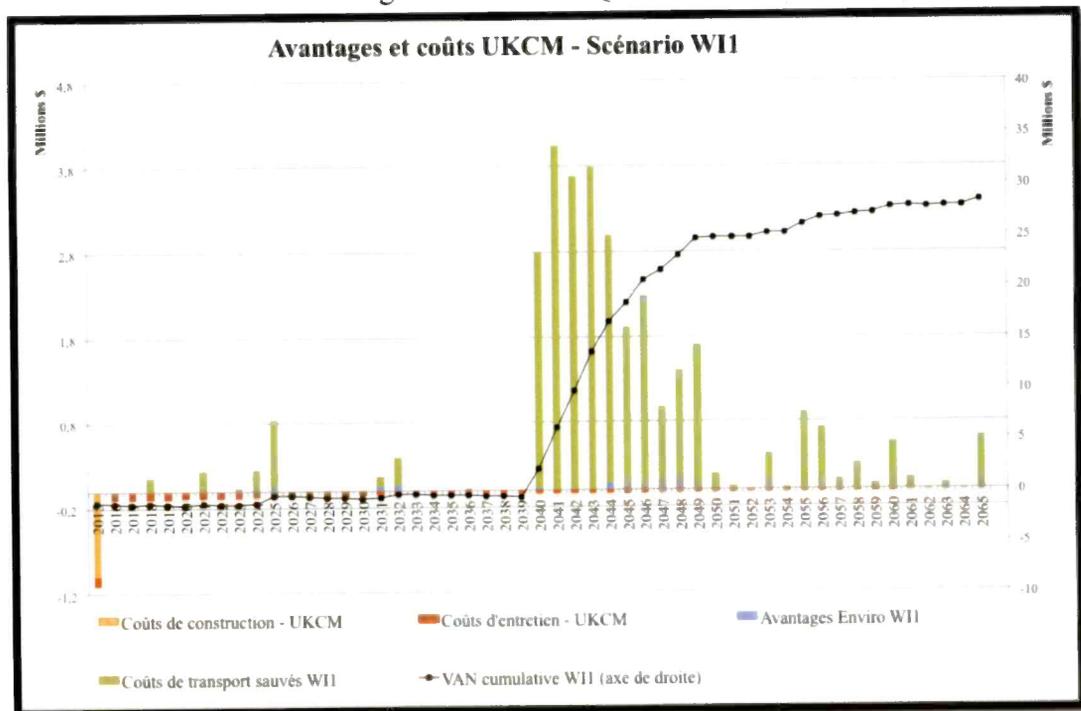
Dans le cas du scénario climatique *What-if #1*, la VAN de cette mesure d'adaptation est de 28 332 569,97\$, elle est donc également positive.

#### Bénéfices et coûts actualisés (W11)

<i>Bénéfices actualisés</i>	
Coûts de transport sauvés	30 577 439,44 \$
Bénéfices environnementaux	1 200 688,40 \$
<i>Coûts actualisés</i>	
Coût de construction	1 000 000,00 \$
Coûts d'entretien	2 445 557,87 \$
<i>Valeur actuelle nette</i>	<b>28 332 569,97 \$</b>

Contrairement à la situation du scénario climatique de référence, la VAN de cette mesure dans le scénario climatique *What-if #1* ne devient positive qu'en 2040. La majorité des bénéfices surviennent entre 2040 et 2050, alors que les coûts sont surtout concentrés au cours de la première année du projet. Ceci est le résultat du modèle de modélisation des niveaux d'eau, qui estime les plus bas niveaux d'eau pendant cette période.

**Graphique 8**  
Avantages et coûts SGDQ – Scénario W11



### 5.3.3 Scénario climatique What-if #2

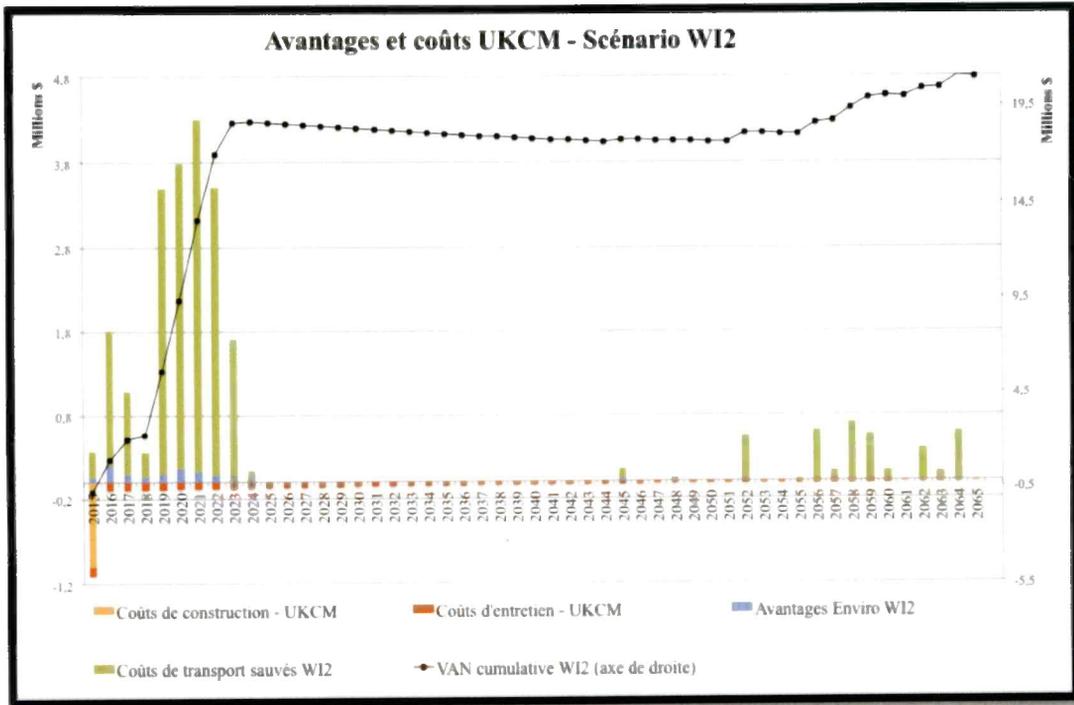
La distribution des coûts et des bénéfices de cette mesure d'adaptation dans le scénario climatique *What-f #2* est similaire à celle du scénario de *référence*. Cela est dû à la construction du scénario climatique. La VAN est positive à 20 983 094,7\$.

#### Bénéfices et coûts actualisés (WI2)

<i>Bénéfices actualisés</i>	
Coûts de transport sauvés	23 205 188,72 \$
Bénéfices environnementaux	1 223 463,85 \$
<i>Coûts actualisés</i>	
Coût de construction	1 000 000,00 \$
Coûts d'entretien	2 445 557,87 \$
<i>Valeur actuelle nette</i>	20 983 094,70 \$

Comme nous le mentionnions précédemment, la distribution des coûts et bénéfices est comparable à celle du scénario de *référence*. Similairement, la VAN devient positive dès la deuxième année. Qui plus est, nous remarquons une diminution de la VAN entre les années 2025 et 2050, principalement en raison des coûts d'entretien et l'absence de bénéfices substantiels durant cette période.

**Graphique 9**  
**Avantages et coûts SGDQ – Scénario W12**



## 5.4 Analyses de sensibilité

Nous procédons ici à plusieurs analyses de sensibilité pour évaluer la résilience de la mesure d'adaptation *minimisation du dégagement sous quille*.

Le tableau suivant représente les coûts et bénéfices lorsque le taux d'actualisation est de 2,5 % plutôt que 3,5 %. Ce changement a principalement un impact lorsque nous analysons la mesure d'adaptation dans le scénario climatique *What-if #1*. La principale raison est la distribution temporelle plus éloignée des bénéfices lorsque nous nous trouvons dans ce scénario.

Taux d'actualisation de 2,5 %	Référence	WI1	WI2
<i>Bénéfices actualisés</i>			
Coûts de transport sauvés	22 122 454,25 \$	40 669 654,66 \$	26 079 632,74 \$
Bénéfices environnementaux	1 651 338,35 \$	1 640 344,58 \$	1 374 339,12 \$
<i>Coûts actualisés</i>			
Coût de construction	1 000 000,00 \$	1 000 000,00 \$	1 000 000,00 \$
Coût d'entretien	2 936 226,47 \$	2 936 226,47 \$	2 936 226,47 \$
<i>Valeur actuelle nette</i>	19 837 566,13 \$	38 373 772,77 \$	23 517 745,39 \$

La prochaine analyse de sensibilité augmente le taux d'actualisation à 7 %. Dans ce cas-ci, nous remarquons également que c'est lorsque nous sommes dans le scénario climatique *What-if #1*, que l'augmentation du taux d'actualisation a le plus d'impact, avec une réduction importante de la valeur de la VAN.

Taux d'actualisation de 7 %	Référence	WI1	WI2
<i>Bénéfices actualisés</i>			
Coût de transport sauvé	15 933 280,19 \$	11 952 199,95 \$	17 461 056,40 \$
Bénéfices environnementaux	1 137 868,24 \$	452 531,99 \$	930 631,69 \$
<i>Coûts actualisés</i>			
Coût de construction	1 000 000,00 \$	1 000 000,00 \$	1 000 000,00 \$
Coût d'entretien	1 480 072,26 \$	1 480 072,26 \$	1 480 072,26 \$
<i>Valeur actuelle nette</i>	14 591 076,18 \$	9 924 659,67 \$	15 911 615,83 \$

Dans cette analyse de sensibilité, nous utilisons les données de Transport Canada pour le nombre d'EVP par cm, soit 6 EVP/cm plutôt que 3,8 EVP/cm. Nous trouvons une nette augmentation de la VAN, peu importe le scénario climatique. Cette

augmentation venant uniquement de l'augmentation des bénéfices reliés aux coûts de transport sauvés.

6 EVP/cm	Référence	WII	WI2
<u>Bénéfices actualisés</u>			
Coûts de transport sauvés	32 342 211,14 \$	49 851 429,91 \$	37 319 455,87 \$
Bénéfices environnementaux	1 479 292,38 \$	1 200 601,79 \$	1 223 375,59 \$
<u>Coûts actualisés</u>			
Coût de construction	1 000 000,00 \$	1 000 000,00 \$	1 000 000,00 \$
Coût d'entretien	2 445 557,87 \$	2 445 557,87 \$	2 445 557,87 \$
<u>Valeur actuelle nette</u>	30 375 945,64 \$	47 606 473,82 \$	35 097 273,59 \$

Dans cette analyse de sensibilité, nous réduisons les coûts de carburant de moitié, 214,49 \$ plutôt que 428,97 \$. Nous trouvons une nette diminution de la VAN, peu importe le scénario climatique. Cette réduction venant uniquement de la diminution des bénéfices reliés aux coûts de transport sauvés.

0,5 * Prix du carburant	Référence	WII	WI2
<u>Bénéfices actualisés</u>			
Coûts de transport sauvés	14204870,67 \$	21520564,8 \$	16331935,46 \$
Bénéfices environnementaux	1 479 399,10 \$	1 200 688,40 \$	1 223 463,85 \$
<u>Coûts actualisés</u>			
Coût de construction	1 000 000,00 \$	1 000 000,00 \$	1 000 000,00 \$
Coût d'entretien	2 445 557,87 \$	2 445 557,87 \$	2 445 557,87 \$
<u>Valeur actuelle nette</u>	12 238 711,90 \$	19 275 695,33 \$	14 109 841,44 \$

Pour cette analyse de sensibilité, nous doublons les coûts de construction. Puisque les coûts de construction ne dépendent pas des scénarios climatiques, cette augmentation a le même impact absolu sur chacune des valeurs actuelles nettes. En termes relatifs toutefois, c'est dans le scénario climatique de *référence* que l'impact est le plus grand.

Coûts de construction x 2	Référence	WII	WI2
<u>Bénéfices actualisés</u>			
Coût de transport sauvés	20 182 954,16 \$	30 577 439,44 \$	23 205 188,72 \$
Bénéfices environnementaux	1 479 399,10 \$	1 200 688,40 \$	1 223 463,85 \$
<u>Coûts actualisés</u>			
Coût de construction	2 000 000,00 \$	2 000 000,00 \$	2 000 000,00 \$
Coût d'entretien	2 445 557,87 \$	2 445 557,87 \$	2 445 557,87 \$
<u>Valeur actuelle nette</u>	17 216 795,39 \$	27 332 569,97 \$	19 983 094,70 \$

## Chapitre 6 : Le dragage

---

Cette mesure d'adaptation consiste à augmenter la profondeur navigable du chenal de 40 centimètres en utilisant du dragage. Malgré des bénéfices économiques, celle-ci entraîne cependant des impacts environnementaux substantiels qu'il faut comptabiliser.

### 6.1 Calcul des coûts

---

La mesure d'adaptation *dragage* implique des coûts importants en début de projet, en raison principalement des coûts de capitalisation, mais également en raison de l'hypothèse qu'une partie des sédiments nécessiteront une décontamination et aussi parce que nous faisons l'hypothèse que le dragage nécessitera une compensation d'habitat.

En ce qui a trait aux coûts de capitalisation, Comtois et Slack (2015) estiment que la quantité de sédiments à draguer pour augmenter la profondeur de 40 cm sera de 105 247 m<sup>3</sup>. Cette quantité à draguer ne prend pas en considération l'effet des marées. Le coût de draguer 95 % de cette quantité est de 7 498 848,75\$ à la première période du projet. Nous ne considérons pas des coûts d'entretien (i.e. dragage d'entretien) puisque c'est une activité qui est déjà accomplie dans le scénario *statu quo*. Nous avons fait l'hypothèse, basée sur le dernier dragage de capitalisation important de 1999 que 5 % de cette quantité totale devra être traitée différemment en raison de la potentielle contamination. Cela ajoute des coûts de 615 294,95\$. Finalement, nous attribuons des coûts de 650 000\$ pour la compensation d'habitats, basée sur l'utilisation complète de la banque d'habitats de compensation du Port de Montréal.

## 6.2 Calcul des bénéfices

---

Nous calculons le premier bénéfice en utilisant la méthodologie de l'USACE présentée à la section méthodologique. Nous rappelons qu'il s'agit de calculer la diminution du coût moyen unitaire de transporter un conteneur pour ensuite calculer les coûts totaux de transport sauvés de la mesure d'adaptation à l'étude. Le deuxième bénéfice est le résultat de la diminution relative des GES en raison de la diminution de la distance à parcourir des bateaux. Cette baisse de la distance est le résultat du maintien de certaines parts de marchés en raison d'un niveau d'eau compétitif. Les résultats pour le scénario climatique de *référence* sont de 26 907 245,44\$ en coûts de transport sauvés et 2 331 311,17\$ en bénéfices environnementaux. Dans le cas du scénario climatique *What-if #1*, les bénéfices sont respectivement 50 649 268,39\$ et 1 900 675,60\$. Finalement, dans le cas du scénario climatique *What-if #2*, les coûts de transport sauvés représentent 34 495 456,08\$ et les bénéfices environnementaux 2 254 834,27\$. Il est intéressant de constater que les coûts de transport sauvés les plus importants sont dans le scénario climatique *What-if #1*, et que ce même scénario a les plus faibles bénéfices environnementaux.

## 6.3 Valeurs actuelles nettes

---

### 6.3.1 Scénario climatique REF

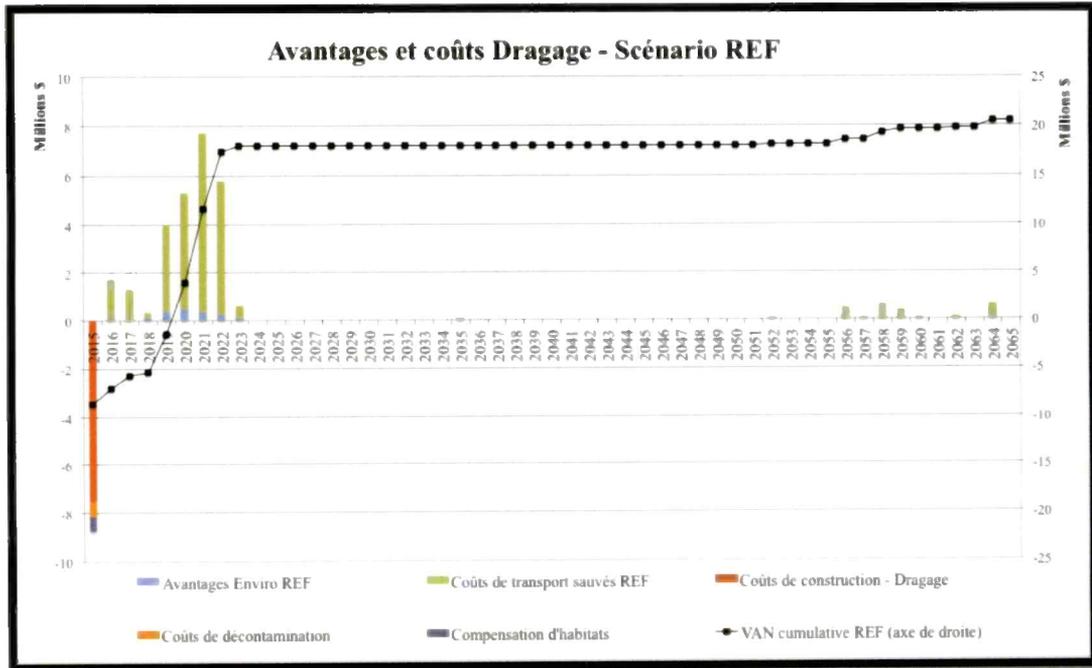
Dans le cas du scénario climatique de *référence*, la valeur actuelle nette de la mesure d'adaptation dragage est de 20 474 012,91\$. Le tableau suivant résume les coûts et les bénéfices actualisés.

#### Bénéfices et coûts actualisés (REF)

<u>Bénéfices actualisés</u>	
Coûts de transport sauvés	26 907 245,44 \$
Bénéfices environnementaux	2 331 311,17 \$
<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>	20 474 012,91 \$

La distribution des coûts et des bénéfices est concentrée dans les premières années du projet. La courbe de la VAN devient positive rapidement, en 2019, seulement quatre années après le début du projet.

**Graphique 10**  
Avantages et coûts Dragage – Scénario REF



6.3.2 Scénario climatique de What-if #1

La mesure d'adaptation *dragage* entraîne une VAN de 43 785 400,29\$ dans le scénario climatique W11. Cette VAN est positive surtout en raison des coûts de transport sauvés. En effet, l'amplitude et la fréquence des variations sont très importantes dans ce scénario.

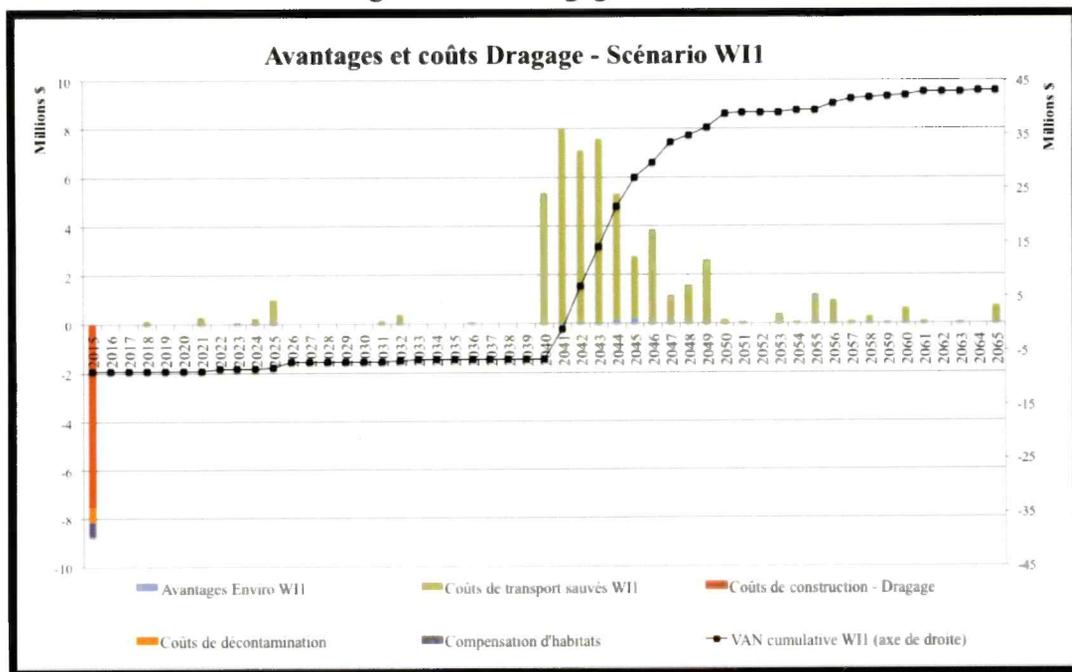
**Bénéfices et coûts actualisés (W11)**

<i>Bénéfices actualisés</i>	
Coûts de transport sauvés	50 649 268,39 \$
Bénéfices environnementaux	1 900 675,60 \$
<i>Coûts actualisés</i>	
Coût de construction	7 498 848,75 \$
Coût de décontamination	615 694,95 \$
Compensation d'habitat	650 000,00 \$
<i>Valeur actuelle nette</i>	43 785 400,29 \$

Ce scénario climatique est, par construction, très différent des deux autres. Les bénéfices économiques surviennent plus tard dans le projet et c'est pourquoi la courbe de VAN ne devient positive qu'en 2042.

Il n'y a presque aucun bénéfice à ce projet pendant les 35 premières années à l'étude. Toutefois, dès qu'ils surviennent, ces bénéfices sont très importants. Le prochain graphique présente la courbe de la VAN.

**Graphique 11**  
Avantages et coûts Dragage – Scénario W11



### 6.3.3 Scénario climatique de What-if #2

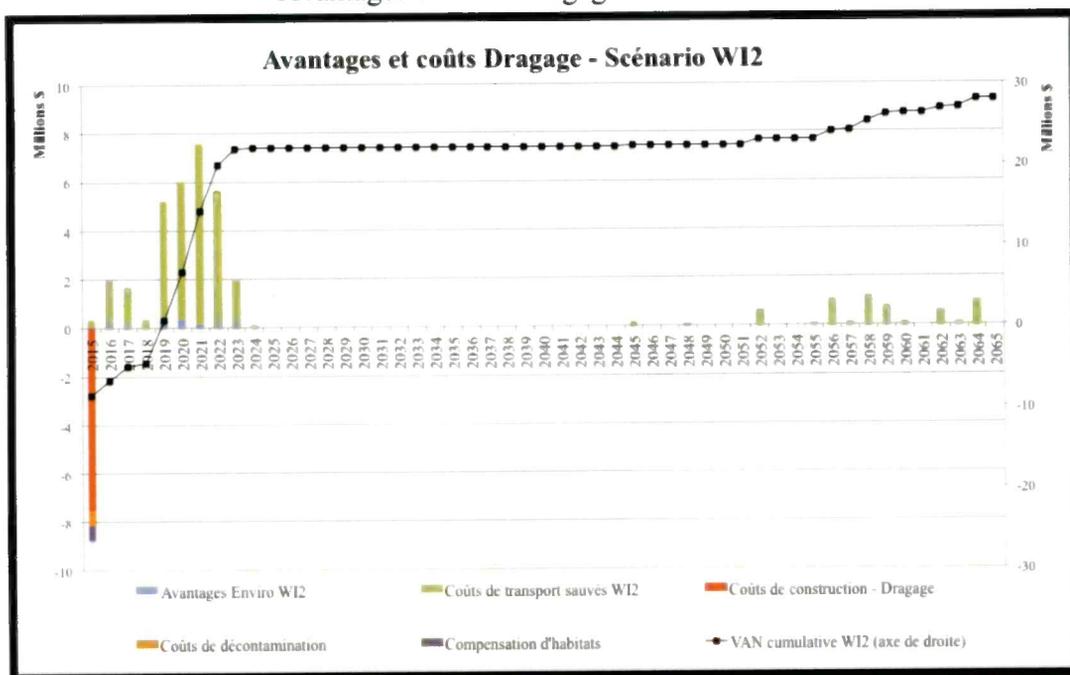
La valeur actuelle nette de la mesure d'adaptation dragage du scénario climatique *What-if #2* est de 27 985 746,65\$. Ce scénario est similaire au scénario de *référence* à l'exception que l'amplitude des variations est plus importante, ce qui se traduit en des bénéfices plus importants.

### Bénéfices et coûts actualisés (W12)

<i>Bénéfices actualisés</i>	
Coûts de transport sauvés	34 495 456,08 \$
Bénéfices environnementaux	2 254 834,27 \$
<i>Coûts actualisés</i>	
Coût de construction	7 498 848,75 \$
Coût de décontamination	615 694,95 \$
Compensation d'habitat	650 000,00 \$
<i>Valeur actuelle nette</i>	27 985 746,65 \$

Le prochain graphique représente les différents coûts et bénéfices pour toutes les périodes. Dans ce scénario, la courbe de la VAN devient positive en 2019, comme dans le scénario de *référence*.

**Graphique 12**  
Avantages et coûts Dragage – Scénario W12



## 6.4 Analyses de sensibilité

Nous procédons à plusieurs analyses de sensibilité pour évaluer la résilience de la mesure d'adaptation *dragage*.

La première analyse de sensibilité que nous effectuons est de réduire la profondeur de dragage de 20 cm. Cette diminution a le plus d'impact dans le scénario climatique *W11* dans lequel la VAN est réduite d'un peu plus de 16 M\$. L'effet est moindre, mais tout de même conséquent dans les deux autres scénarios.

Dragage de 20 cm	Référence	W11	W12
<i>Bénéfices actualisés</i>			
Coûts de transport sauvés	20 182 954,16 \$	30 577 439,44 \$	23 205 188,72 \$
Bénéfices environnementaux	1 479 292,38 \$	1 200 601,79 \$	1 224 710,28 \$
<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>	17 176 750,88 \$	27 292 545,57 \$	19 944 403,34 \$

La deuxième analyse de sensibilité consiste à augmenter la profondeur à draguer de 20 cm. Cette analyse est fort intéressante puisque nous remarquons que la VAN du scénario de *référence* et *W12* est réduite, malgré une augmentation des bénéfices. Ceci est un résultat important puisqu'il indique qu'une augmentation de la profondeur n'est pas nécessairement synonyme d'augmentation des bénéfices, dans un contexte de maintien du *statu quo*, bien entendu. À l'inverse, la VAN de la mesure d'adaptation dans le scénario climatique *W11* augmente.

Dragage de 60 cm	Référence	W11	W12
<i>Bénéfices actualisés</i>			
Coûts de transport sauvés	27 541 019,93 \$	64 546 646,71 \$	37 521 733,39 \$
Bénéfices environnementaux	2 565 499,33 \$	2 367 997,56 \$	2 787 154,45 \$
<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>	16 619 401,21 \$	53 427 526,22 \$	26 821 769,79 \$

Cette prochaine analyse de sensibilité consiste à réduire le taux d'actualisation à 2,5 %. Sans surprise et similairement à la mesure d'adaptation précédente, c'est lorsque nous nous trouvons dans le scénario climatique *WII* que l'impact est le plus considérable, la VAN passant d'environ 43 M\$ à plus de 60 M\$.

Taux d'actualisation de 2,5 %	Référence	W11	W12
<i>Bénéfices actualisés</i>			
Coûts de transport sauvés	29 351 603,05 \$	67 042 608,15 \$	38 845 829,15 \$
Bénéfices environnementaux	2 581 887,77 \$	2 584 119,12 \$	2 527 169,34 \$
<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>	23 168 947,12 \$	60 862 183,57 \$	32 608 454,79 \$

À l'inverse, lorsque nous augmentons le taux d'actualisation jusqu'à 7 %, les bénéfices de cette mesure d'adaptation sont fortement réduits dans le scénario *W11*. Cela est principalement dû à la période temporelle où surviennent les bénéfices, qui est plus éloignée que dans les deux autres scénarios climatiques.

Taux d'actualisation de 7 %	Référence	W11	W12
<i>Bénéfices actualisés</i>			
Coûts de transport sauvés	21 336 852,17 \$	19 914 317,15 \$	25 813 532,09 \$
Bénéfices environnementaux	1 813 534,28 \$	723 958,14 \$	1 714 249,66 \$
<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>	14 385 842,75 \$	11 873 731,59 \$	18 763 238,05 \$

Dans cette analyse de sensibilité, nous utilisons les données de Transport Canada pour le nombre d'EVP par centimètre de niveau d'eau. Nous constatons qu'il s'agit de l'un des éléments qui a une grande influence sur la VAN, peu importe le scénario climatique.

6EVP/cm	Référence	W11	W12
<i>Bénéfices actualisés</i>			
Coûts de transport sauvés	43 204 887,98 \$	82 936 321,48 \$	55 610 129,71 \$
Bénéfices environnementaux	2 331 143,00 \$	1 900 538,48 \$	2 254 834,27 \$
<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>	36 771 487,28 \$	76 072 316,26 \$	49 100 420,28 \$

Dans cette analyse de sensibilité, nous réduisons les coûts de carburant de moitié. Nous constatons que les bénéfices reliés aux coûts de transport sauvés sont nettement diminués. Cela est conséquent avec notre méthodologie.

0,5 * prix du carburant	Référence	W11	W12
<i>Bénéfices actualisés</i>			
Coûts de transport sauvés	18937462,7 \$	35647224,96 \$	24278085,79 \$
Bénéfices environnementaux	2 331 143,00 \$	1 900 538,48 \$	2 254 834,27 \$
<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>	12 504 062,00 \$	28 783 219,74 \$	17 768 376,36 \$

Lorsque nous doublons les coûts de construction, toutes les VAN restent positives, peu importe le scénario. Ces dernières sont seulement réduites d'un montant équivalent aux coûts de construction.

Coûts de construction x 2	Référence	W11	W12
<i>Bénéfices actualisés</i>			
Coûts de transport sauvés	26 907 245,44 \$	50 649 268,39 \$	34 495 456,08 \$
Bénéfices environnementaux	2 331 311,17 \$	1 900 675,60 \$	2 254 834,27 \$
<i>Coûts actualisés</i>			
Coûts de construction	14 997 697,50 \$	14 997 697,50 \$	14 997 697,50 \$
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>	12 975 164,16 \$	36 286 551,54 \$	20 486 897,90 \$

Finalement, lorsque nous doublons les coûts environnementaux, toutes les VAN restent également positives. Ce résultat est important puisqu'il y a une grande incertitude dans les impacts environnementaux potentiels.

Coûts environnementaux x 2	Référence	W11	W12
<i>Bénéfices actualisés</i>			
Coûts de transport sauvés	26 907 245,44 \$	50 649 268,39 \$	34 495 456,08 \$
Bénéfices environnementaux	2 331 311,17 \$	1 900 675,60 \$	2 254 834,27 \$
<i>Coûts actualisés</i>			
Coûts de construction	7 104 172,50 \$	7 104 172,50 \$	7 104 172,50 \$
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>	19 602 994,21 \$	42 914 381,59 \$	27 114 727,95 \$

## Chapitre 7 : La combinaison des deux mesures

---

Cette dernière mesure d'adaptation consiste à combiner les deux mesures d'adaptations précédentes, c'est-à-dire la *minimisation du dégagement sous quille* et le *dragage*. Nous jugeons cette combinaison pertinente puisqu'elle permet l'atteinte d'une plus grande profondeur, **60 cm**, tout en n'ajoutant pas de coûts environnementaux supplémentaires par rapport à l'option de draguer.

### 7.1 Calcul des coûts

---

Le calcul des coûts pour cette dernière analyse consiste à additionner les coûts des deux mesures précédemment à l'étude. Les coûts sont équivalents pour chacun des scénarios. Ils sont de 12 012 758,56\$ au total. Il s'agit d'une augmentation significative des coûts par rapport aux deux autres options. Similairement aux deux analyses précédentes, les coûts sont uniformes pour tous les scénarios.

### 7.2 Calcul des bénéfices

---

Finalement, les bénéfices économiques correspondent à un gain de 60 cm de niveau d'eau. Dans le cas du scénario de *référence*, cela équivaut à des coûts de transport sauvés de 27 541 019,93\$ et des bénéfices environnementaux de 2 565 684,42\$. Dans le cas du scénario *What-if #1*, les bénéfices sont respectivement de 64 546 646,71\$ et de 2 370 581,01\$. Finalement, lorsque nous analysons le scénario climatique *What-if #2*, les bénéfices sont de 37 521 733,39\$ et de 2 787 154,45\$.

### 7.3 Valeurs actuelles nettes

#### 7.3.1 Scénario climatique de référence

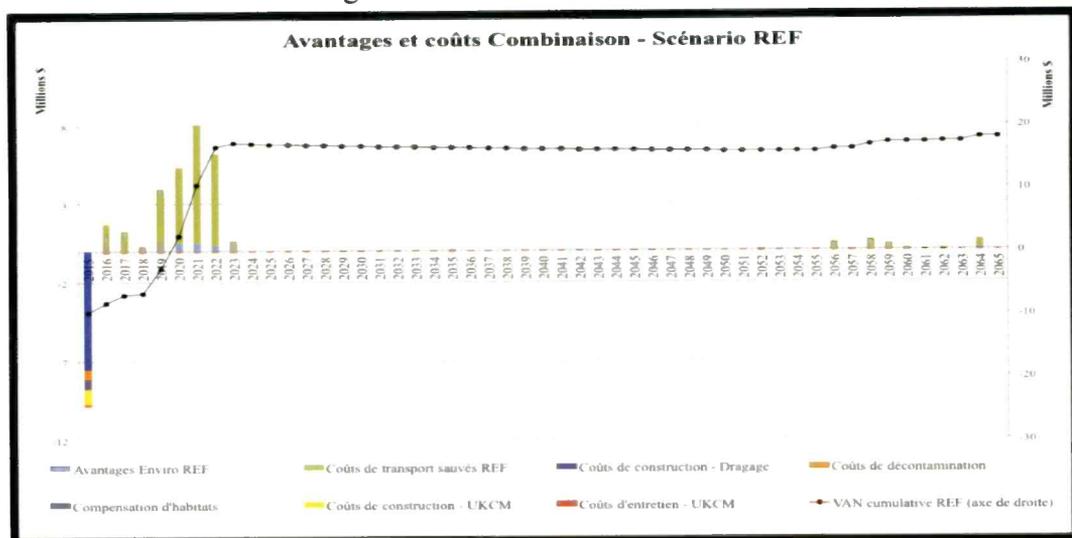
La valeur actuelle nette de la mesure d'adaptation *combinaison* du scénario climatique *de référence* est de 17 896 602,77\$. La forte majorité des coûts et des bénéfices surviennent dans les premières années de la période temporelle à l'étude.

Bénéfices et coûts actualisés (REF)

<i>Bénéfices actualisés</i>	
Coûts de transport sauvés	27 541 019,93 \$
Bénéfices environnementaux	2 565 684,42 \$
<i>Coûts actualisés</i>	
Coûts de dragage	7 498 848,75 \$
Coûts de capitalisation SGDQ	1 000 000,00 \$
Coûts d'entretien SGDQ	2 445 557,87 \$
Coûts de décontamination	615 694,95 \$
Compensation d'habitat	650 000,00 \$
<i>Valeur actuelle nette</i>	17 896 602,77 \$

Le graphique suivant permet de visualiser la distribution des coûts et des bénéfices et permet également de constater que la courbe des VAN devient positive durant l'année 2020, soit cinq années après le début du projet.

**Graphique 13**  
Avantages et coûts Combinaison – Scénario REF



### 7.3.2 Scénario climatique *What-if #1*

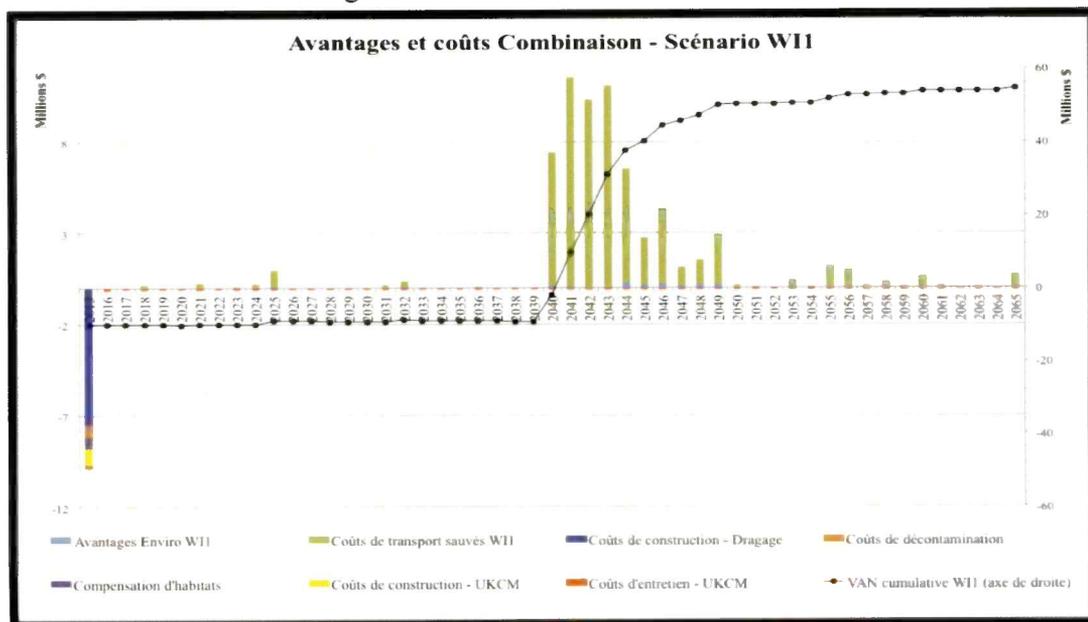
Dans le scénario climatique *What-if #1*, la valeur actuelle nette est de 54 707 126,15\$. Encore une fois, la fréquence et l'amplitude des variations de niveaux d'eau entre les années 2040 et 2050 expliquent l'ampleur des bénéfices reliés aux coûts de transport sauvés.

Bénéfices et coûts actualisés (W11)

<u>Bénéfices actualisés</u>	
Coûts de transport sauvés	64 546 646,71 \$
Bénéfices environnementaux	2 370 581,01 \$
<u>Coûts actualisés</u>	
Coûts de dragage	7 498 848,75 \$
Coûts de capitalisation SGDQ	1 000 000,00 \$
Coûts d'entretien SGDQ	2 445 557,87 \$
Coûts de décontamination	615 694,95 \$
Compensation d'habitat	650 000,00 \$
<u>Valeur actuelle nette</u>	54 707 126,15 \$

La distribution des coûts et des bénéfices est dichotomique dans ce scénario climatique. En effet, la presque totalité des coûts est en début de projet alors que les bénéfices sont plutôt en milieu de projet.

**Graphique 14**  
Avantages et coûts Combinaison – Scénario W11



### 7.3.3 Scénario climatique *What-if* #2

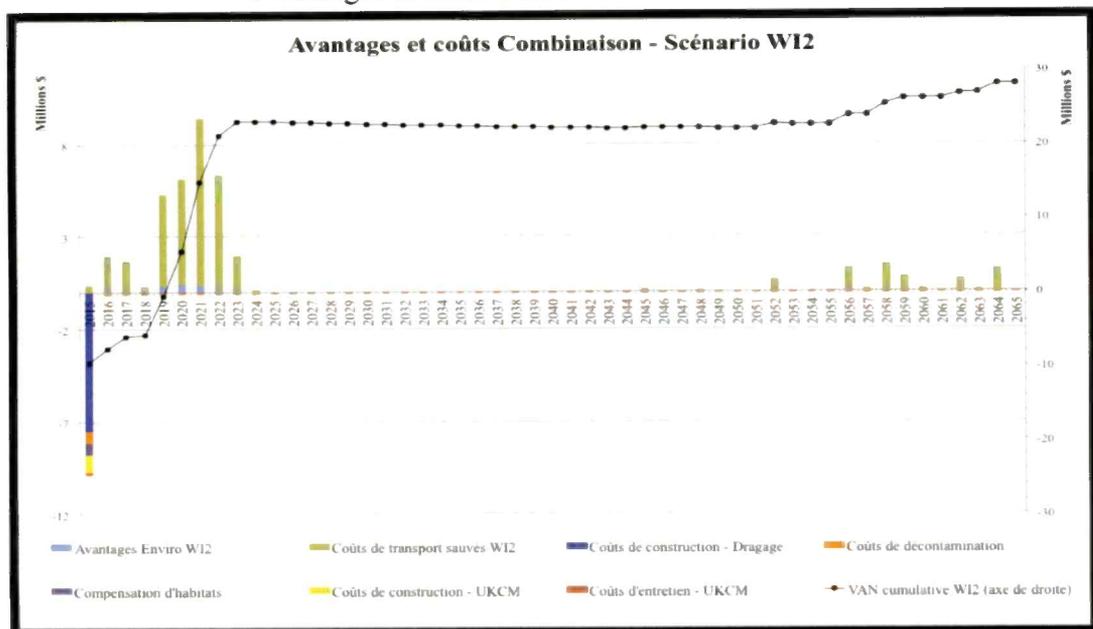
La mesure d'adaptation *combinaison* possède une valeur actuelle nette, dans le scénario climatique *What-if* #2, de 28 098 786,27\$. Ce scénario est similaire au scénario de *référence* à l'exception que l'amplitude des variations est plus importante, ce qui se traduit en des bénéfices plus importants.

Bénéfices et coûts actualisés (W12)

<i>Bénéfices actualisés</i>	
Coûts de transport sauvés	37 521 733,39 \$
Bénéfices environnementaux	2 787 154,45 \$
<i>Coûts actualisés</i>	
Coûts de dragage	7 498 848,75 \$
Coûts de capitalisation SGDQ	1 000 000,00 \$
Coûts d'entretien SGDQ	2 445 557,87 \$
Coûts de décontamination	615 694,95 \$
Compensation d'habitat	650 000,00 \$
<i>Valeur actuelle nette</i>	28 098 786,27 \$

La distribution des coûts et des bénéfices est concentrée dans les premières années du projet. La courbe de la VAN devient positive rapidement, en 2020, seulement 5 années après le début du projet.

**Graphique 15**  
Avantages et coûts Combinaison – Scénario W12



## 7.4 Analyses de sensibilité

Nous procédons à plusieurs analyses de sensibilité pour évaluer la résilience de la mesure d'adaptation *combinaison*.

Dans cette première analyse de sensibilité, nous réduisons la profondeur du dragage de 20 cm, pour obtenir un gain de 40 centimètres, au lieu de 60. Nous faisons cette exercice de manière à pouvoir comparer ce résultat avec les résultats obtenus dans la section sur le dragage au chapitre 6. Cette variation a comme effet d'augmenter les VAN de cette mesure d'adaptation dans les scénarios climatiques de *référence* et *WI2*, ce qui s'avère être un résultat fondamental. À l'inverse, cette diminution de la profondeur entraîne une diminution de la VAN dans le cas du scénario climatique *WI1*.

Dragage de 20 cm	Référence	WI1	WI2
<i>Bénéfices actualisés</i>			
Coûts de transport sauvés	26 907 245,44 \$	50 649 268,39 \$	34 495 456,08 \$
Bénéfices environnementaux	2 331 311,17 \$	1 902 611,95 \$	2 254 834,27 \$
<i>Coûts actualisés</i>			
Coûts de dragage	3 544 475,56 \$	3 544 475,56 \$	3 544 475,56 \$
Coûts de capitalisation SGDQ	1 000 000,00 \$	1 000 000,00 \$	1 000 000,00 \$
Coûts d'entretien SGDQ	2 445 557,87 \$	2 445 557,87 \$	2 445 557,87 \$
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>	21 307 503,08 \$	44 620 826,81 \$	28 819 236,82 \$

Dans cette deuxième analyse de sensibilité, nous augmentons la profondeur du dragage de 20 cm, pour obtenir un gain total de 80 cm. Dans ce cas-ci, l'augmentation des coûts entraîne une diminution significative de la VAN dans les scénarios climatiques *référence* et *WI2*. Dans l'autre scénario, il y a une augmentation de la VAN.

Dragage de 60 cm	Référence	WI1	WI2
<i>Bénéfices actualisés</i>			
Coûts de transport sauvés	27 541 019,93 \$	73 847 665,12 \$	37 549 210,02 \$
Bénéfices environnementaux	2 565 499,33 \$	2 721 339,73 \$	2 823 888,50 \$
<i>Coûts actualisés</i>			
Coûts de dragage	11 863 095,47 \$	11 863 095,47 \$	11 863 095,47 \$
Coûts de capitalisation SGDQ	1 000 000,00 \$	1 000 000,00 \$	1 000 000,00 \$
Coûts d'entretien SGDQ	2 445 557,87 \$	2 445 557,87 \$	2 445 557,87 \$
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>	13 173 843,34 \$	59 636 328,92 \$	23 440 422,60 \$

Lorsque nous diminuons le taux d'actualisation jusqu'à 2,5 %, la VAN de cette mesure augmente peu importe les scénarios, mais plus particulièrement dans *What-if #1*.

Taux d'actualisation de 2,5 %	Référence	WI1	WI2
<i>Bénéfices actualisés</i>			
Coûts de transport sauvés	30 026 473,71 \$	85 132 736,43 \$	42 348 473,04 \$
Bénéfices environnementaux	2 831 128,47 \$	3 205 903,52 \$	3 130 370,10 \$
<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	2 936 226,47 \$	2 936 226,47 \$	2 936 226,47 \$
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>	20 156 832,01 \$	75 637 869,78 \$	32 778 072,97 \$

Lorsque nous augmentons le taux d'actualisation à 7 %, nous avons l'effet inverse de l'analyse de sensibilité précédente. L'effet le plus important se trouvant encore une fois dans le scénario *What-if #1*.

Taux d'actualisation de 7 %	Référence	WI1	WI2
<i>Bénéfices actualisés</i>			
Coûts de transport sauvés	21 848 047,98 \$	25 558 667,27 \$	27 926 460,55 \$
Bénéfices environnementaux	2 003 383,69 \$	905 457,68 \$	2 103 042,59 \$
<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	1 480 072,26 \$	1 480 072,26 \$	1 480 072,26 \$
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>	12 606 815,71 \$	15 219 508,99 \$	18 784 887,18 \$

Dans cette analyse de sensibilité, nous utilisons les données de Transport Canada pour le nombre d'EVP par cm, c'est-à-dire 6 EVP/cm au lieu de 3,8 EVP/cm. Cette augmentation d'un élément central du calcul des bénéfices entraîne une augmentation significative de la VAN, peu importe le scénario climatique.

6 EVP/cm	Référence	WI1	WI2
<i>Bénéfices actualisés</i>			
Coûts de transport sauvés	44 235 567,12 \$	106 037 479,23 \$	60 548 472,29 \$
Bénéfices environnementaux	2 565 499,33 \$	2 370 581,01 \$	2 787 154,45 \$
<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	2 445 557,87 \$	2 445 557,87 \$	2 445 557,87 \$
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>	34 590 964,87 \$	96 197 958,67 \$	51 125 525,17 \$

Dans cette analyse de sensibilité, nous réduisons les coûts de carburant de moitié. Cette diminution entraîne une diminution significative de la VAN, peu importe scénario climatique.

0,5 * prix du carburant	Référence	WI1	WI2
<i>Bénéfices actualisés</i>			
Coûts de transport sauvés	19383516,57 \$	45428273,87 \$	26407995,88 \$
Bénéfices environnementaux	2 565 684,42 \$	2 370 581,01 \$	2 787 154,45 \$
<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	2 445 557,87 \$	2 445 557,87 \$	2 445 557,87 \$
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>	9 739 099,41 \$	35 588 753,31 \$	16 985 048,76 \$

L'analyse de sensibilité suivante double les coûts de construction. Nous constatons que dans, ce cas-ci, la VAN de cette mesure dans le scénario de *référence* est drastiquement réduite.

Coûts de construction x2	Référence	WI1	WI2
<i>Bénéfices actualisés</i>			
Coûts de transport sauvés	27 541 019,93 \$	64 546 646,71 \$	37 521 733,39 \$
Bénéfices environnementaux	2 565 684,42 \$	2 370 581,01 \$	2 787 154,45 \$
<i>Coûts actualisés</i>			
Coûts de dragage	14 997 697,50 \$	14 997 697,50 \$	14 997 697,50 \$
Coûts de capitalisation SGDQ	2 000 000,00 \$	2 000 000,00 \$	2 000 000,00 \$
Coûts d'entretien SGDQ	4 891 115,75 \$	4 891 115,75 \$	4 891 115,75 \$
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>	6 952 196,15 \$	43 762 719,52 \$	17 154 379,64 \$

Finalement, le fait de doubler les coûts environnementaux n'a qu'un effet marginal sur la VAN, peu importe le scénario.

Coûts environnementaux x2	Référence	WI1	WI2
<i>Bénéfices actualisés</i>			
Coûts de transport sauvés	27 541 019,93 \$	64 546 646,71 \$	37 521 733,39 \$
Bénéfices environnementaux	2 565 684,42 \$	2 370 581,01 \$	2 787 154,45 \$
<i>Coûts actualisés</i>			
Coûts de dragage	7 104 172,50 \$	7 104 172,50 \$	7 104 172,50 \$
Coûts de capitalisation SGDQ	1 000 000,00 \$	1 000 000,00 \$	1 000 000,00 \$
Coûts d'entretien SGDQ	2 445 557,87 \$	2 445 557,87 \$	2 445 557,87 \$
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>	17 025 584,07 \$	53 836 107,45 \$	27 227 767,57 \$

## Chapitre 8 : Analyse des Résultats

---

Il nous apparaît important de mettre les évaluations coûts-bénéfices en perspective, selon les différents scénarios climatiques. En effet, les scénarios climatiques sont mutuellement exclusifs, c'est-à-dire que l'on peut seulement se trouver dans l'un ou dans l'autre (ou dans un scénario non-traité dans cette étude). Il faut donc déterminer quelle mesure d'adaptation est la plus résiliente à travers l'ensemble des scénarios. Choisir uniquement une mesure d'adaptation parce qu'elle présente une VAN élevée dans un scénario revient en quelque sorte à choisir à la fois la mesure et le scénario climatique qui nous convient. Cela n'a que peu d'intérêt puisque la société n'a que très peu d'influence sur le scénario climatique dans lequel nous nous trouverons dans le futur.

### 8.1 Le scénario de référence

---

Dans le scénario climatique que le Consortium Ouranos considère comme étant de *référence*, la mesure d'adaptation ayant la plus grande VAN est le *dragage*, qui permet d'obtenir une profondeur supplémentaire de **40 centimètres**. Nous rappelons les résultats ici :

<i>Mesure d'adaptation</i>	<i>Valeur actuelle nette</i>
SGDQ	18 216 795,38 \$
Dragage	<b>20 474 012,91 \$</b>
Combinaison	17 896 602,77 \$

Nous tenons à souligner à nouveau que le scénario climatique de *référence* est construit à travers la reproduction des cycles historiques de variation des niveaux d'eau, ce qui implique qu'il n'y a donc pas nécessairement d'accélération des changements climatiques. Les analyses de sensibilité que nous avons effectuées nous ont permis de tirer une conclusion importante, qui nous pousse à relativiser notre

analyse. En effet, la combinaison de la *minimisation du dégagement sous quille* ET d'un dragage de 20 centimètres permet l'atteinte d'une valeur actuelle nette plus élevée que le dragage sous les hypothèses de base. Cette combinaison permet également d'atteindre une profondeur de **40 centimètres**, mais à coût moins élevé, ce qui augmente la valeur actuelle nette. En effet, les coûts de construction reliés à la combinaison de 20 cm du SGDQ et de 20 cm de dragage sont plus faibles que draguer 40 centimètres. La VAN est en fait de 21 307 503,08\$.

## 8.2 Le scénario *What-if #1*

---

Dans le scénario de changement climatique *What-if #1*, la mesure d'adaptation ayant la VAN la plus élevée est la *combinaison* des deux mesures avec 54 707 126,15\$. Ce scénario de changement climatique entraîne une fréquence importante de variations négatives de niveaux d'eau et une grande amplitude de celles-ci. Le tableau suivant résume les VAN de chacune des mesures :

<i>Mesure d'adaptation</i>	<i>Valeur actuelle nette</i>
SGDQ	28 332 569,97 \$
Dragage	43 785 400,29 \$
Combinaison	<b>54 707 126,15 \$</b>

Dans ce scénario climatique, nous constatons que les bénéfices associés aux coûts de transport sauvés sont très importants et augmentent significativement lorsque nous augmentons la profondeur. Comme nous l'avons mentionné précédemment, ce scénario provient d'une méthodologie fréquemment utilisée dans la modélisation des niveaux d'eau. Nous remarquons également que la majorité des bénéfices se situent après 2040. Ce faisant, il pourrait être pertinent de se questionner sur la nécessité de réaliser le projet en 2015. D'un autre côté, il est difficile de déterminer avec exactitude dans quel scénario climatique nous nous trouvons.

### 8.3 Le scénario *What-if* #2

---

Dans le cas du scénario climatique *What-if* #2, la mesure d'adaptation présentant la plus grande VAN est la *combinaison* des deux mesures avec une VAN de 28 098 786,27\$. Le tableau suivant résume les valeurs actuelles nettes de chacune des mesures :

<i>Mesure d'adaptation</i>	<i>Valeur actuelle nette</i>
SGDQ	20 983 094,70 \$
Dragage	27 985 746,65 \$
Combinaison	<b>28 098 786,27 \$</b>

Deux éléments nous semblent cependant pertinents à souligner. Premièrement, les analyses de sensibilité nous ont permis de déterminer que la mesure d'adaptation *dragage* est très sensible à la variation des coûts de construction. En effet, lorsque nous avons doublé ces coûts (uniquement pour le dragage), il s'est avéré que la mesure d'adaptation *minimisation du dégagement sous quille* devenait plus intéressante. Nous mentionnons ce fait puisque nous jugeons plus probable que la mesure d'adaptation *dragage* puisse faire face à des augmentations de coûts étant donné l'incertitude inhérente à ce genre de projet. Deuxièmement, si nous réduisons la quantité à draguer de 20 centimètres dans la mesure *combinaison*, nous remarquons que la VAN augmente à 28 819 236,82\$. Ce résultat démontre que dans ce scénario, il n'est pas nécessaire de draguer 40 centimètres.

## 8.4 Sommaire

---

À la lumière de ces résultats, nous constatons que la mesure d'adaptation *combinaison* semble être celle qui induit le plus d'avantages par rapport aux coûts. Cette mesure s'est avérée être la plus résiliente à travers tous les scénarios climatiques. Qui plus est, cette mesure permet d'être plus flexible sur les quantités à draguer puisque la *minimisation* permet un gain initial de 20 centimètres sans réel impact sur l'environnement.

Plusieurs éléments peuvent avoir un impact sur la valeur actuelle nette. Par exemple, le fait de doubler les coûts de construction fait beaucoup varier la VAN pour les mesures *dragage* et *combinaison*. Cette possibilité est bien réelle, nous pourrions par exemple avoir sous-estimé la quantité de sédiments à draguer. Le coût par mètre cube de 75\$ utilisé pourrait également être sous-estimé puisqu'il s'agit d'un coût moyen et certaines sections du fleuve pourraient avoir des coûts plus élevés en raison d'une sédimentation différente par exemple.

Un autre élément qui pourrait faire varier significativement les résultats est le coût du carburant. Lorsque nous avons réduit celui-ci de moitié dans les analyses de sensibilité, nous avons remarqué que cela diminuait la VAN de manière importante. C'est un élément important à considérer comme nous le démontre la récente baisse importante des cours du pétrole. C'est l'un des postes de dépenses les plus importants du commerce maritime.

Un autre élément qui influence beaucoup la VAN est le taux d'actualisation. En effet, dans les scénarios de *référence* et *What-if #2*, les coûts et les bénéfices sont en début de projet alors que dans le cas du scénario *What-if#1*, les bénéfices sont à la fin du projet. Dans ce dernier scénario, la VAN a diminué de plus de 39M\$ lorsque nous avons augmenté le taux à 7% dans la mesure *combinaison*. Ce type d'analyse est important puisque les coûts des capitaux ne sont pas constants et varient dans le temps. En effet, un taux d'actualisation de 3,5% est probablement raisonnable étant

donné les informations dont nous disposons, mais une augmentation générale des taux d'intérêts n'est pas à exclure dans le futur. Il est donc important pour la robustesse des résultats de constater que doubler ce taux maintient la VAN positive.

Finalement, dans notre analyse, nous avons choisi un nombre d'EVP par centimètre perdu de 3,8. Basé sur les autres données à notre disposition, il s'agit d'une estimation assez conservatrice. Lorsque nous augmentons ce nombre à 6 EVP/cm, nous constatons que les différentes VAN augmentent, sans surprise, considérablement. La relation entre le nombre d'EVP que peut transporter un bateau et la profondeur de l'eau n'est pas nécessairement linéaire. Il n'est pas à exclure que dans l'avenir, des innovations technologiques sur les porte-conteneurs permettent de transporter plus de marchandises à tirant d'eau égal.

## Chapitre 9 : Conclusion

---

Les changements climatiques auront certainement un impact important sur les sociétés humaines et sur plusieurs secteurs de l'activité économique. L'un des impacts les plus significatifs concerne une possible augmentation de la variabilité des niveaux des systèmes hydrologiques. Dans le cas des océans, cela signifie potentiellement une augmentation du niveau alors que pour certains systèmes hydrologiques à l'intérieur des terres, cela peut signifier une diminution du niveau moyen des eaux. C'est notamment le cas de la voie maritime du Saint-Laurent. Son importance pour la société est indéniable, autant d'un point de vue humain qu'économique. Le port de Montréal, de par sa situation de port océanique en milieu fluvial, en est un excellent exemple. C'est pour cette raison que des mesures d'adaptation seront nécessaires, de façon à maintenir le *statu quo*.

Les résultats de notre analyse nous ont permis de déterminer que la mesure la plus pertinente, peu importe le scénario climatique, est une *combinaison* de la *minimisation du dégagement sous quille* et du *dragage*. Dans le cas des scénarios *What-if #1* et *What-if#2*, c'est la mesure la plus bénéfique selon les hypothèses de base alors que dans le cas du scénario de *référence*, c'est en réduisant la profondeur à draguer de 20 centimètres que nous arrivons à cette conclusion. Ces valeurs actuelles nettes sont de 54 707 126,15\$ (WI1), 28 098 786,27\$ (WI2) et 21 307 503,08\$ (REF). Ces valeurs actuelles nettes représentent des gains par EVP transporté de 0,58\$ (WI1), 0,30\$ (WI2) et 0,23\$ (REF). La disparité dans les VAN est le résultat des grandes différences dans les scénarios climatiques entre d'un côté, les scénarios de *référence* et *WI2* et de l'autre le scénario *WI1*.

## 9.1 Discussion et limites de l'étude

---

S'adapter et prévenir les changements climatiques est l'une des principales priorités des différents paliers de décision de la majorité des gouvernements à travers la planète. Le consensus scientifique, généralement représenté par le GIEC, convient que certaines conséquences de ces changements sont inévitables alors que d'autres conséquences peuvent être diminuées dans leur amplitude. L'augmentation de la variation des niveaux des océans et des systèmes hydrologiques est l'une des conséquences les plus souvent soulevée. Ces variations pourraient potentiellement avoir un impact considérable sur le transport maritime dans la voie navigable du Saint-Laurent. Cette recherche visait à calculer les coûts et les bénéfices de deux mesures d'adaptation possible (et la combinaison des deux). Nos résultats démontrent qu'une combinaison d'innovations technologiques à travers l'installation d'un système de gestion du dégagement sous quille et de dragage apporte le plus de bénéfices à la société.

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche plus large et de nature exploratoire. Nous ne prétendons pas avoir fait une étude de faisabilité technique ni une étude environnementale du sujet. La décision d'aller de l'avant, ou non, avec certaines mesures d'adaptation nécessiterait des études exhaustives des impacts environnementaux, plutôt que de les estimer comme nous l'avons fait dans ce mémoire. Qui plus est, cette décision devrait également être basée sur des études techniques qui décriraient en détails les différents coûts, surtout dans le cas du dragage qui dépend énormément des études de sol, ce que nous n'avions pas à notre disposition.

Finalement, nous avons fait plusieurs hypothèses dans le calcul des bénéfices économiques qui présentent certaines limites. Par exemple, nous utilisons un bateau type dans le calcul des bénéfices, de façon à simplifier l'analyse. Il s'agit d'une

hypothèse forte puisqu'une vaste gamme de porte-conteneurs de capacité différente navigue sur le fleuve Saint-Laurent. Cependant, nous ne croyons pas que les résultats auraient été très différents de ceux que nous avons obtenus. Dans un autre cas, nous utilisons un prix moyen du carburant basée sur une année. Bien que nous ayons fait une analyse de sensibilité sur cet élément, il aurait pu être intéressant d'utiliser une prévision des prix du carburant sur la période à l'étude.

Un autre élément central de cette étude présente également certaines limites. Il s'agit des scénarios climatiques que nous avons utilisés. Ceux-ci sont des intrants dans le calcul des coûts de transport sauvés et dans le calcul des bénéfices environnementaux. Nous avons utilisé seulement trois scénarios mais, en pratique, il existe une vaste étendue de possibilité en terme de scénarios climatiques qui sont, de plus, dynamique et non statique. Il y a une incertitude inhérente aux scénarios, ceux-ci ne sont aussi précis que selon la qualité des intrants qui les alimentent. Les résultats et le choix des mesures d'adaptation pourraient être différents si d'autres scénarios de changements de niveau d'eau étaient utilisés. Il n'en demeure pas moins que le consensus scientifique est assez clair quant à l'impact des changements climatiques sur les niveaux d'eau dans le bassin hydrologiques des Grands Lacs. Ce consensus fait état d'une diminution des niveaux d'eau en raison des changements climatiques. Les résultats pourraient donc être différent, mais l'esprit de ces derniers resterait le même, c'est-à-dire choisir la meilleure mesure d'adaptation et non pas déterminer si celles-ci sont nécessaires.

Dans le même ordre d'idée, nous avons utilisé des parts de marchés actuelles pour induire des déplacements de certaines portions des activités lorsque certaines conditions de niveaux d'eau étaient respectées. Il nous faut toutefois admettre que la situation concurrentielle des ports est en constante évolution et ne dépend pas uniquement des niveaux d'eau. En effet, cette concurrence dépend également du niveau d'intégration des chaînes de transport. Nous nous sommes limités au segment maritime alors qu'en réalité, il faudrait également s'intéresser aux tronçons routiers ou

ferroviaires. Cela aurait eu une influence à la fois sur les coûts de transport sauvés et sur les bénéfices économiques.

Un aspect qui n'est pas quantifié dans cette étude est l'amélioration de la sécurité reliée à une plus grande profondeur de niveau d'eau. En effet, une plus grande profondeur peut réduire le risque d'accident tel que, par exemple, les échouements. Cependant, les accidents maritimes dépendent d'une multitude de variables qui ne sont pas uniquement fonction de la profondeur des niveaux d'eau telle que l'entretien des navires, les facteurs humains, etc. Qui plus est, la situation sans projet n'implique pas un arrêt de la circulation maritime au même titre que la situation avec projet n'entraîne pas une augmentation de la circulation autre que celle associée à la croissance normale du trafic. Discerner l'impact qu'aurait le maintien du niveau d'eau actuel des autres variables serait donc une tâche qui impliquerait l'utilisation d'un grand nombre d'hypothèses, ce que nous ne sommes pas prêt à faire.

Au final, ces hypothèses, que nous avons jugées raisonnables, basées sur la littérature étudiée, sont émises dans un contexte de modélisation d'une situation complexe. Nous avons dû faire des choix en étant conscient que chacune des limites que nous avons mentionnées pourrait faire l'objet d'un mémoire. Nous jugeons néanmoins ce mémoire un point de départ pour une prise de décisions éclairées sur le sujet.

## Bibliographie

---

Alexander, D. W., D.R. Sooley, C.C. Mullins, M.I. Chiasson, A.M. Cabana, I. Klvana, J.A. Brennan (2010). *Gulf of St. Lawrence: human systems overview report*. St John's: Fisheries and Oceans Canada, 170 p.

Bartolai, Alana M., Lingli, Hurst, Ardith E. He, Linda Mortsch, Robert Paehlke et Donald Scavia (2015). «Climate change as a driver of change in the Great Lakes St. Lawrence river basin.» *Journal of Great Lakes Research*, p 45-58.

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

Boardman, Anthony E., Mark A. Moore, et Aidan R. Vining (2010). «The social discount rate for Canada based on future growth in consumption.» Édité par University of Toronto Press. *Canadian Public Policy* 36, n° 3, p. 325-343.

Bouchard, Olivier (2014). *Les enjeux environnementaux associés au dragage d'entretien de la voie navigable et de zones portuaires du fleuve Saint-Laurent*. Essai, Québec: Université Laval, 77 p.

Bucher, Enrique H., et Paul C. Huszar (1995). «Critical environmental costs of the Paraguay-Parana Waterway Project in South America.» *Ecological Economics* 15, p. 3-9.

Bückmann, Ewout H., Rafael Nistal Saitua, et Simme J. Veldman (2005). «River depth and container port market shares: The impact of deepening the Scheldt river on the West European container hub-port market shares.» *Maritime Economics & Logistics*, 7, p. 336-355.

Bureau of Transport Economics (1975). *Port Pirie: economic evaluation of harbour improvements*. Canberra: Australian Government Publishing Service.

Transport Canada (2002). *Maximizing ship draft in the St. Lawrence Seaway*. [data.gc.ca/archive/eng/innovation/tdc-publication-updates-v12n3-777.htm](http://data.gc.ca/archive/eng/innovation/tdc-publication-updates-v12n3-777.htm) (accès le 09 01, 2015).

Cariou, Pierre (2010). «Is slow steaming a sustainable means of reducing CO2 emissions from container shipping?» *Transportation Research Part D*, 16, p 260-264.

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

CJB Environnement Inc (2006). «Étude d'impact sur l'environnement: Programme décennal de dragage d'entretien du chenal maritime de Mines Seleine à Grande-Entrée, Îles-de-la-Madeleine.» , Québec.

Comtois, Claude, et Brian Slack (2015). «Analyse comparative des mesures d'adaptation aux changements climatiques du transport maritime au port de Montréal.» Montréal, 2015, 34 p.

Comtois, Claude, et Brian Slack (2014a). *Contexte économique du transport maritime au port de Montréal*. Montréal: CIRRELT.

Comtois, Claude, et Brian Slack (2014b). *Mesures d'adaptation du transport maritime et portuaire à la fluctuation des niveaux d'eau*. Montréal: CIRRELT.

Comtois, Claude, et Brian Slack (2014c). «Ships time in port, an international comparison.» Montréal, 23 p.

Connor, Mike, Jennifer Hunt, et Christine Werme (2005). *Potential impacts of dredging on Pacific Herring in San Francisco Bay*. White Paper, San Francisco: San Francisco Estuary Institute, 86 p.

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

D'Arcy, P., J-F. Bibeault, et R. Raffa (2005). *Changements Climatiques et Transport Maritime sur le Saint-Laurent: Étude Exploratoire d'options d'adaptation*. Montréal: Plan Saint-Laurent, 165 p.

De Champlain, Philippe (2015). «Profondeur de la voie navigable du Saint-Laurent entre Montréal et Québec» Carte, Montréal, 1 p.

De la Chenelière, Véronik, Yves Paradis, Geneviève Richard, Frédéric Lecomte, et Marc Mingelbier (2015). *Les poissons du chenal de navigation et des autres habitats*

*profonds du fleuve Saint-Laurent*. Direction de la faune aquatique, ministère des Forêts, de la faune et des Parcs, 70 p.

de Loë, Rob, Reid Kreutzwiser, et Liana Moraru (2001). «Adaptation options for the near term: climate change and the Canadian water sector.» *Global Environmental Change* 11, p 231-245.

Dredging Operations and Environmental Research (1998). *Economic impacts of environmental windows associated with dredging operations*. Technical Note, USACE, 14 p.

Dorling, Rob, et Kyle Hanniman (2014). *Phase II of Mowat-CGLR low water levels project: cost-benefit analysis of policy options*. Toronto: Council of the Great Lakes Region.

Dorling, Rob, Reuven Shlozberg, et Peter Spiro (2014). *Low Water Blues: an economic impact assessment of future low water levels in the Great Lakes and St. Lawrence River*. Toronto: CGLR-Mowat, 120 p.

Economic Associates Ltd (2009). *Port of Gladstone western basin dredging and disposal project: economic assessment*, Spring Hill: Economic Associates Pty Ltd.

Environnement Canada, Centre Saint-Laurent, Ministère de l'Environnement du Québec (1992). *Critères intérimaires pour l'évaluation de la qualité des sédiments du Saint-Laurent*. Ministre des Approvisionnements et Services Canada, 40 p.

Ferland, Anne-Marie (2006). *Guide de l'analyse avantages-coûts des projets publics en transport*. Québec: Ministère des transports du Québec, 24 p.

GEODE (2012). «Suivis environnementaux des opérations de dragage et d'immersion.» Groupe d'études et d'observation sur les dragages et l'environnement, 134 p.

GIEC (2014). «Climate change 2014: Synthesis Report.» Groupe d'Experts Intergouvernementaux sur le Climat, Genève.

Greenstone, Michael, Elizabeth Kopits, et Ann Wolverton (2011). «Estimating the social cost of carbon for use in U.S. Federal rulemaking: A summary and interpretation.» Working Paper, Massachusetts Institute of Technology, Department of economics, Cambridge, 35 p.

Grigalunas, Thomas A., et James J. Opaluch (2003). *Potential benefits and costs to Delaware from proposed Delaware River channel deepening project: review and critique of USACE economic ReAnalyses*. Dover: Economic Analysis Inc., 26 p.

Gronewold, Andrew D., et Craig A. Stow (2014). «Water loss from the Great Lakes.» *Science* 343, p. 1084-1085.

Gronewold, Andrew D., Vincent Fortin, Brent Lofgen, Anne Clites, Craig A. Tow, et Frank Quinn (2013). «Coasts, water levels, and climate change: A Great Lakes perspective.» *Climate Change*, n° 120, p. 697-711.

Güler, Nil (2002). «Economic evaluation of port investments.» *Pomorski zbornik* 40, 18 p.

Guy, Emmanuel, et Bruno Urli (2006). «Port selection and multicriteria analysis: An application to the Montreal-New York Alternative.» *Maritime Economics & Logistics*, 8, p 169-186.

Guy, Emmanuel, et Yann Alix (2007). «A successful upriver port? Container shipping in Montreal.» *Journal of transport geography*, p. 46-55.

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

Huard, David (2014). «Description des scénarios climatiques.», Montréal, 21 p.

Interagency Working Group on Social Cost of Carbon (2013). «Technical update of the social cost of carbon for regulatory impact analysis.» Washington, United States Government, 21 p.

Jonkeren, Olaf, Piet Rietveld, Jos van Ommeren, et Aline te Linde (2013). «Climate change and economic consequences for inland waterway transport in Europe.» *Regional Environmental Change* 13, n° 1, p 953-965.

Larousse (2015). *Drague*. [www.larousse.fr/encyclopedie/divers/drague/44717](http://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/drague/44717) (accès le 09 01, 2015).

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

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

Lofgren, Brent M., Frank H. Quinn, Anne H. Clites, Raymond A. Assel, Anthony J" Eberhardt, et Carol L. Luukkonen (2002). «Evaluation of potential impacts on Great Lakes water resources based on climate scenarios of two gcms.» *Journal of Great Lakes Research* 28, n° 4, p. 537-554.

Lofgren, Brent M., Timothy S. Hunter, et Jessica Wilbarger (2011). «Effects of using air temperature as a proxy for potential evapotranspiration in climate change scenarios of Great Lakes basin hydrology.» *Journal of Great Lakes Research*, 37, p 744-752.

Luo, Meifeng, et Thomas A. Grigalunas (2002). «Estimating the demand for container port services: the importance of including substitute ports.» Department of Environmental and Natural Resource Economics, University of Rhode Island, Kingston, 36 p.

Magal, Mateus, et Adrian Sammons (2008). «A new approach to port choice modelling.» *Maritime economics & logistics* 10, p. 9-34.

Mandell, Svante (2011). «Carbon emission values in cost benefit analyses.» *Transport Policy* (Elsevier) 18, p. 888-892.

Martin Associates (2011). «The economic impacts of the great lakes - St. Lawrence seaway system.» Lancaster, PA, 98 p.

MDDELCC (2015). «Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2012 et leur évolution depuis 1990.» ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la lutte contre les changements climatiques, Québec, 21 p.

Millerd, Frank (2005). «The economic impact of climate change on canadian commercial navigation on the Great Lakes.» *Canadian Water Ressources Journal*, 12 p.

Millerd, Frank (2011). «The potential impact of climate change on Great Lakes international shipping.» *Climatic Change*, 104, p 629-652.

Mortsch, Linda, Henry Hengeveld, Murray Lister, Lisa Wenger, Brent Lofgren, Frank Quinn & Michel Slivitzky (2000). «Climate change impacts on the hydrology of the Great Lakes-St. Lawrence system.» *Canadian Water Ressources Journal* 25, p. 153-179.

MPO (1997). «Projet de dragage sélectif des hauts-fonds dans la voie navigable du Saint-Laurent entre Montréal et le Cap à la Roche.» Rapport synthèse d'évaluation environnementale: Examen préalable, Ministère des Pêches et des Océans du Canada, 176 p.

Nightingdale, Barbara, et Charles A. Simenstad (2001). *Dredging activities: marine issues*. White Paper, Washington: Washington State Transportation Center, 14 p.

Notteboom, Theo E (2009). «Complementary and substitutability among adjacent gateway ports.» *Environment and Planning*, 19 p.

O'Keefe, Doug (2003). «The future for Canada-U.S. container port rivalries.» Statistics Canada, Ottawa, 14 p.

Psaraftis, Harilaos N., et Christos A. Kontovas (2009). «CO2 Emission statistics for the world commercial fleet.» *WMU Journal of Maritime Affairs*, 19 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.

Robinson, J.E., R.C. Newll, L.J. Seiderer, et N.M. Simpson (2005). «Impacts of aggregate dredging on sediment composition and associated benthic fauna at an offshore dredge site in the southern North Sea.» *Marine Environmental Research*, 17 p.

Ryan, Timothy P (2013). *The economic impact of deepening the Mississippi river to 50 feet*. Metairie: Big River Coalition, 56 p.

Secrétariat du Conseil du Trésor du Canada (2007). *Guide d'analyse coûts-avantages pour le Canada: Propositions de réglementation*. Ottawa: SCT, 56 p.

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

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

Transport Canada, U.S. Army Corps of Engineers, Department of Transportation, Corporation de gestion de la Voie maritime du Saint-Laurent, Environnement Canada,

U.S. Fish and Wildlife Service (2007). *Étude des Grands Lacs et de la Voie maritime du Saint-Laurent*, 23 p.

UNCTAD, United Nations Conference on Trade and Development (2012). *Review of maritime transport : Chapter 3 Freight rates and maritime transport costs*. Geneva: United Nations, 23 p.

USACE, U.S. Army Corps of Engineers (2002). *Delaware river main channel deepening project: comprehensive economic reanalysis report*. Philadelphie: USACE.

USACE, U.S. Army Corps of Engineers (1999). *Dredged material management plan and environmental impact statement for Cleveland harbor, Cuyahoga County, Ohio*. Buffalo: USACE.

USACE, U.S. Army Corps of Engineers (2014). «Portsmouth harbor and Piscataqua river New Hampshire & Maine navigation improvement project.» Portsmouth, 174 p.

USACE, U.S. Army Corps of Engineers (2000). *Planning Guidance Notebook*. Engineer Regulation, Washington: Department of the Army, 712 p.

Veldman, Simme, et Ewout H. Bückmann (2003). «A model on container port competition: an application for the west european container hub-ports.» *maritime economics & logistics*, p. 3-22.

Wan, Yulai, Anming Zhang, et Andrew C.L. Yuen (2013). «Urban road congestion, capacity expansion and port competition: empirical analysis of US container ports.» *Maritime policy and Management*, 40, p 417-438.

Wasserman Cesar, Julio, Sérgio Ricardo Barros, et Gilson Brito Alves Lima (2013). «Planning dredging services in contaminated sediments for balanced environmental and investment costs.» *Journal of Environmental Management*, 121, p 48-56.

Waxmonsky, Raymond W (1997). «Benefit-Cost analysis of harbor dredging on the Great Lakes.» *Middle States Geographer*, 30, p 55-61.

Waxmonsky, Raymond W (1999). «Economic evaluation of dredging Erie harbor, PA.» 86 p.

Zhang, Anming (2008). *The impact of hinterland access conditions on rivalry between ports*. Discussion paper, International Transport Forum, OECD, 23 p.