



$$VAN = \sum_{t=1}^T \frac{avantages_t}{(1+\rho)^t} - \sum_{t=1}^T \frac{coûts_t}{(1+\rho)^t}$$

ANALYSE COÛTS-AVANTAGES DES OPTIONS D'ADAPTATION EN ZONE CÔTIÈRE À RIVIÈRE-OUELLE

Rapport final
Mars 2016



Ressources naturelles
Canada

Natural Resources
Canada

Canada



Québec



ANALYSE COÛTS-AVANTAGES DES OPTIONS D'ADAPTATION EN ZONE CÔTIÈRE À RIVIÈRE-OUELLE

**PROJET : ÉVALUATION ÉCONOMIQUE DES RÉPERCUSSIONS
DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET ANALYSE COÛTS-
AVANTAGES DES OPTIONS D'ADAPTATION EN ZONE CÔTIÈRE
AU QUÉBEC**

Directrice de projet : Manon Circé, Ouranos

Équipe de réalisation :

Laurent Da Silva, Ouranos
Guillaume Duff, Ouranos
Ursule Boyer-Villemaire, Ouranos
François Morneau, Ouranos
Claude Desjarlais, Ouranos

Principaux collaborateurs :

Pascal Bernatchez, UQAR
Steeve Dugas, UQAR
Chantal Quintin, UQAR
MRC de Kamouraska

Révision et mise en page : Beatriz Osorio, Ouranos, et Katherine Pineault, Ouranos

Numéro de projet : 540010-000

Citation suggérée : Circé, M., Da Silva, L., Duff, G., Boyer-Villemaire, U., Desjarlais, C., et Morneau, F. (2016) Analyse coûts-avantages des options d'adaptation en zone côtière à Rivière-Ouelle. Ouranos : Montréal. 69 pages et annexes.

Mars 2016



REMERCIEMENTS

La présente étude a été réalisée avec le soutien du Groupe de Travail sur l'économie de la Plateforme canadienne d'adaptation au changement climatique, présidée par Ressources naturelles Canada. Elle a également bénéficié de l'appui financier du Fonds vert du Québec dans le cadre du Plan d'action 2013 - 2020 sur les changements climatiques.

Cette étude a été rendue possible grâce à de nombreuses collaborations, dont notamment celle de Pascal Bernatchez et de son équipe du Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières (LDGIZC) de l'Université du Québec à Rimouski (UQAR) qui ont partagé avec Ouranos leur expérience et leurs connaissances approfondies des processus hydrosédimentaires et de la dynamique des vagues sur les côtes du Québec.

Nous tenons à remercier la MRC de Kamouraska pour sa collaboration et son support, notamment Valérie Labrecque, Coordinatrice du Service de gestion intégrée de l'eau. L'apport précieux des nombreux partenaires locaux a permis d'avoir accès aux informations et aux données essentielles à la réalisation de cette analyse. En particulier, nous voulons saluer l'aide précieuse de Benoit Rioux de la Financière agricole et de Régis Potvin, ingénieur.

Nous tenons également à souligner la contribution des membres des différents comités mis en place dans le cadre du projet. Leur participation a permis, entre autres, de mieux

intégrer l'ensemble des enjeux de la zone d'étude : Josée Michaud (Bureau des Changements climatiques), Nick Xenos (Ressources naturelles Canada), Jean-Pierre Revéret (UQAM), Adam Fenech (UPEI), Dominique Bérubé (UNB), Élisabeth Marceau (MPO), Graham Frank (Baird), Marcel Roussy (MAPAQ), Rénaud Méthot (MAMOT), Jacinthe Girard (MDDELCC), Laurence Laperrière (MDDELCC), Jean-Denis Bouchard (MDDELCC), François Hazel (MPO), Michel Michaud (Transports Québec), Guylène Chouinard (Transports Québec), Hélène Latérière (MCC), Paul Gingras (MRC La Mitis) et Jean-Pierre Savard (Ouranos).



RÉSUMÉ EXÉCUTIF

Peu d'études ont porté jusqu'à maintenant sur l'évaluation économique des impacts des changements climatiques et des options d'adaptation en zone côtière dans l'Est-du-Québec. Un programme de travail a ainsi été lancé par le Groupe de travail sur l'économie de la Plateforme canadienne d'adaptation au changement climatique, présidée par Ressources naturelles Canada. Ce programme vise à développer des connaissances économiques et des outils afin d'aider les décideurs des secteurs privés et publics au Canada à faire de meilleurs choix d'investissement et décisions de politique publique. Dans le cadre de ce programme, le projet de recherche *Évaluation économique des répercussions des changements climatiques et analyse coûts-avantages des options d'adaptation* visait l'étude des régions côtières du Québec et des provinces atlantiques.

Au Québec, l'étude a été réalisée par Ouranos avec comme partenaire de recherche principal le Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières (LDGIZC) de l'Université du Québec à Rimouski (UQAR), celui-ci ayant développé un imposant bagage de connaissances en matière d'érosion et de submersion sur les côtes du Québec. Les objectifs de l'étude étaient d'évaluer les impacts économiques de l'érosion sur les régions maritimes du Québec dans un contexte de changement climatique et d'analyser les coûts et les avantages de différentes options d'adaptation à l'érosion et à la submersion côtières.

Dans le cadre de cette étude, cinq sites ont fait l'objet d'analyses coûts-avantages (ACA). Il s'agit de Kamouraska, de Percé, de Maria, de Carleton-sur-Mer et des Îles-de-la-Madeleine. Le présent rapport s'intéresse au littoral de la MRC de Kamouraska et plus précisément des municipalités de Rivière-Ouelle et de La Pocatière¹.

Comme plusieurs municipalités côtières au Québec, la MRC de Kamouraska subit déjà d'importants impacts liés aux changements climatiques, lesquels se traduisent par la montée du niveau marin, l'adoucissement hivernal et la perte du couvert de glace dans le Saint-Laurent, ainsi que la modification du régime des tempêtes. La modification de ces paramètres hydroclimatiques vient accélérer et amplifier les aléas côtiers d'érosion et de submersion menaçant les terres agricoles de la région qui sont importantes pour la vitalité économique de la MRC de Kamouraska.

Approche méthodologique

Cette étude vise à déterminer, en utilisant l'analyse coûts-avantages, les options d'adaptation les plus avantageuses pour protéger la zone côtière de Rivière-Ouelle de ces impacts accrus de l'érosion et de la submersion qui s'intensifient à cause des changements climatiques. L'analyse s'appuie sur des projections d'érosion future fournies par le LDGIZC de l'UQAR de même que sur des projections de niveaux d'eau extrêmes développées conjointement par Ouranos et le LDGIZC.

L'analyse coûts-avantages (ACA) consiste à comparer d'un point de vue économique l'ensemble des avantages et des coûts de différentes options d'adaptation techniquement réalisables. L'ACA se base sur deux indicateurs économiques pour comparer les options d'adaptation à la non-intervention : la valeur actualisée nette (VAN) et le ratio avantages-coûts.

L'étude présente une évaluation des impacts économiques, environnementaux et sociaux ainsi que des coûts des options d'adaptation. Ces derniers comprennent à la fois les coûts des études préparatoires, les coûts de construction et d'entretien des

¹ Même si la zone d'étude inclut des terres situées dans les deux municipalités, c'est l'aboteau dans le secteur de Rivière-Ouelle qui est menacé sur la période d'étude. C'est pourquoi cette étude de cas s'intitule *Analyse coûts-avantages d'options d'adaptation en zone côtière à Rivière-Ouelle*.

différentes options. Quant aux avantages de l'adaptation, ils proviennent en majeure partie des coûts évités et de gains environnementaux.

Les avantages et les coûts des différentes options d'adaptation proposées sont actualisés à 4 % sur la période d'étude, soit de 2015 à 2064. Ils sont évalués dans une perspective régionale, c'est-à-dire pour l'ensemble du Bas-Saint-Laurent.

Zone d'étude

Les municipalités de Rivière-Ouelle et de La Pocatière sont situées le long de la rive sud du Saint-Laurent entre les municipalités de Saint-Denis-De La Bouteillerie et de Saint-Roch-des-Aulnaies. Les deux municipalités à l'étude font partie de la MRC de Kamouraska dans la région du Bas-Saint-Laurent. Les terres de la région, réputées être de grande qualité, notamment à cause de la présence d'argile favorable à l'agriculture, ont favorisé le développement de cette activité économique importante.

La zone d'étude couvre 370 hectares et est comprise entre l'autoroute 20, la route 132, la rivière Saint-Jean et la rivière Ouelle, comme indiqué à la figure A. La majeure partie de ce territoire est occupée par des terres agricoles qui sont protégées par un aboiteau de 4,2 km de long. Il s'agit en fait d'une digue construite en terre dans les années 1930 afin de drainer et de protéger les terres et de permettre leur mise en culture. À l'avant de l'aboiteau se trouve un marais qui le protège de l'érosion et de la submersion, puisqu'il amortit l'énergie des vagues lors de tempêtes. L'aboiteau de Rivière-Ouelle a été identifié comme une structure vulnérable qui pourrait être fortement touchée par l'érosion dans les prochaines années.

Options d'adaptation

À Rivière-Ouelle, quatre options d'adaptation ont été évaluées afin d'atteindre l'un ou l'autre des objectifs suivants : 1) éviter toute brèche dans l'aboiteau afin de protéger la majeure partie des terres agricoles ou 2) permettre au marais de se régénérer afin qu'il assure à plus long terme la protection de l'aboiteau. Compte tenu du rehaussement marin, les quatre options considérées incluent toutes le rehaussement de l'aboiteau qui devrait passer d'une élévation moyenne de 3,9 m géodésique à environ 5 m géodésique.

La première option envisagée est de protéger l'aboiteau par un épi en T formé de pierres qui serait construit à l'avant de la partie de l'aboiteau la plus vulnérable à l'érosion du marais. La seconde option consiste à enrocher l'aboiteau afin qu'il soit en mesure de contrer l'érosion et d'éviter ainsi la formation de brèches. La troisième option est plutôt basée sur un recul partiel de l'aboiteau dans sa partie la plus vulnérable (perte d'environ 14 hectares de terres agricoles), afin de permettre au marais de continuer à assurer une protection naturelle contre l'érosion. Enfin, la quatrième option est la dépoldérisation. Elle implique de reculer l'aboiteau jusqu'au rang de l'Éventail permettant ainsi au marais de se régénérer sur une superficie potentielle de 200 hectares.

Les options d'adaptation qui ont été retenues pour l'analyse proviennent de différentes études techniques réalisées sur le territoire de la MRC de Kamouraska au cours des dernières années afin de réhabiliter et/ou d'entretenir les aboiteaux. Celles-ci prennent en compte les conditions hydrodynamiques, l'érosion, la sédimentation et les contraintes géotechniques liées à la zone d'étude. Les options d'adaptation étudiées dans cette analyse ont été conçues pour une vie utile de 50 ans.

Problématique

Les principaux enjeux au niveau de la zone d'étude sont liés à la disparition du marais qui pourrait conduire à la formation de brèches dans l'aboiteau, ce qui inonderait alors les terres agricoles de façon récurrente. Actuellement, les terres agricoles sont submergées à de très rares occasions lors d'événements de tempête majeurs comme en décembre 2010 lorsque le niveau d'eau est supérieur à l'élévation de l'aboiteau.

Normalement, la présence du marais saumâtre protège l'aboiteau, mais avec un taux de recul probable du marais de -1,93 m par an à son point le plus critique, l'aboiteau sera exposé à l'érosion à partir de 2035. L'aboiteau n'ayant pas été conçu pour résister à l'assaut des vagues, il est prévu que des brèches se formeront et que l'eau salée submergera les terres agricoles les plus basses.



Figure A – Localisation de la zone d'étude

Sur un horizon temporel de 50 ans, si rien n'est fait, c'est plus de 200 hectares de terres agricoles qui pourraient être perdus dans la zone d'étude. En contrepartie, les terres submergées permettraient la régénération du marais qui pourrait accroître graduellement sa superficie. En effet, les terres agricoles perdues pourraient être en partie retournées à un état naturel de marais saumâtre offrant des services écologiques, dont un habitat pour la biodiversité.

Les impacts potentiels de la non-intervention sont estimés à 619 571 \$ sur 50 ans à un taux d'actualisation de 4 %. La majeure partie des dommages appréhendés proviendrait de la perte de terres cultivables, qui sont évaluées à 10 000 \$ l'hectare dans la région.

Résultats de l'ACA

Les résultats de l'ACA montrent que seul le recul partiel de l'aboteau est une option avantageuse économiquement comparativement à la non-intervention sur une période de 50 ans. Cette option d'adaptation se distingue des autres en raison de son faible coût de construction et parce qu'elle favorise la régénération du marais sur une superficie d'environ 14 hectares permettant ainsi de protéger l'aboteau de l'érosion. Sur la période d'étude, l'option de recul partiel l'aboteau offre des avantages actualisés nets de 189 308 \$ par rapport à la non-intervention (voir figure B). Chaque dollar consenti pour cette option permet de générer 1,37 \$ d'avantages.

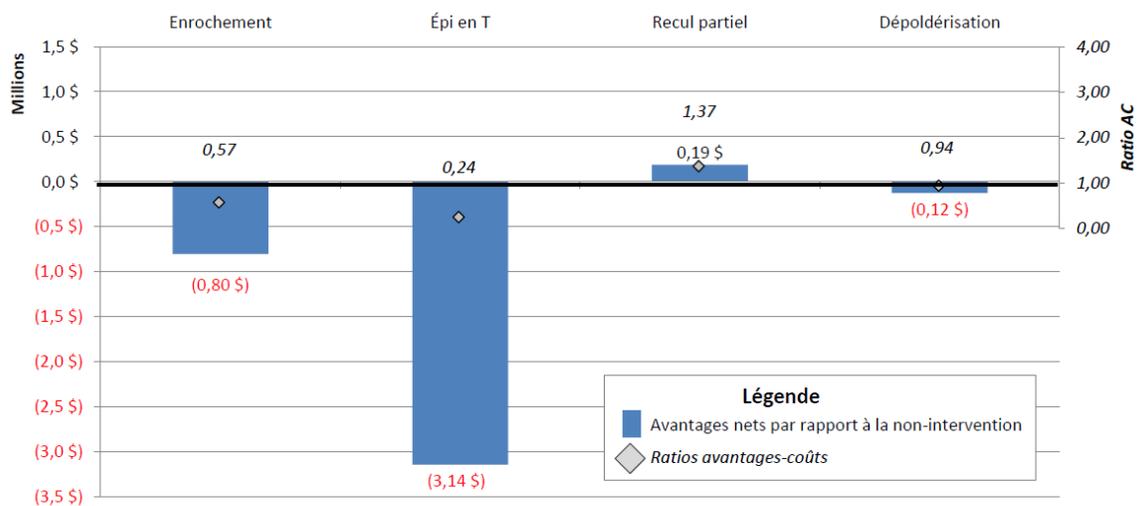


Figure B – Avantages actualisés nets par rapport à la non-intervention à Rivière-Ouelle

Les analyses de sensibilité indiquent que la valeur des services écologiques associés au marais est un facteur qui influence significativement les résultats de l'ACA. De plus, l'hypothèse relative à la rapidité à laquelle le marais pourrait se régénérer et offrir des services écologiques modifie les résultats de l'ACA. Ainsi, avec une valeur des services écologiques plus élevée ou une augmentation du taux de régénération du marais, la dépoldérisation devient l'option la plus avantageuse économiquement. Malheureusement, les gains environnementaux liés à l'existence d'un marais sont difficiles à évaluer monétairement, car on ne peut pas observer de transactions sur le marché pour les services écologiques. De plus, les conditions favorisant la régénération d'un marais sont encore peu connues.

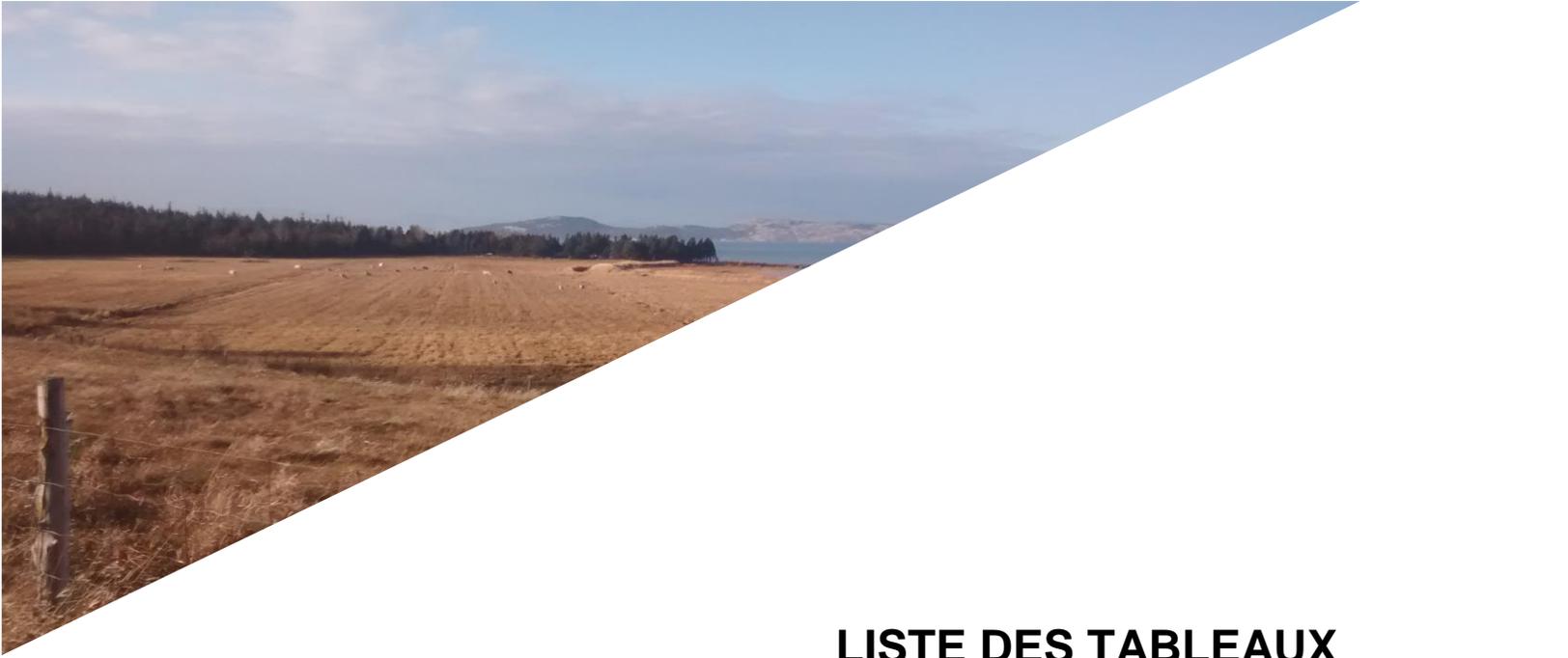
Somme toute, suite à l'ensemble des analyses de sensibilité réalisées, l'option du recul partiel combinée au rehaussement de l'aboteau demeure la solution privilégiée. Elle permet de redonner à l'aboteau sa protection naturelle, soit un marais, ce qui évite d'avoir à enrocher l'aboteau ou à le protéger par un épi en T, deux options très coûteuses par rapport aux dommages appréhendés au cours des 50 prochaines années.



TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION	2
2	CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE	3
2.1	Zone d'étude	3
2.2	La problématique	7
3	APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE	9
3.1	Processus consultatif	9
3.2	Méthodologie de projection de la submersion	11
3.3	Méthodologie de projection de l'érosion	12
3.4	Approche méthodologique économique	14
3.4.1	Identification des options d'adaptation	15
3.4.2	Identification des impacts appréhendés	16
3.4.3	Monétisation des impacts appréhendés	17
3.4.4	Estimation des dommages causés par submersion	17
3.4.5	Estimation des coûts des options d'adaptation	19
3.4.6	Comparaison des coûts et des avantages	20
3.4.7	Analyse de sensibilité des résultats.....	22
4	OPTIONS D'ADAPTATION	23
4.1	Option de non-intervention	23
4.2	Options d'adaptation	25
5	IMPACTS APPRÉHENDÉS ET ESTIMATION MONÉTAIRE	35

5.1	Identification des impacts appréhendés	35
5.2	Estimation Monétaire des impacts appréhendés	38
5.2.1	Impacts directs.....	38
5.2.2	Impacts économiques.....	38
5.2.3	Impacts environnementaux.....	39
5.2.4	Estimation du coût des options d'adaptation	40
6	ANALYSE COÛTS-AVANTAGES	42
6.1	Calcul des coûts sur 50 ans	42
6.1.1	Coûts liés à la non-intervention	42
6.1.2	Coûts liés à l'enrochement	43
6.1.3	Coûts liés à l'épi en T	43
6.1.4	Coûts liés au recul partiel de l'aboteau	44
6.1.5	Coûts liés à la dépoldérisation.....	44
6.2	Calcul des avantages sur 50 ans	45
6.2.1	Avantages liés à la non-intervention.....	45
6.2.2	Avantages liés au recul partiel de l'aboteau	45
6.2.3	Avantages liés à la dépoldérisation	45
6.3	Valeur actualisée nette.....	46
6.4	Interprétation des résultats.....	50
6.5	Analyse de Sensibilité	51
6.5.1	Taux d'actualisation	51
6.5.2	Durée de régénération du marais.....	52
6.5.3	Valeur du marais.....	54
6.5.4	Coût d'enrochement de l'aboteau.....	56
6.5.5	Synthèse de l'analyse de sensibilité.....	57
7	CONCLUSION	59
8	GLOSSAIRE	61
9	RÉFÉRENCES.....	66



LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 – Processus consultatif et rôle des comités.....	10
Tableau 3.2 – Niveaux d'eau extrêmes par récurrence.....	12
Tableau 3.3 – Ensemble des impacts appréhendés.....	17
Tableau 4.1 – Résumé des hypothèses concernant le niveau d'eau atteint sur les terres agricoles.....	24
Tableau 4.2 – Évolution dans le temps de la superficie submergée par récurrence.....	25
Tableau 5.1 – Impacts appréhendés selon les options d'adaptation et en non-intervention.....	36
Tableau 6.1 – Valeur actualisée nette des différentes options de 2015 à 2064 et VAN rapport à la VAN de la non-intervention.....	47
Tableau 6.2 – Paramètres des analyses de sensibilité.....	51
Tableau 6.3 – Résultats obtenus avec des taux d'actualisation de 2 % et 6 %.....	52
Tableau 6.4 – Résultats obtenus avec une variation de la durée de régénération du marais.....	53
Tableau 6.5 – Résultats obtenus avec l'augmentation de la valeur du marais de 50 %	55
Tableau 6.6 – Résultats obtenus en utilisant des pierres des champs pour l'enrochement.....	57
Tableau 6.7 – Option d'adaptation la plus avantageuse selon l'analyse de sensibilité ..	58



LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 – Vue globale de la zone d'étude de Rivière-Ouelle.....	4
Figure 2.2 – Photo historique de 1961	6
Figure 2.3 – Photos historiques du rang de l'Éventail en 1983 et 1995.....	7
Figure 2.4 – Simulation de la superficie submergée en 2055 en fonction des événements de tempêtes	8
Figure 3.1 - Taux d'érosion probable à chaque 50 mètres de ligne de rivage (schorre supérieur)	13
Figure 4.1 – Enrochement et rehaussement de l'aboiteau	26
Figure 4.2 – Coupe type d'un enrochement de l'aboiteau effectué dans la baie de Kamouraska (Chum, 2013).....	27
Figure 4.3 – Localisation proposée de l'épi en T.....	30
Figure 4.4 – Coupe de l'épi en T modélisé pour la municipalité de Longue-Rive	31
Figure 4.5 – Recul projeté de l'aboiteau	32
Figure 4.6 – Illustration de l'option de dépoldérisation avec déplacement complet de l'aboiteau	33
Figure 6.1 – Ventilation des coûts nets actualisés des options considérées (4 %).....	48
Figure 6.2 – Somme actualisée des avantages nets par rapport à la non-intervention entre 2015 et 2064	49
Figure 6.3 – Avantages actualisés nets par rapport à la non-intervention à Rivière-Ouelle.....	50



LISTE DES ANNEXES

- Annexe A** Dommages liés à la submersion
- Annexe B** Calcul du dommage annuel moyen
- Annexe C** Ventilation annuelle des coûts par option



LISTE DES ACRONYMES

ACA :	Analyse coûts-avantages
CA :	Comité aviseur
CC :	Changements climatiques
CLO :	Comité local d'orientation
CR :	Comité régional
CT :	Comité technique
DAM :	Domage annuel moyen
LDGIZC :	Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières
MAMOT :	Ministère des Affaires municipales et de l'Occupation du territoire
MAPAQ :	Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec
MCC :	Ministère de la Culture et des Communications
MDDELCC :	Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
MPO :	Pêches et Océans Canada
MRC :	Municipalité régionale de comté
MTQ :	Ministère des Transports du Québec
NI :	Non-intervention
NMM :	Niveau moyen des mers
PIB :	Produit intérieur brut
Ratio A/C :	Ratio avantages-coûts
UQAR :	Université du Québec à Rimouski
VAN :	Valeur actualisée nette



SYMBOLES ET UNITÉS

mm :	millimètre
cm :	centimètre
m :	mètre
km :	kilomètre
m. lin. :	mètre linéaire
\$:	dollars de 2012 à moins d'indications contraires



1 INTRODUCTION

Le Québec possède plus de 3 000 kilomètres de littoral dans l'Est de son territoire. Cette zone maritime, qui comprend la Côte-Nord, le Bas-Saint-Laurent, la Gaspésie, les Îles-de-la-Madeleine et l'île d'Anticosti, comptait en 2014 une population de 388 000 habitants répartie en 212 municipalités dont 110 sont situées sur la côte (ISQ, 2014a). Plus du tiers de cette population vit à moins de 500 mètres des berges et plus de 90%, à moins de 5 km (Bourque et Simonet, 2008). Le produit intérieur brut (PIB) de la zone maritime en 2013 atteignait 17,1 milliards de dollars avec comme principales industries la pêche, le tourisme, les alumineries et des installations portuaires assurant le transport des produits miniers en plus d'importantes infrastructures de transport terrestre (ISQ, 2014b).

Ces collectivités font face à une transformation sans précédent de leur environnement côtier causée par les changements climatiques (CC). En modifiant les principaux paramètres à la base des processus côtiers, les CC menacent l'intégrité des zones côtières. À titre d'exemple, la tempête maritime de décembre 2010 a généré des dommages évalués à plus de 30 millions de dollars aux infrastructures publiques et à quelque 740 propriétés riveraines de l'estuaire et du golfe Saint-Laurent ainsi que de la baie des Chaleurs. (Quintin et al., 2015). C'est dans ce contexte qu'Ouranos a entrepris l'analyse des options d'adaptation à l'érosion et à la submersion marine qui menacent les côtes du Québec.

La présente étude fait partie d'un projet de recherche appuyé par Ressources naturelles Canada et le Fonds vert du Québec, qui s'intéresse aux impacts des CC et aux options d'adaptation pouvant protéger les actifs et les usages du littoral. Ce projet inclut une évaluation globale des répercussions de l'érosion sur le littoral du Québec maritime qui a déjà été publiée. Il comporte également cinq études de cas qui vise à déterminer la viabilité économique de différentes options d'adaptation pour protéger le littoral. Les coûts et les avantages de différentes options d'adaptation sont comparés afin de déterminer lesquelles parmi ces options offrent un avantage net.

Ce rapport s'intéresse particulièrement aux municipalités de Rivière-Ouelle et de La Pocatière.

Les municipalités de Rivière-Ouelle et de La Pocatière sont situées le long de la rive sud du Saint-Laurent entre les municipalités de Saint-Denis-De-La-Bouteillerie et de Saint-Roch-des-Aulnaies. Ces deux municipalités qui font partie de la MRC de Kamouraska dans la région du Bas-Saint-Laurent constituent un lieu de transit important pour les touristes qui visitent la région du Bas-Saint-Laurent. Les basses terres de la région, réputées être de grande qualité notamment à cause de la présence d'argile favorable à l'agriculture, ont favorisé le développement de cette activité économique importante. Les terres agricoles situées derrière l'aboteau de Rivière-Ouelle-La Pocatière ont été identifiées comme une zone critique qui pourrait être fortement touchée par la submersion et l'érosion dans les prochaines années².

Depuis les années 2000, on a pu observer à Rivière-Ouelle et à La Pocatière une modification des conditions hydroclimatiques augmentant la vulnérabilité de la côte aux CC. La réduction du couvert de glace a accru les impacts des tempêtes hivernales, entraînant des reculs importants de la ligne de rivage (Bernatchez et Fraser, 2012; Bernatchez et al., 2008). Le marais situé entre la rivière Saint-Jean et la rivière Ouelle a été particulièrement touché notamment au cours de la tempête de décembre 2010. Or ce marais protège l'aboteau, une digue de terre permettant de drainer et de protéger les terres agricoles. À certains endroits, le niveau du fleuve a dépassé celui de l'aboteau et

² Même si la zone d'étude inclut des terres situées dans les deux municipalités, c'est l'aboteau dans le secteur de Rivière-Ouelle qui est menacé sur la période d'étude. C'est pourquoi cette étude de cas s'intitule *Analyse coûts-avantages d'options d'adaptation en zone côtière à Rivière-Ouelle*.

a submergé des parcelles de terres agricoles. Avec la montée du niveau moyen de la mer causée par les changements climatiques, les terres agricoles de cette zone risquent d'être affectées de plus en plus souvent par la submersion, comme la municipalité de Saint-André l'est actuellement.

Le deuxième chapitre de ce rapport présente la zone d'étude et ses principales caractéristiques géographiques, socioéconomiques, et biophysiques. Il expose ensuite la problématique côtière en expliquant les processus d'érosion et de submersion à l'œuvre.

Le troisième chapitre présente la démarche méthodologique de l'étude, autant aux plans hydrodynamique qu'économique. Ce chapitre débute en rappelant l'approche participative qui a été privilégiée tout au cours de cette étude, notamment pour identifier les enjeux, les impacts et les coûts de ces impacts. Ensuite, les principales hypothèses méthodologiques retenues dans le cadre spécifique cette étude sont résumées.

Le quatrième chapitre présente les options d'adaptation considérées et leurs impacts potentiels, alors que le chapitre 5 s'intéresse à la monétisation de ces impacts. Les résultats de l'ACA et des analyses de sensibilité sont exposés au chapitre 6 et les conclusions au chapitre 7.



2 CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE

Le présent chapitre expose d'abord les principales caractéristiques de la zone d'étude et présente ensuite les problématiques liées aux aléas côtiers à Rivière-Ouelle et à La Pocatière.

2.1 ZONE D'ÉTUDE

La zone à l'étude, illustrée à la figure 2.1, couvre 370 hectares compris entre l'autoroute 20, la route 132, la rivière Saint-Jean et la rivière Ouelle. Cette zone a été retenue pour étude principalement à cause de la qualité et de la productivité des terres agricoles que l'on y retrouve. Cette zone chevauche les municipalités de Rivière-Ouelle et de La Pocatière. Les terres agricoles derrière l'aboteau ont été définies comme une zone critique qui pourrait être fortement affectée par la submersion et l'érosion dans les prochaines années. La longueur totale de l'aboteau dans cette zone est de 4,2 km.

La zone d'étude compte quelques bâtiments résidentiels qui sont regroupés dans sa partie nord. Ces bâtiments ne sont pas menacés sur la période d'étude, car ils sont tous suffisamment élevés et éloignés du littoral pour ne pas être submergés, ni érodés. Ils ne sont donc pas pris en compte dans l'analyse coûts-avantages.



Figure 2.1 – Vue globale de la zone d'étude de Rivière-Ouelle

Les terres agricoles de la zone d'étude sont principalement destinées à la production de fourrage pour la production laitière, car ce type de production demande moins d'unités thermiques que la production, par exemple, de fruits et légumes. Comme la productivité d'une terre se reflète sur sa profitabilité et ultimement dans sa valeur marchande, il n'est pas étonnant que les terres de la zone d'étude soient les plus chères de la région. Elles se vendent environ 10 000 \$ l'hectare. Il est toutefois bon de signaler que le prix des terres a connu une forte augmentation dans les dernières années en raison de l'arrivée de méga fermes et de l'évolution des pratiques de l'industrie agricole.

Historiquement, c'est la grande productivité des terres qui a poussé les agriculteurs de la MRC de Kamouraska à vouloir assécher les marais saumâtres situés le long de du Saint-Laurent afin de pouvoir cultiver ces superficies additionnelles. Pour y arriver, les agriculteurs ont construit des structures appelées aboiteaux, qui consistent en une digue de terre munie d'un système d'évacuation des eaux de drainage avec des portes d'évacuation. Sous la pression de l'eau, les portes se referment lorsque la marée monte et s'ouvrent lorsque la marée est basse afin de laisser évacuer l'eau des fossés de drainage.

Entre 1937 et 1940, le ministère de l'Agriculture a financé la construction d'une série d'aboiteaux dans le secteur, notamment les aboiteaux de Saint-André, de Saint-Denis et de Rivière-Ouelle. Au fil du temps, certains aboiteaux se sont endommagés menant à la formation de brèches et conséquemment à la perte de terres cultivables. À cet effet, la figure 2.2 montre des terres agricoles abandonnées à cause de problèmes de submersion dans la zone d'étude en 1961.

Entre 1977 et 1982, la réfection des aboiteaux de la région a été effectuée sur environ 28 kilomètres. Cette réfection prévoyait une augmentation de l'élévation de l'aboiteau afin de réduire les épisodes de submersion ainsi que le changement du tracé de certains d'entre eux afin d'augmenter la superficie cultivable.



Source : Gouvernement du Québec

Figure 2.2 – Photo historique de 1961

C'est en 1977 que la dernière réfection de l'aboiteau située entre la rivière Saint-Jean et la rivière Ouelle a été effectuée. Sans modifier le tracé actuel, cette réfection qui prévoyait le rehaussement de l'aboiteau a permis de récupérer environ 80 hectares de terres agricoles abandonnés à cause de problèmes de submersion (Gourde, 1980). La réfection de l'aboiteau a permis d'augmenter l'élévation moyenne à 3,9 m géodésique dans la zone d'étude. Les terres abandonnées ont été graduellement désalinisées par l'eau de pluie et les amendements agricoles ont permis de reprendre la production agricole sur ces terres. La figure 2.3 montre ce qui pourrait probablement être une reprise graduelle de l'agriculture suite à la réfection de l'aboiteau. Les zones délimitées en rouges dans la portion droite de la figure ne sont pas cultivées en 1983, mais le sont en 1995. L'évolution historique des zones cultivées dans le secteur démontre donc que sans la présence d'un aboiteau fonctionnel, la culture de ses terres n'est pas possible.



Source : Gouvernement du Québec

Figure 2.3 – Photos historiques du rang de l'Éventail en 1983 et 1995

2.2 LA PROBLÉMATIQUE

La problématique principale du segment concerne l'érosion du marais devant l'aboteau. Le marais freine l'effet des vagues provenant du Saint-Laurent et empêche l'aboteau d'être érodé par l'effet continu des vagues sur l'ouvrage. Or, le marais devant l'aboteau de Rivière-Ouelle est très étroit et en érosion. En effet, seule la partie du *schorre* supérieur est encore visible et l'érosion est très prononcée près de l'embouchure de la rivière Ouelle. Dans sa partie plus vulnérable, le marais s'érode à un taux moyen de - 1,93 m par année. Ceci est sans compter la microfalaïse qui s'est créée à cet endroit, ce qui pourrait compliquer l'installation de mesures de protection. Si l'érosion continue au même rythme dans les prochaines années, il est prévu que l'aboteau perde son étanchéité en 2035. Ceci entraînerait des impacts majeurs sur la productivité des terres

agricoles et pourrait contraindre plusieurs agriculteurs à abandonner leurs terres, comme ce fut le cas avant la réfection de l'aboiteau en 1977.

La seconde problématique est la submersion lors d'événements de tempête. Par exemple, lors de la tempête de décembre 2010, il a été noté qu'une partie des terres agricoles de Rivière-Ouelle a été submergée alors que les niveaux d'eau atteints étaient de 3,93 m géodésique. Ainsi, avec un rehaussement moyen des mers prévu de 20 cm d'ici 2055, l'eau salée pourrait passer au-dessus de l'aboiteau plus fréquemment dans les années à venir et affecter la productivité des terres agricoles. La figure 2.4 présente une cartographie des zones submergées dans les conditions climatiques de 2055 en fonction des différentes récurrences.

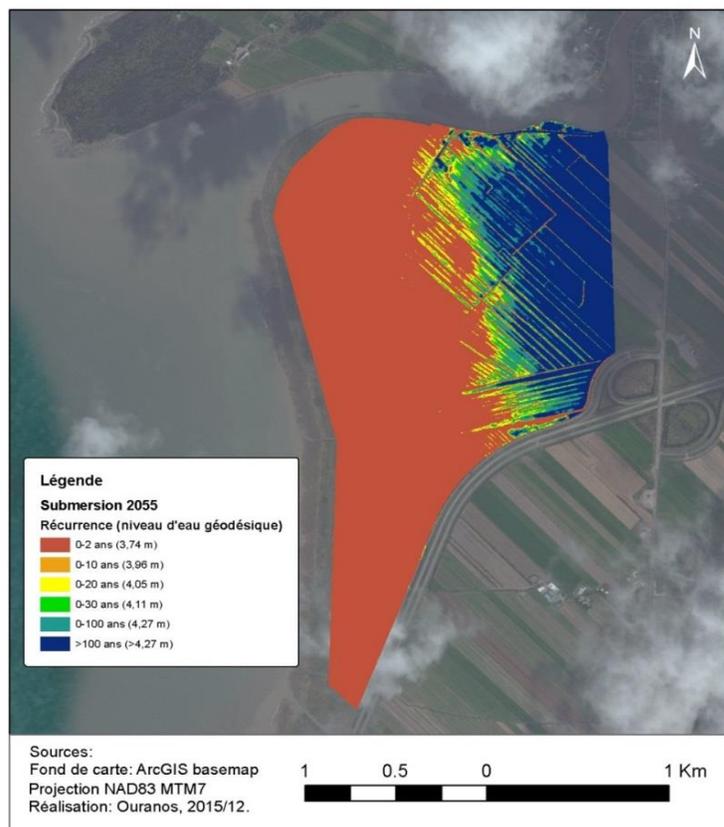


Figure 2.4 – Simulation de la superficie submergée en 2055 en fonction des événements de tempêtes



3 APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

Ce chapitre présente d'abord le processus consultatif mis en place par Ouranos afin de s'assurer de la pertinence de l'étude pour les décideurs locaux et régionaux. Les approches méthodologiques privilégiées dans le cadre de cette étude pour effectuer l'analyse hydrodynamique et l'analyse économique sont ensuite exposées.

3.1 PROCESSUS CONSULTATIF

Dans le cadre de ce projet, quatre comités ont été mis sur pied pour assister l'équipe de projet dans l'avancement de l'analyse : un comité local d'orientation, un comité régional, un comité technique et un comité aviseur. Le tableau 3.1 résume l'implication de chacun de ces quatre comités dans les différentes activités réalisées.

Dans chaque municipalité ciblée par l'étude, un comité local d'orientation (CLO) composé d'intervenants du milieu, de décideurs, de fonctionnaires et d'élus a été mis sur pied par la municipalité, afin d'orienter les travaux en fonction des besoins et des réalités locales. Dans le cas de ce projet, la MRC de Kamouraska a été désignée comme le pivot pour assurer la liaison avec les différents intervenants du milieu dépendant des informations recherchées ou des questions à valider.

L'équipe a d'abord présenté officiellement le projet aux fonctionnaires et aux élus de la MRC afin d'obtenir leur appui à sa réalisation. En cours d'étude, l'équipe a consulté, entre autres, l'Union des producteurs agricoles, la Financière agricole, des agriculteurs de la région, le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec,

un ingénieur ayant travaillé sur les aboiteaux dans la région, l'Organisme de bassins versants de Kamouraska, L'Islet et Rivière-du-Loup (OBAKIR) ainsi que le comité Zone d'Intervention Prioritaire (ZIP) du Sud-de-l'Estuaire. Des entrevues ont été réalisées dans la région pour recueillir les données requises et des appels-conférences ont été organisés afin de valider les hypothèses de travail. Enfin, les résultats préliminaires ont été présentés aux fonctionnaires, aux élus et aux intervenants du milieu qui avaient collaboré à la réalisation de l'étude. Les divers commentaires recueillis lors de ces rencontres et présentations ont permis d'améliorer la qualité des analyses effectuées et présentées dans ce rapport.

Tableau 3.1 – Processus consultatif et rôle des comités

Activités		CLO	CR	CT	CA
1	Définition de l'approche méthodologique				X
2	Validation de la zone d'étude	X			
3	Validation des scénarios d'érosion et de submersion				X
4	Identification d'options d'adaptation	X	X	X	
5	Identification des impacts des options retenues	X	X		
6	Évaluation économique des coûts et avantages	X		X	
7	Analyses coûts-avantages à l'horizon 2065				X

CLO : Comité local d'orientation, CR : Comité régional, CT : Comité technique, CA : Comité aviseur

Le comité régional (CR), pour sa part, a participé à l'identification des options d'adaptation potentielles et des impacts que ces options pourraient avoir sur la faune, la flore, les infrastructures et les activités locales. Les résultats préliminaires de l'étude ont aussi été discutés avec le CR afin de valider certaines conclusions.

Les six ministères québécois représentés sur le comité régional incluent le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation, le ministère des Affaires municipales et de l'Occupation du territoire, le ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, le ministère de la Culture et des Communications de même que le ministère des Transports. Des représentants de Pêches et Océans Canada siégeaient également sur ce comité.

Quant au comité technique (CT), il était composé de spécialistes dans le domaine côtier, dont deux ingénieurs côtiers, deux géomorphologues, un océanographe et des économistes. Le comité s'est rencontré une fois en début de projet lors d'une séance de remue-méninges afin de proposer, pour chacun des segments, des options d'adaptation aux problématiques côtières en jeu.

Enfin, le comité aviseur (CA) regroupait des spécialistes du milieu côtier et de l'analyse coûts-avantages, ainsi que des représentants des organismes finançant le projet. Ce comité avait comme mandat de valider les grandes orientations de recherche du projet et la méthodologie adoptée pour réaliser les différentes étapes de l'étude. Le comité s'est réuni à deux occasions au cours du projet.

3.2 MÉTHODOLOGIE DE PROJECTION DE LA SUBMERSION

Les épisodes de submersion résultent de niveaux d'eau extrêmes qui proviennent de la conjugaison de deux phénomènes : la *surcote* de niveau d'eau marégraphique et les hautes vagues. La submersion se produit lorsque la hauteur du niveau d'eau, combinée à la hauteur du niveau des vagues, excède la hauteur du terrain à l'arrière de la zone littorale. Une partie de ce débordement provient du *jet de rive* ou *runup*, c'est-à-dire du phénomène de transformation de l'énergie des vagues après leur déferlement en un courant ascendant vers la rive. Les vagues se forment lors des épisodes de grands vents qui surviennent généralement lors des tempêtes. Dans le cas de la rive de Rivière-Ouelle et de La Pocatière, l'effet des vagues est faible à cause de la présence de plusieurs obstacles qui empêche les vagues de prendre trop d'amplitude. De plus, la présence du marais devant l'aboteau adoucit les vagues en absorbant une partie de l'énergie. Il permet donc d'éviter le jet de rive qui accentue les niveaux d'eau extrêmes. Pour ces raisons, seul l'effet des surcotes a été pris en compte dans le calcul des projections de niveaux d'eau extrêmes.

En ce qui concerne les conditions futures, les récurrences de niveaux d'eau totaux seront affectées par l'augmentation du niveau marin relatif. Le rehaussement est dû principalement au réchauffement des océans (par expansion thermique). L'enfoncement du continent (rebond *isostatique*) ne joue pas de rôle dans le cas présent, car le rebond isostatique dans la région est nul voir légèrement positif (Koohzare et al., 2008).

À la lumière de ces conditions hydroclimatiques, l'équipe de recherche a défini des récurrences de hauteurs de submersion pour la situation actuelle de même que pour les horizons temporels de 2030 et 2055. Des niveaux d'eau extrêmes pour diverses récurrences ont été estimés pour ces trois périodes à l'aide de courbes de Gumbel et des données de Xu et al. (2013), qui ont été extrapolées à partir de la station de Pointe-aux-Orignaux. Le détail du calcul de ces récurrences est expliqué dans Boyer-Villemaire et al. (2016).

Le tableau 3.2 présente les niveaux d'eau actuels et futurs qui ont été estimés pour Rivière-Ouelle. Ces niveaux incluent le rehaussement marin anticipé qui est actuellement de 2 cm par rapport à la période 1986–2005 et qui atteindra de 8 cm et 22 cm respectivement par rapport à la même période en 2030 et 2055. À partir de ces niveaux extrêmes pour diverses récurrences, il est possible de créer des scénarios de probabilité d'occurrence et d'estimer les dommages moyens appréhendés annuellement de 2015 à 2029, de 2030 à 2054 et de 2055 à 2064.

Tableau 3.2 – Niveaux d'eau extrêmes par récurrence

Récurrence	Niveaux d'eau (m géodésique)		
	+ 2 cm	+ 8 cm	+ 20 cm
années	actuel	2030	2055
2	3,54	3,60	3,74
10	3,76	3,82	3,96
20	3,86	3,92	4,05
30	3,91	3,97	4,11
100	4,07	4,13	4,27

3.3 MÉTHODOLOGIE DE PROJECTION DE L'ÉROSION

Les taux d'érosion utilisés dans cette étude ont été fournis par l'UQAR. Ils ont été calculés sur une base historique à l'aide de photographies aériennes, de bornes de mesures sur le terrain et d'imageries satellitaires. Le choix du taux de déplacement probable par l'UQAR est expliqué de manière détaillée dans Bernatchez et al. (2015). Il est essentiellement basé sur une évaluation d'experts du mode d'évolution de la côte et

de la période historique la plus représentative, en tenant compte des impacts attendus des changements climatiques.

Pour le segment à l'étude, le suivi de l'évolution de la ligne de rivage a été réalisé par tronçon de 50 m de trait de côte de manière à construire un taux d'érosion probable qui varie en fonction de l'intensité de la problématique d'érosion. Les taux d'érosion probables ont été estimés à l'aide d'une moyenne mobile entre 2005 et 2012. La figure 3.1 montre la répartition des taux d'érosion sur l'ensemble de la zone d'étude qui est protégée par l'aboiteau. On remarque que le problème d'érosion affecte principalement la partie centrale du segment protégé par l'aboiteau. Dans cette section problématique, le taux moyen probable d'érosion varie entre -0,5 et -1,93 m par année à son maximum. Dans les sections plus au nord et au sud, l'érosion probable est très faible, parfois nulle.

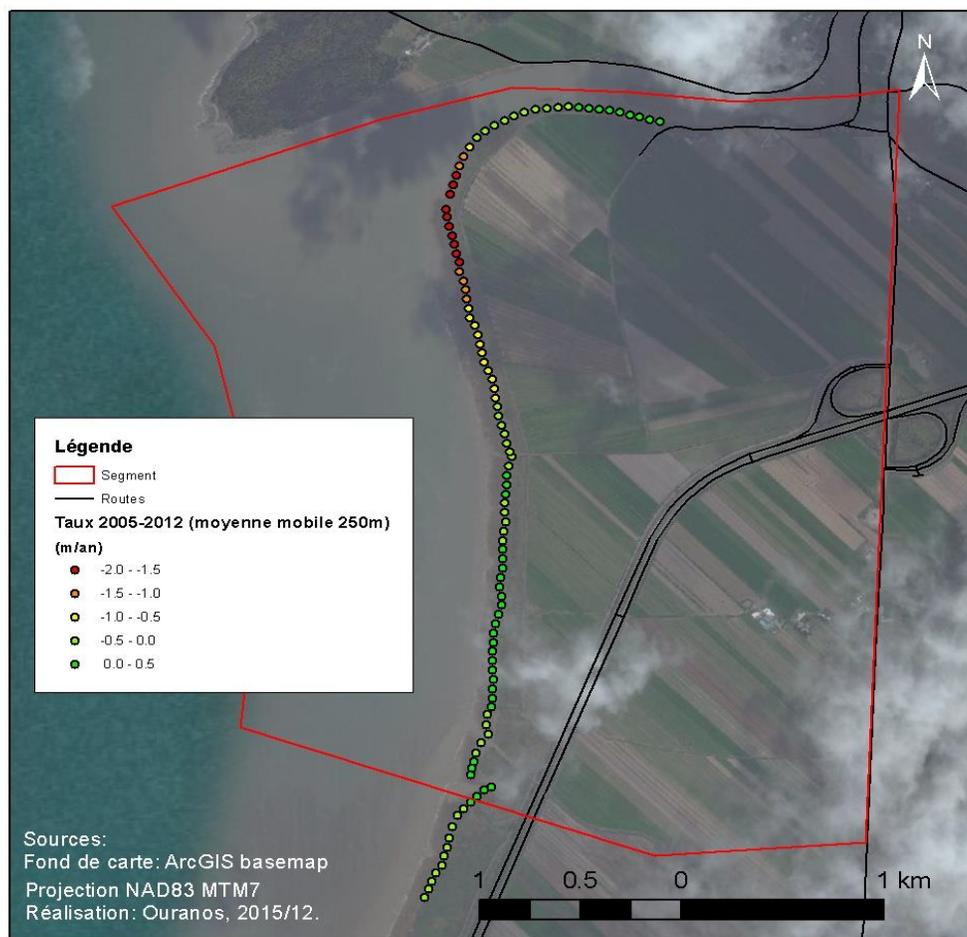


Figure 3.1 - Taux d'érosion probable à chaque 50 mètres de ligne de rivage (schorre supérieur)

L'utilisation de taux d'érosion annuels moyens permet de modéliser l'évolution future du trait de côte de Rivière-Ouelle dans les 50 prochaines années. Cependant, il est important de noter que le recul du trait de côte se produit principalement durant les événements extrêmes. Il est malheureusement impossible de prédire à quel moment un aléa frappera. Ainsi, un événement extrême de grande amplitude pourrait survenir en début de période et avoir une grande influence sur les résultats ou, à l'inverse si l'événement se produisait en fin de période, une faible influence. L'utilisation de taux annuels moyens suppose que ces reculs événementiels sont pris en compte sur l'ensemble de la période d'étude, sans préciser à quels moments ils pourraient survenir.

3.4 APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE ÉCONOMIQUE

L'objet de cette étude est de comparer les différentes options d'adaptation à la non-intervention afin de déterminer s'il est préférable d'intervenir et quelle option serait la plus avantageuse économiquement, en tenant compte de l'ensemble des coûts et des avantages sociaux, économiques et environnementaux.

La méthode utilisée est l'analyse coûts-avantages (ACA) qui permet de comparer la somme des avantages nets de chaque option d'adaptation, du point de vue de la société. Il s'agit d'une méthode largement utilisée, notamment par les différents ordres de gouvernement depuis plusieurs décennies et dont les modalités sont bien connues des utilisateurs. Sur une période donnée, elle permet de prendre en compte les composantes économiques, environnementales et sociales d'un projet en estimant la valeur économique des impacts du projet sur ces différentes composantes. L'ACA permet de comparer dans le temps différentes options d'adaptation sur une base commune à l'aide d'indicateurs, tels que la valeur actualisée nette (VAN) et le ratio avantages-coûts (ratio A/C). Il devient alors possible de classifier les options étudiées en fonction de leur performance économique.

Il est important de préciser qu'une ACA n'est pas une analyse financière. L'ACA prend en considération les avantages et les coûts directs et indirects économiques, environnementaux et sociaux d'une option, alors qu'une analyse financière s'intéresse seulement aux flux monétaires pour le promoteur. Ainsi, les coûts des externalités liées à la réalisation d'un projet, tel que les impacts sociaux et environnementaux, ne sont pas

inclus dans une analyse financière, alors qu'ils le sont dans le cadre d'une analyse coûts-avantages.

La réalisation d'une ACA inclut six étapes principales : 1) identification des options d'adaptation; 2) identification des impacts appréhendés des options d'adaptation et de la non-intervention; 3) monétisation des impacts négatifs (coûts) et des impacts positifs (avantages); 4) estimation des coûts de mise en œuvre des options d'adaptation; 5) comparaison des coûts et des avantages; 6) analyse de sensibilité des résultats.

3.4.1 Identification des options d'adaptation

À la lumière du contexte de la zone d'étude et des rencontres avec les acteurs locaux, quatre options d'adaptation ont été considérées pour la zone à l'étude. Chacune visait à atteindre l'un ou l'autre des deux objectifs suivants : 1) éviter toute brèche dans l'aboteau afin de protéger la majeure partie des terres agricoles ou 2) permettre au marais de se régénérer afin qu'il assure à plus long terme la protection de l'aboteau. Compte tenu du rehaussement marin, les quatre options considérées incluent toutes le rehaussement de l'aboteau qui devrait passer d'une hauteur moyenne de 3,9 m géodésique à environ 5 m géodésique.

La première option envisagée est de protéger l'aboteau par un épi en T formé de pierres qui serait construit à l'avant de la partie de l'aboteau la plus vulnérable à l'érosion du marais. La seconde option consiste à enrocher l'aboteau afin qu'il soit en mesure de résister aux vagues et d'éviter ainsi la création de brèches. La troisième option est plutôt basée sur un recul partiel de l'aboteau dans sa partie la plus vulnérable, afin de permettre au marais de continuer à assurer une protection naturelle contre l'érosion. Enfin, la quatrième option, appelée la dépoldérisation implique le recul de l'aboteau jusqu'au rang de l'Éventail permettant ainsi au marais de se régénérer sur une superficie potentielle de 200 hectares.

Les informations relatives à ces quatre options ont été obtenues ou extrapolées à partir d'études et de travaux d'ingénierie qui ont été planifiés ou réalisés dans la région. Le détail de la mise en œuvre et les implications techniques de chacune de ces options sont abordés à la section 4.2.

3.4.2 Identification des impacts appréhendés

Une fois que les options d'adaptation sont choisies, il est nécessaire d'évaluer les impacts de la réalisation de ces options sur les activités économiques et sociales dans la zone d'étude. Il en va de même des impacts sur l'environnement naturel qui est souvent perturbé par l'intervention humaine.

Un premier groupe d'impacts provient des aléas côtiers (érosion et submersion) et leurs conséquences directes. Il n'est pas anticipé que l'érosion atteindra les terres agricoles pendant la période d'étude. Par contre, des brèches devraient se former dans l'aboteau et affecter les terres agricoles qu'il protège. En conséquence, les actifs pouvant être affectés sont essentiellement les terres agricoles qui subiront des dommages lors des épisodes de submersion. L'érosion du marais est également un impact direct des aléas côtiers, mais étant donné que les impacts se feront sentir sur le milieu naturel, ils ont été considérés comme un impact environnemental.

En plus des impacts liés directement à la submersion, il y a les impacts économiques, environnementaux³ et sociaux. Ainsi, la submersion répétée des terres agricoles qui engendre directement des dommages annuels aux cultures pourrait entraîner à terme la perte des terres agricoles en les rendant moins productives et même impropres à la culture. De même, la perte de superficie du marais entraînerait des pertes d'habitats naturels de la faune terrestre et aviaire. Le tableau 3.3 présente l'ensemble des impacts positifs et négatifs appréhendés dans la zone d'étude.

³ Les impacts environnementaux considérés dans le cadre de cette étude se limitent aux impacts à moyen et long termes des options d'adaptation sur le milieu biophysique. Les impacts appréhendés pendant la réalisation des travaux sont exclus, car ils sont généralement de durée trop limitée pour avoir un effet significatif sur la VAN. Toutefois, les études d'impact environnemental, dont les coûts sont pris en compte dans l'ACA, considéreront ces impacts comme il se doit selon les pratiques reconnues dans le domaine.

Tableau 3.3 – Ensemble des impacts appréhendés

Impacts	Impacts négatifs	Impacts positifs
Liés à la submersion	- Dommages aux cultures	
Économiques	- Perte de productivité des terres agricoles affectant la rentabilité - Perte de terres agricoles	
Environnementaux	- Érosion du marais (Perte d'habitats naturels)	- Création de marais (gains d'habitats naturels)
Sociaux	- Vulnérabilité des producteurs agricoles - Perte du lien d'attachement des producteurs à leurs terres - Détérioration du paysage - Détérioration du patrimoine historique et culturel	- Amélioration du paysage

3.4.3 Monétisation des impacts appréhendés

Une fois les impacts des options d'adaptation identifiés et quantifiés, il est nécessaire d'estimer leur valeur monétaire. Dans le cadre de cette étude, plusieurs méthodes d'évaluation ont été utilisées selon la nature des impacts à valoriser et la disponibilité des données.

La monétisation des impacts à partir des transactions réalisées sur le marché a été privilégiée. Faute de données provenant de transactions directes, la monétisation de certains impacts dans la présente étude de cas a nécessité de recourir à des méthodes basées sur le transfert de bénéfices provenant d'études réalisées dans d'autres milieux. C'est notamment le cas pour les impacts environnementaux.

3.4.4 Estimation des dommages causés par submersion

L'estimation des dommages probables causés par les événements de submersion a été réalisée à l'aide d'une approche par analyse de risque. Dans le cadre de cette étude, le risque est défini comme étant la combinaison des dommages causés par un aléa et la probabilité que se produise ce même aléa, et ce, pour l'ensemble des aléas possibles.

Au niveau de la submersion plus spécifiquement, le risque est donc la combinaison des dommages associés aux épisodes de niveaux d'eau extrêmes et de leurs probabilités d'occurrence.

Pour Rivière-Ouelle, les dommages anticipés aux cultures à cause de la submersion ont été estimés en se basant sur la méthodologie présentée dans Penning-Rowse et al. (2014). D'une part, selon la méthodologie retenue, tout niveau d'eau extrême qui dépasse la hauteur de l'aboteau submerge les terres et a pour effet d'endommager les cultures ou de réduire la productivité de la terre. De plus, il est supposé que toutes les terres dont l'élévation géodésique est inférieure au niveau d'eau extrême qui dépasse l'aboteau sont submergées au même niveau d'eau que celui du niveau d'eau extrême.

D'autre part, lorsque les épisodes de submersion sont très fréquents, la terre submergée à répétition est considérée comme devenant non cultivable, car sa productivité est affectée à long terme. La perte de production est alors supérieure à la marge de profit de l'agriculteur. Il n'est donc plus économiquement viable de cultiver cette terre. Il a été estimé qu'une telle situation se produit lorsqu'une terre agricole est submergée par un événement de récurrence 2 ans. La perte résultante est considérée égale à la valeur marchande des terres agricoles de la région, soit 10 000 \$ à l'hectare.

Les entrevues réalisées auprès d'agriculteurs de la zone d'étude ont montré par ailleurs que la qualité du foin disponible sur les marchés n'est pas toujours égale à celle qui est produite sur les terres protégée par les aboteaux. Malheureusement, cette dimension « qualité » n'a pu être prise en compte dans l'analyse économique et ajoutée à celle de la valeur marchande à l'hectare.

Par ailleurs, d'un point de vue économique, la valeur de marché d'une terre agricole étant considérée équivalente à la valeur présente des revenus nets futurs anticipée. Ainsi, en considérant la valeur marchande totale comme la perte subie par un agriculteur lorsque sa terre devient non productive, il n'est pas pertinent de considérer la production future que perdra cet agriculteur. Cela conduirait à compter en double la perte économique.⁴

⁴ Voir Penning-Rowse et al. (2014), p. 348-351

Pour l'ensemble des terres agricoles de la zone d'étude, des projections de niveaux d'eau extrêmes pour des récurrences de 2, 10, 20, 30 et 100 ans ont été établies (Boyer-Villemare et al., 2016) et les pertes de productions correspondantes ont été estimées d'après les superficies inondées. La perte de rendement est tributaire des types de cultures, de la distribution des événements extrêmes pendant les différents mois de l'année, du pourcentage de perte anticipé en fonction du type de culture pendant les différents mois de l'année, de la tolérance des cultures au sel et de la superficie submergée par un événement. L'Annexe A présente les hypothèses qui ont été posées concernant ces différentes variables afin de déterminer les dommages appréhendés pour des événements de récurrence de 2, 10, 20, 30 et 100 ans, ainsi que les calculs effectués pour évaluer ces dommages.

Une fois les dommages établis pour chaque événement, le dommage annuel moyen est estimé à l'aide de l'approximation de Riemann. Essentiellement, l'idée est de multiplier le dommage associé à chaque événement par la probabilité d'occurrence de cet événement. Les détails de ce calcul se trouvent à l'Annexe B.

3.4.5 Estimation des coûts des options d'adaptation

En plus des coûts liés aux impacts appréhendés, l'analyse coûts-avantages exige d'estimer les coûts de mise en œuvre et d'entretien des options d'adaptation. En général, ces coûts sont déterminés à partir de projets similaires ou en faisant appel à des ingénieurs spécialisés dans la conception des options considérées. Quoique ces coûts soient relativement faciles à estimer, puisqu'ils sont basés sur des études ou projets déjà réalisés, ils sont tout de même approximatifs.

Dans le cas de Rivière-Ouelle, les coûts de certaines options d'adaptation ont été obtenus, à partir d'études techniques réalisées sur le territoire de Kamouraska au cours des dernières années afin de réhabiliter ou d'entretenir les aboiteaux. Par ailleurs, les coûts de réalisation de certains ouvrages ont également été utilisés à titre de référence et ajustés aux conditions spécifiques de la zone d'étude. Toutes les options d'adaptation ont été conçues pour une vie utile de 50 ans.

3.4.6 Comparaison des coûts et des avantages

Après avoir estimé les différents coûts et avantages de chacune des options d'adaptation et de la non-intervention, la prochaine étape consiste à calculer la somme actualisée des avantages nets sur la période d'étude, afin de pouvoir comparer les options entre elles. Ce calcul repose sur des hypothèses de base qui sont décrites ci-dessous.

a) *Population d'intérêt*

Dans le cadre de cette étude, la population considérée afin d'estimer les coûts et les avantages est la MRC de Kamouraska. Le choix de la population d'intérêt se fait généralement en fonction des individus bénéficiant le plus du projet, à titre d'usagers directs des infrastructures ou bénéficiant des retombées économiques indirectes dans la zone d'étude. Dans ce cas-ci, la protection du littoral profitera non seulement à la population des municipalités de Rivière-Ouelle et de La Pocatière, mais également aux habitants des villages environnants, qui bénéficient directement ou indirectement de la production agricole dans cette zone.

b) *Horizon temporel*

L'horizon temporel retenu pour cette étude est de 50 ans, soit de 2015 à 2064. Le choix de cet horizon est lié à la durée de vie des infrastructures côtières. Une période de 50 ans représente une durée de vie réaliste pour de telles infrastructures.

c) *Actualisation*

La méthode utilisée pour agréger les avantages et les coûts liés à une option d'adaptation donnée pour l'horizon temporel considéré est l'actualisation de ces derniers. Cette méthode permet de ramener les valeurs considérées pour chacune des années sur une même base à l'aide d'un facteur d'actualisation. La formule ci-dessous est utilisée pour estimer la valeur actualisée des avantages et des coûts.

$$VAN = \frac{f_i}{(1+r)^i}$$

Où :

VAN : Valeur actualisée nette

f : Flux monétaire (avantages ou coûts)

i : période à laquelle le flux monétaire est observé

r : taux d'actualisation

Le taux d'actualisation représente le coût d'opportunité temporel des fonds engagés tout au long de l'horizon considéré. Un taux d'actualisation plus élevé signifie que la valorisation des coûts et avantages futurs est moindre. Dans le cas de cette étude, le taux d'actualisation choisi est de 4 %. Il s'agit du taux recommandé par Ouranos dans son guide de l'évaluation des avantages et des coûts de l'adaptation (Webster et al., 2008) et retenu pour la réalisation des études régionales lancées par Ressources naturelles Canada. Puisque le taux d'actualisation peut influencer les résultats de l'ACA, une analyse de sensibilité de ± 2 % a été réalisée. Une telle analyse permet de vérifier si le résultat obtenu (soit la VAN) est robuste face à un changement dans cette hypothèse.

Une autre hypothèse de cette étude est l'unité monétaire choisie, soit le dollar canadien de 2012. Il a été choisi en raison de la disponibilité des données économiques pour cette année de référence, notamment l'historique des transactions agricoles dans la région, et pour des besoins de comparabilité avec les autres études de cas réalisées autant au Québec que dans les provinces atlantiques.

Les résultats de l'ACA, ils sont présentés à l'aide de la valeur actualisée nette, soit la VAN. La VAN a l'avantage de présenter directement la perte ou le gain économique lié à chaque option ainsi que l'ampleur de cette perte ou gain. Le ratio avantages-coûts est aussi utilisé, lorsque cela est opportun, afin de présenter les résultats en terme relatif. À la différence de la VAN qui est influencé par l'ampleur du projet tant dans ses coûts que dans ses bénéfices, le ratio avantages-coûts donne une valeur semblable à celle de la rentabilité d'un investissement en termes de rendement.

3.4.7 Analyse de sensibilité des résultats

L'analyse de sensibilité permet d'examiner la robustesse de la VAN obtenue lorsque les hypothèses importantes de l'analyse varient. Ainsi, les paramètres ou hypothèses ciblés par une telle analyse sont choisis par rapport à l'influence qu'ils peuvent avoir sur les résultats de l'ACA. Cela apporte une information complémentaire sur la variabilité potentielle des résultats, aidant les décideurs à faire des choix mieux informés. Comme on le verra plus loin (chap. 6), plusieurs analyses peuvent être réalisées. Dans cette étude, les variations aux hypothèses et paramètres suivants sont évalués : le taux d'actualisation, la durée de régénération du marais, la valeur du marais et le coût de l'enrochement de l'aboteau.



4 OPTIONS D'ADAPTATION

Ce chapitre décrit les quatre options d'adaptation qui ont été considérées dans le cadre de cette analyse. Il débute toutefois par une description de l'option de non-intervention qui sert de point de comparaison pour déterminer la rentabilité économique des différentes options d'adaptation.

4.1 OPTION DE NON-INTERVENTION

L'option de non-intervention suppose essentiellement que la situation actuelle se perpétuera au cours des 50 prochaines années. Cela implique un recul graduel du marais à un rythme allant jusqu'à -1,93 m par an dans la zone la plus vulnérable, de même que des épisodes de submersion venant affecter la productivité des terres agricoles. Il a été supposé que lorsque la ligne de rivage arrivera à moins de 5 m de l'aboteau, c'est-à-dire que la largeur du marais sera de 5 m ou moins, des brèches pourraient survenir dans l'aboteau. Compte tenu des taux annuels probables d'érosion, il est anticipé que le marais ne sera plus assez large pour freiner les vagues à partir de 2035 et que l'aboteau serait alors susceptible à la formation de brèches.

Le niveau moyen actuel de l'aboteau a été évalué à 3,9 m géodésique à l'aide d'un balayage par Lidar. Avant qu'une brèche se forme dans l'aboteau, il est supposé que toutes les terres dont l'élévation géodésique est inférieure à un événement extrême qui dépasse l'élévation de l'aboteau subiront des pertes de productivité. Une fois qu'il y aura une ou des brèches, toutes les terres dont l'élévation géodésique est inférieure à

un événement extrême même inférieur à l'élévation de l'aboiteau subiront des pertes de productivité par submersion. Le tableau 4.1 résume la règle utilisée afin de calculer les niveaux d'eau atteints sur les terres agricoles lors d'événements extrêmes.

Tableau 4.1 – Résumé des hypothèses concernant le niveau d'eau atteint sur les terres agricoles

Avant brèche
1) Si Niveau extrême > Niveau aboiteau = Submersion des terres jusqu'au niveau extrême 2) Si Niveau extrême < Niveau aboiteau = Pas de submersion
Après brèche
1) Si Niveau extrême > Niveau aboiteau = Submersion des terres jusqu'au niveau extrême 2) Si Niveau extrême < niveau aboiteau = Submersion des terres jusqu'au niveau extrême

Le tableau 4.2 compare les superficies potentiellement affectées par la submersion par récurrence avant et après 2035, année où l'aboiteau est menacé par l'érosion. On peut remarquer qu'avec la montée du niveau moyen marin, les terres seront submergées par des événements de plus faible récurrence et que les superficies affectées augmenteront dans le temps. Si aucune brèche ne survenait, un événement de récurrence deux ans ne pourrait pas submerger les terres. Comme discuté à l'Annexe A, ceci implique qu'il est toujours profitable de cultiver ces terres jusqu'à ce que l'aboiteau soit attaqué par l'érosion.

Cependant, après la brèche de l'aboiteau, il est considéré qu'une partie des terres ne sera plus économiquement rentable à cultiver et qu'une perte économique égale à la valeur des terres agricoles multipliée par la superficie touchée par les événements deux ans doit être prise en compte à partir de l'année où survient la brèche. Une fois qu'une terre n'est plus rentable, la terre est considérée abandonnée et ne subit plus de dommages liés aux pertes de récoltes.

Tableau 4.2 – Évolution dans le temps de la superficie submergée par récurrence

Superficie submergée (hectares)	Avant brèche			Après brèche			
	Récurrence	Niveau d'eau - actuel	Niveau d'eau - 2030	Niveau d'eau - 2055	Niveau d'eau - actuel	Niveau d'eau - 2030	Niveau d'eau - 2055
2		0	0	0	190	198	214
10		0	0	233	217	225	233
20		0	240	257	230	240	257
30		238	248	267	238	248	267
100		262	271	292	262	271	292

Lorsque les terres sont abandonnées, il est supposé que ces terres se transformeront graduellement en marais côtier. Une revue de la littérature et des discussions avec des experts du milieu ont permis de poser l'hypothèse que la pleine régénération du marais s'effectuerait sur une période d'environ 40 ans, débutant un an après la brèche de l'aboteau⁵.

4.2 OPTIONS D'ADAPTATION

Étant donné la problématique conjointe d'érosion et de submersion, les options d'adaptation étudiées pour ce segment visent à réduire les impacts de ces deux phénomènes. Toutes les options incluent le rehaussement de l'aboteau afin qu'il soit suffisamment élevé pour éviter la submersion des terres sur toute la période d'étude.

Les quatre options d'adaptation considérées⁶ sont l'enrochement de l'aboteau, la construction d'un épi de protection, le recul partiel de l'aboteau et la dépoldérisation. Chaque option est décrite en détail dans les sections suivantes.

⁵ Voir Argus Inc. (1998).

⁶ Toutes les options proposées sont basées sur des extrapolations tirées d'études d'ingénierie qui n'ont pas été réalisées dans le cadre de cette étude. Conséquemment, la mise en œuvre de l'une ou l'autre de ces options devrait faire l'objet d'études d'ingénierie détaillées et plus poussées. En aucun cas les informations fournies dans ce rapport ne doivent être interprétées ou utilisées comme une étude d'ingénierie.

a) *Enrochement de l'aboteau*

Cette option consiste à enrocher l'aboteau actuel dans la zone la plus à risque d'érosion, c'est-à-dire où les taux d'érosion annuels sont de -0,5 m à -1,93 m. La longueur de l'enrochement serait de 1 400 m, comme indiqué à la figure 4.1 (ligne mauve).



Figure 4.1 – Enrochement et rehaussement de l'aboteau

L'enrochement proposé est basé sur des devis préparés par Chum (2013) pour la baie de Kamouraska. La coupe de l'enrochement provenant de ces devis est présentée à la figure 4.2.

L'encastrement de l'enrochement prévu dans les devis de Chum (2013) n'est pas directement applicable dans la zone à risque de l'aboteau de Rivière-Ouelle, car l'érosion du marais a fait apparaître une microfalaise. Pour éviter que l'érosion n'attaque l'enrochement de l'aboteau à sa base, l'encastrement doit plutôt être d'environ deux mètres de profondeur. Ceci augmente significativement les quantités de roches nécessaires qui sont estimées à environ 20 mètres cubes du mètre linéaire pour des roches variant entre 50 à 800 mm.

Cette option inclut également un rehaussement complet de l'aboteau sur 4 223 m. Cette option implique que la hauteur actuelle de l'aboteau, soit 3,9 m géodésique en moyenne, soit rehaussée de 1,06 m pour atteindre 5,05 m géodésique. La hauteur de crête de l'aboteau a été modélisée en reprenant les calculs de l'étude technique et économique effectués suite à la réfection des aboteaux dans la MRC de Kamouraska dans les années 1970 (Gourde, 1980). Les facteurs principaux qui influencent la hauteur de crête sont le « fetch » et les valeurs extrêmes des hautes marées. Cette hauteur est cohérente avec la recommandation de 5 m géodésique présentée dans Ropars (2013) pour la municipalité de Saint-André de Kamouraska.

Quant à la largeur de crête, elle a été estimée à 3,8 m afin de faciliter la circulation de la machinerie sur l'aboteau.⁷ L'inclinaison du talus est de 3 : 1 du côté mer et de 2 : 1 du côté des terres agricoles.⁸ Une pente plus douce du côté mer permet de freiner plus efficacement les vagues qui peuvent toucher l'aboteau. Ainsi, le rehaussement de l'aboteau nécessitera un élargissement de 6,18 m pour permettre d'obtenir les pentes d'équilibre recherchées. L'élargissement de l'aboteau, côté terre, nécessitera un remblayage partiel du fossé de drainage. Le fossé de drainage actuel devra être élargi d'environ 13,3 m pour trouver le volume de remblai nécessaire au rehaussement. La quantité de remblai nécessaire a été estimée à 26,56 mètres cubes par mètre linéaire.⁹

⁷ Cette largeur a été modélisée par Chum (2013) à la demande de la MRC, afin que l'aboteau soit assez large pour que la machinerie puisse bien circuler.

⁸ Dans Gourde (1980), l'auteur fait état que ce type de pente, déjà en place à Rivière-Ouelle, qui a démontré son efficacité à résister aux aléas.

⁹ L'estimation du remblai nécessaire pour élargir l'aboteau est tirée de Potvin (2013).

Enfin, cette option comprend l'allongement de l'aboiteau actuel jusqu'au rang de l'Éventail. D'une longueur approximative de 200 m, cette nouvelle section d'aboiteau devrait avoir une hauteur de crête de 1,81 m pour atteindre un niveau géodésique de 5,05 m. Le volume excavé serait d'environ de 15 mètres cubes de remblai par mètre linéaire. Ce prolongement condamnerait une petite parcelle de terre cultivée d'environ 0,2 hectare.

b) Épi en T

Un épi en T est une structure qui permet de briser les vagues à la manière d'un brise-lames et favorise l'accumulation de sédiments de part et d'autre de l'ouvrage. L'installation de cette structure est prévue en avant de la section critique du marais en érosion soit sur environ 800 m. Il s'agit de la longueur minimale de l'épi afin de protéger l'aboiteau jusqu'à la fin de la période d'étude.

La conception de cet ouvrage a été extrapolée de Ropars (2010) où la faisabilité d'un épi semblable a été estimée dans la municipalité de Longue-Rive (Côte-Nord). De plus, un épi similaire a été testé près de Rivière-du-Loup par le ministère des Transports pour protéger l'autoroute 20 et le marais en érosion dans cette section. La figure 4.3 présente l'emplacement prévu pour la construction d'un tel épi.

L'élévation de la crête de l'épi a été fixée à 2,7 m géodésique alors que la largeur de la crête est de 4,5 m. Ce type de protection est essentiellement un enrochement surbaissé avec des pierres de carapace. Les quantités de matériel nécessaire sont de l'ordre de 26,8 mètres cubes de pierre de carapace de 4 à 7 tonnes, de 16,5 mètres cubes de pierre filtre de 400 à 750 kg et de 22,7 mètres cubes de tout-venant (entre 0 et 300 kg) par mètre linéaire.

Un accès en pierre devrait aussi être installé pour permettre à la machinerie d'accéder à l'épi et pour aider au maintien des sédiments. L'accès a été modélisé selon les spécifications de l'épi en T réalisé à Rivière-du-Loup, soit une longueur d'environ 115 m et une largeur de crête de 6 m. Les quantités de pierres tout-venant requises sont estimées à environ 6 mètres cubes par mètre linéaire. La figure 4.4 montre une coupe type d'un épi en T modélisé pour protéger le marais saumâtre de Longue-Rive.

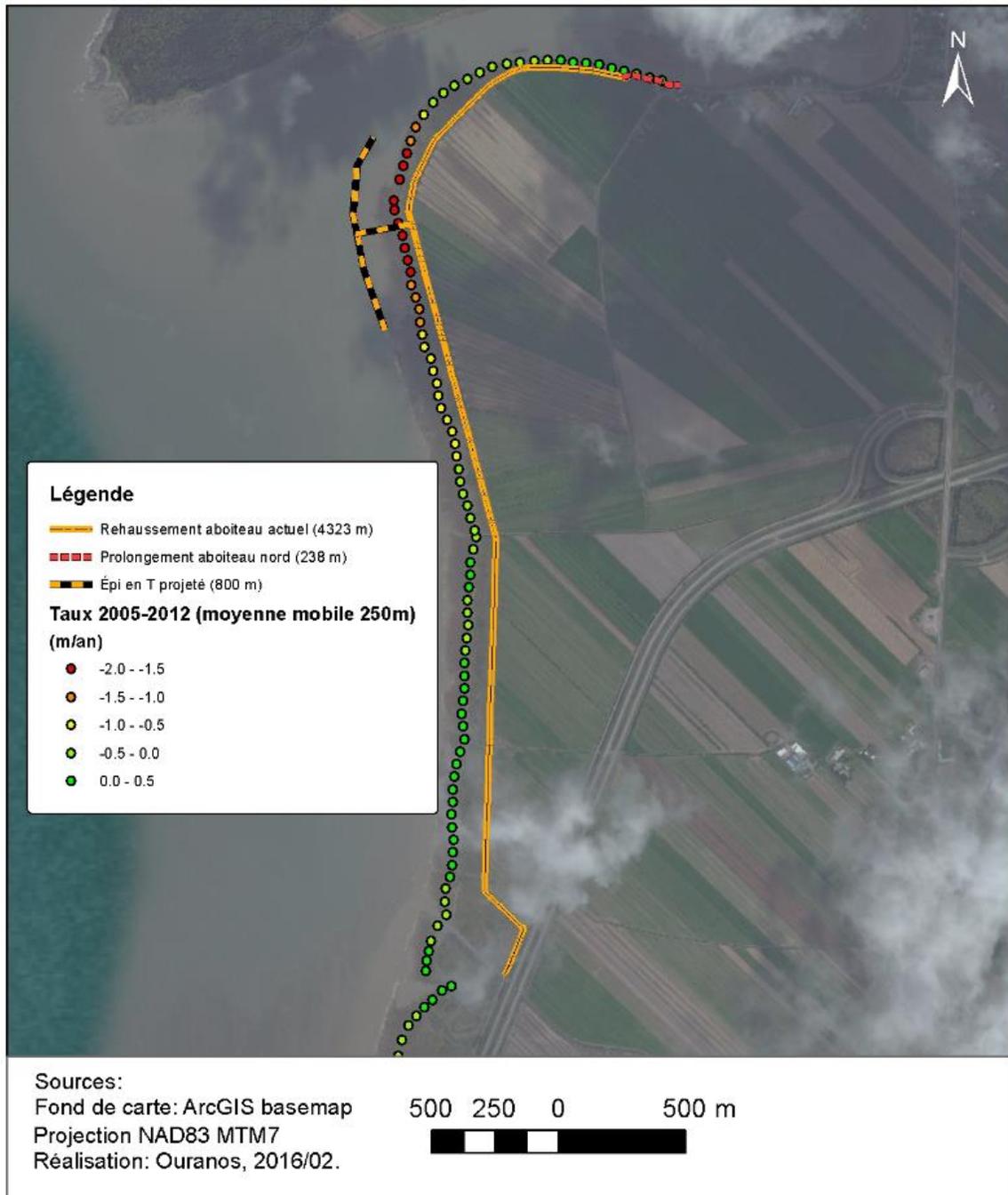


Figure 4.3 – Localisation proposée de l'épi en T

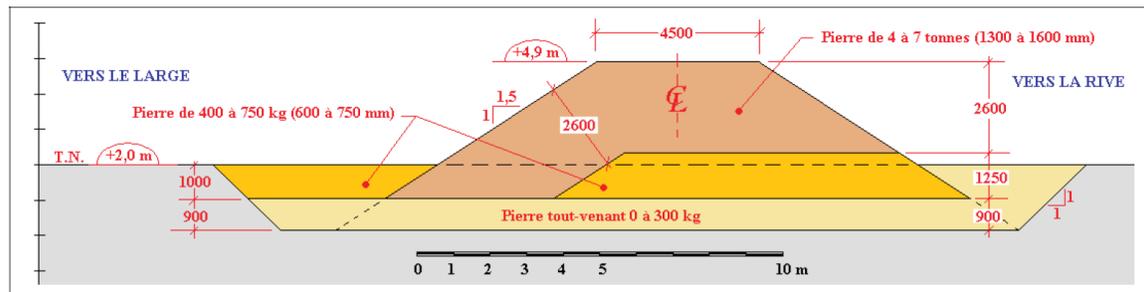


Figure 4.4 – Coupe de l'épi en T modélisé pour la municipalité de Longue-Rive

L'aboteau serait aussi rehaussé et prolongé de 200 m pour éviter la submersion par la rivière Ouelle. Les spécificités sont les mêmes que pour l'option de l'enrochement de l'aboteau. Il est finalement important de noter que la faisabilité de cette option nécessitera une étude d'ingénierie plus poussée. La proximité avec l'embouchure de la rivière et la pente d'équilibre de la côte pourrait avoir une influence importante sur la conception et la faisabilité de l'ouvrage. La modélisation de cet épi en T à l'emplacement proposé permettrait de déterminer si cette option est réalisable et d'avoir des estimés plus précis pour évaluer sa rentabilité économique.

c) *Recul partiel de l'aboteau*

Cette option consiste en un recul partiel de l'aboteau sur une distance de 100 m et sur une longueur de 1 487 m. Le rehaussement de l'aboteau actuel sur 2 736 m et son prolongement sur 200 m font aussi partie de cette option. Cette option permettrait à la fois de retarder de plus de 50 ans l'exposition de l'aboteau à l'érosion et de favoriser la régénération du marais sur environ 14 hectares. La figure 4.5 illustre le recul projeté de l'aboteau.

L'aboteau dans la section reculée aurait les mêmes caractéristiques que l'aboteau modélisé pour l'option d'enrochement, sauf qu'il n'y aurait pas de fossé de drainage à remblayer. Le niveau géodésique au pied du nouvel aboteau sera similaire à l'élévation au pied de l'aboteau actuel, soit environ 3 m géodésique. La hauteur de crête serait donc de 2,05 m pour atteindre une élévation de 5,05 m géodésique.

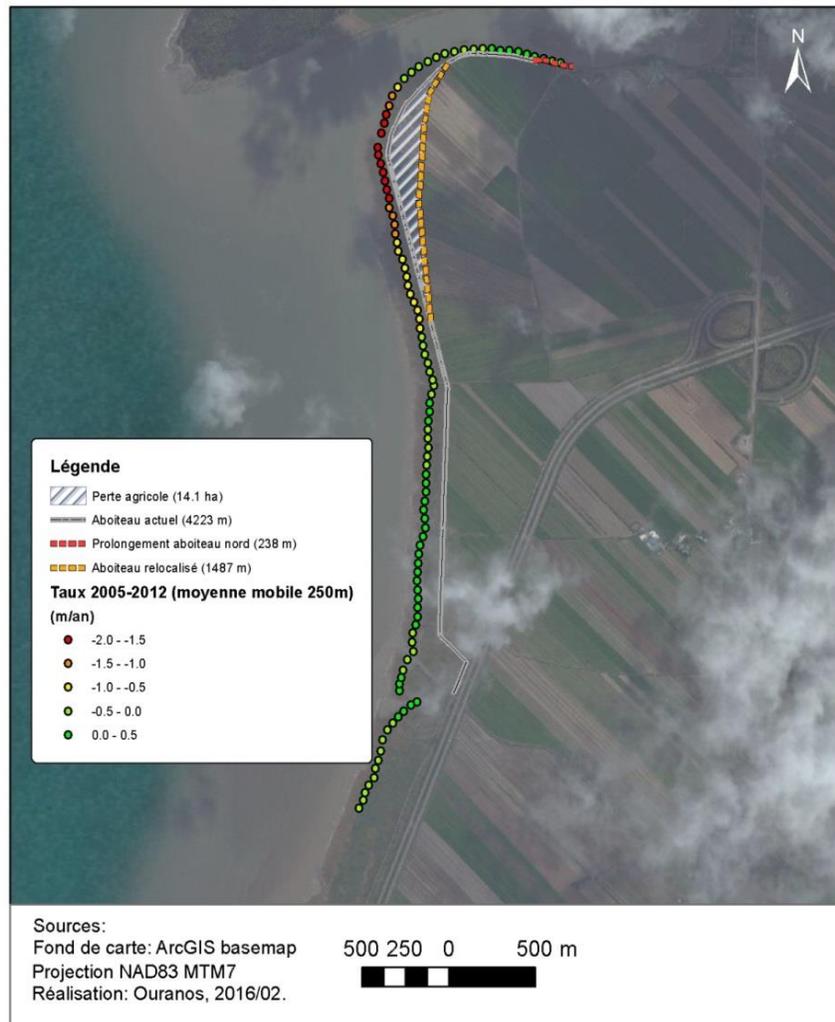


Figure 4.5 – Recul projeté de l’aboiteau

La quantité de remblai nécessaire est estimée à environ 21 mètres cubes par mètre linéaire. Le recul de cette section de l’aboiteau nécessiterait la construction d’une porte d’aboiteau pour remplacer la porte du système d’évacuation présente dans cette partie. Quant au prolongement de l’aboiteau, celui-ci aurait les mêmes caractéristiques que pour l’option d’enrochement. Finalement des brèches seraient créées dans l’ancien aboiteau pour favoriser la reprise du marais graduellement sur 40 ans.

d) *Dépoldérisation*

Cette option implique de reculer l'aboteau au niveau du rang de l'Éventail en cessant de protéger les terres agricoles situées à l'avant du nouvel aboteau. Cette option vise d'abord la régénération du marais, plutôt qu'un maintien totale des activités agricoles dans le secteur. La figure 4.6 illustre où serait relocalisé l'aboteau dont la longueur diminuerait alors à 2 680 m.



Figure 4.6 – Illustration de l'option de dépoldérisation avec déplacement complet de l'aboteau

Une fois le nouvel aboiteau construit, des brèches devraient être faites dans l'aboiteau actuel afin de permettre l'entrée récurrente de l'eau du fleuve. Ceci aurait pour effet de favoriser la transformation progressivement d'environ 200 hectares de terres agricoles en milieu humide sur 40 ans.

Cette option suppose une reprise progressive du marais sans intervention humaine, c'est-à-dire qu'aucun aménagement du marais ne serait effectué pour accélérer sa régénération ou empêcher la prolifération de plantes envahissantes comme le phragmite. Cette hypothèse repose principalement sur un manque d'informations sur l'effet de mesures anthropiques sur l'accélération de la régénération d'un marais, sur le niveau d'efficacité de ces mesures et sur leurs coûts. Toutefois, les analyses de sensibilité réalisées sur la vitesse de reconstitution du marais permettent d'évaluer l'influence d'une accélération de la reprise du milieu naturel qui pourrait découler d'un plan de reconstitution du marais.

En ce sens, dans le cas où la dépoldérisation s'avérerait la plus avantageuse économiquement, la possibilité de mettre en place un plan de reconstitution du marais pourrait faire l'objet d'une autre étude afin d'évaluer si le coût des mesures d'aménagement du marais et de contrôle des plantes envahissantes serait justifiable d'un point de vue économique.

Pour ce qui est du nouvel aboiteau, les caractéristiques de construction de ce dernier sont les mêmes que dans le cas de l'option du recul de partiel de l'aboiteau. Considérant que l'élévation géodésique moyenne des terres est de 3,85 m le long du rang de l'Éventail, les quantités de remblai requises sont évaluées à 9,32 mètres cubes par mètre linéaire.



5 IMPACTS APPRÉHENDÉS ET ESTIMATION MONÉTAIRE

Ce chapitre présente d’abord les impacts directs et indirects qui sont liés à la réalisation des différentes options considérées et, ensuite, les principales hypothèses posées afin de quantifier et de monétiser ces impacts.

5.1 IDENTIFICATION DES IMPACTS APPRÉHENDÉS

Les impacts appréhendés sont de deux types. D’une part, il y a les impacts directs associés aux effets des aléas côtiers qui comprennent essentiellement les dommages aux récoltes. Ces dommages sont causés par la submersion des terres agricoles lorsque les niveaux d’eau extrêmes passent par-dessus l’aboteau ou s’infiltrent par une brèche (après 2035). La perte de terres de marais est considérée comme un coût environnemental même si elle est causée par l’érosion, afin d’être cohérent puisqu’un gain de superficie de marais a été considéré comme un gain environnemental.

Quant aux impacts indirects, ils sont de nature économique, environnementale ou sociale. Le tableau 5.1 compare les impacts appréhendés des cinq options considérées dans le cadre de cette analyse coûts-avantages, soit la non-intervention (NI), l’enrochement (EN), l’épi en T (ET), le recul partiel de l’aboteau (RPA) et la dépoldérisation (D). Il est à noter que ce tableau reflète les impacts anticipés après l’instauration des options d’adaptation. L’enrochement de l’aboteau (EN), la construction de l’épi en T (ET) et le recul partiel de l’aboteau (RPA) sont des options prévus en 2032,

lorsque la distance minimale entre l'aboiteau et le trait de côte sera de 10 m. Ainsi, avant 2032, les dommages associés à ces trois options d'adaptation sont les mêmes que ceux en non-intervention. Dans le cas la dépoldérisation (D), il est prévu de mettre en place cette option dès 2018, le temps de réaliser les études environnementales et d'ingénierie requises.¹⁰

Tableau 5.1 – Impacts appréhendés selon les options d'adaptation et en non-intervention

Type d'impacts	Nature des impacts	NI	EN	ET	RPA	D
Impacts directs	Dommages aux cultures	X				
Impacts économiques	Abandon de terres agricoles car perte de rentabilité	X				
	Perte de terres agricoles pour réaliser l'option		X	X	X	X
Impacts environnementaux	Gain d'habitats naturels	X			X	X
	Perte d'habitats naturels	X	X	X	X	X
Impacts sociaux	Vulnérabilité des petits producteurs	X				X
	Perte du lien d'attachement des producteurs avec leurs terres		X	X	X	X
	Modification du paysage	X	X			X
	Détérioration du patrimoine historique et culturel	X	X			X

Au niveau des impacts économiques, la non-intervention implique une perte de productivité qui affecte la rentabilité de terres agricoles, lorsque les épisodes de submersion deviennent trop fréquents pour continuer à cultiver la terre. Les quatre options d'adaptation étudiées permettent d'éviter un tel impact. Quant à la perte de terres agricoles, elle est une conséquence directe de la réalisation des options d'adaptation, soit de la dépoldérisation et du recul partiel de l'aboiteau, ainsi que pour aménager les structures en terre. Dans la zone, la terre requise pour la construction

¹⁰ La dépoldérisation est envisagée dès le début de la période d'analyse puisqu'elle vise un objectif différent des autres options d'adaptation étudiées. Son objectif n'est pas de tirer un maximum de bénéfices du maintien de la production agricole, mais plutôt de favoriser la reconstitution du marais à des fins écologiques. Par ailleurs, le retardement de la dépoldérisation au moment où l'aboiteau serait menacé (vers 2035), serait équivalent à l'option de non-intervention étudiée actuellement à laquelle on ajouterait des coûts de construction de la digue le long du rang de l'Éventail, ce qui en fait de facto une option moins avantageuse que la non-intervention.

provient des terres agricoles à proximité, ce qui permet de minimiser les coûts de construction.

Toutes les options étudiées impliquent l'érosion du marais sur la période 2015-2064. La perte environnementale liée à l'érosion du marais est la même pour toutes les options, excepté pour l'option de l'épi en T qui permet de réduire d'environ 50 % l'érosion anticipée dans le marais. La perte attribuée à l'érosion du marais est équivalente à la valeur du marais multiplié par la perte de superficie érodée.

Les options de non-intervention, de recul partiel de l'aboiteau et de dépoldérisation permettent d'augmenter la superficie du marais, ce qui représente un gain environnemental. La valeur attribuée à cet impact positif est égale à la valeur du marais multiplié par la superficie transformée en marais. Comme un marais a besoin de temps pour se régénérer, la superficie gagnée est estimée grâce à une progression linéaire sur 40 ans qui débute l'année suivant la réalisation de l'option considérée.

Concernant les impacts sociaux, plusieurs ont été identifiés, mais ils sont uniquement traités qualitativement dans cette étude, puisqu'ils n'ont pas pu être quantifiés ni monétisés. La perte de terres agricoles pour de petits producteurs augmente leur dépendance envers d'autres producteurs, ce qui peut les mettre dans une situation précaire et les rendre vulnérables aux fluctuations du marché. De même, il est reconnu que les producteurs agricoles sont attachés à leurs terres qui appartiennent souvent à leur famille depuis des générations. Donc, la perte de terres agricoles représente non seulement une perte économique, mais également une perte sentimentale. Malheureusement, bien que ces impacts soient réels, il est difficile de leur attribuer une valeur économique.

Les aboiteaux font partie du paysage de la région et ont une certaine valeur culturelle, même s'ils n'ont pas de statut patrimonial officiel. D'après le ministère de la Culture et des Communications du Québec, les aboiteaux ont été identifiés comme paysages remarquables et identitaires lors d'une consultation citoyenne en 2015 par Ruralys (comm. pers.). Ainsi, leur destruction ou leur enrochement représente une perte de valeur paysagère et culturelle difficilement estimable. Ces impacts gagneraient toutefois

à être introduits dans l'analyse en tentant de les estimer dans le cadre d'une étude complémentaire.

5.2 ESTIMATION MONÉTAIRE DES IMPACTS APPRÉHENDÉS

5.2.1 Impacts directs

La monétisation des impacts directs concerne l'évaluation des dommages aux cultures lors d'épisodes de submersion. Comme indiqué à l'Annexe A, le calcul de ces dommages est tributaire des types de cultures pratiquées dans la zone d'étude, de la distribution des événements extrêmes pendant les différents mois de l'année, du pourcentage de perte associé à chaque type de culture pendant les différents mois de l'année, de la tolérance de la plante au sel et de la superficie submergée lors d'un événement extrême donné.

Il est à noter que la montée du niveau marin fera augmenter dans le temps les dommages aux cultures, mais que l'abandon de certaines terres, suite à la baisse de productivité, fait diminuer les dommages sur les cultures dans le temps. Sur l'ensemble de la période d'étude, les dommages aux cultures liés à la non-intervention actualisés à 4 % s'élèvent à 25 550 \$.

5.2.2 Impacts économiques

a) Abandon de terres agricoles

Lorsque les épisodes de submersion sont très fréquents, la terre est considérée non cultivable. À ce moment, la perte de production est supérieure à la marge de profit de l'agriculteur. Il n'est donc plus économiquement viable de cultiver la terre. Il est préférable pour l'agriculteur de se tourner vers l'achat du fourrage sur le marché. Il a été estimé que cette perte survient lorsqu'une terre agricole a la probabilité d'être submergée tous les 2 ans. La perte résultante a été estimée à la valeur marchande de la terre agricole, soit 10 000 \$ par hectare.

En non-intervention, il est estimé que 198 hectares de terres agricoles seront perdus en 2035, suite à l'apparition d'une ou de plusieurs brèches dans l'aboteau. Une superficie additionnelle de 17 hectares devient exposée à des événements de tempêtes de

réurrence 2 ans à partir de 2055. Sur l'horizon d'étude, les pertes de terres agricoles liées à la submersion engendrent des coûts d'environ 936 800 \$ en non-intervention.

b) Perte de terres agricoles

Une autre perte économique est la perte de terres cultivables requises pour la réalisation des options d'adaptation.

Avec la dépoldérisation, 200 hectares de terres agricoles seraient perdus et potentiellement transformés en marais. Dans le cas du recul partiel de l'aboteau, environ 14 hectares seraient perdus pour être transformés en milieux humides et 5,41 hectares seraient perdus comme matériaux de remblai lors de la reconstruction et du rehaussement de l'aboteau. Finalement, l'option de l'épi en T et l'enrochement exigent tous deux 5,69 hectares de terres agricoles pour rehausser l'aboteau. Les pertes associées seront évaluées à la valeur marchande des terres dans la région soit 10 000 \$ par hectare en dollars de 2012.

5.2.3 Impacts environnementaux

a) Érosion du marais

L'érosion du marais se produit principalement à la sortie de l'embouchure de la rivière Ouelle. Sur environ 800 m, le taux d'érosion du marais varie entre -0,5 m et -1,93 m par année. Sur 50 ans, environ 10,4 hectares de marais seront perdus à cause de l'érosion devant l'aboteau. Parmi les options d'adaptation proposées, seul l'épi en T réduirait la superficie érodée à 5,4 hectares sur 50 ans.

Dans cette étude, la valeur attribuée au marais provient de la méta-analyse réalisée par Constanza et al. (2006). Ces auteurs ont estimé la valeur des services écologiques rendus par un marais saumâtre dans la région du New Jersey. En tant qu'habitat naturel, un marais a une valeur moyenne de 856 \$ par année par hectare en dollars de 2012, selon cette étude. Sur 50 ans, la valeur actuelle d'un hectare de marais est d'environ 19 000\$, soit 1,9 fois supérieure à la valeur marchande d'un hectare de terre agricole. La valeur des services de protection contre l'érosion et la submersion rendus par un marais n'ont pas été prise en compte afin d'éviter un double comptage, puisque les dommages aux actifs causés par ces aléas sont déjà comptabilisés.

Ainsi, la perte de superficie de marais due à l'érosion est équivalente à la valeur du marais (856 \$/hectare/an) multipliée par la superficie érodée. Sur 50 ans, cette perte représente 35 753 \$ pour l'option de l'épi en T et de 76 006 \$ pour toutes les autres options.

b) Gain de milieux humides ou d'habitats naturels

Dans la zone d'étude, trois options auraient pour effet de permettre la régénération de milieux humides des terres présentement utilisées à des fins agricoles. En non-intervention, 198 hectares de terres agricoles pourraient redevenir des terres humides à partir de 2035 et 17 hectares supplémentaires en 2055 pour un gain actualisé de 418 802 \$. Dans le cas de la dépolarisation, ce sont plutôt 200 hectares qui pourraient graduellement être transformés en marais à partir de 2018 pour un gain actualisé de 1 331 631 \$. Malgré des superficies similaires en termes de régénération de milieux humide, les gains économiques sont beaucoup plus importants dans le cas de la dépoldérisation en raison du délai dans les gains obtenus dans le cas de la non-intervention. Enfin, l'option du recul partiel de l'aboiteau permettrait à 14,1 hectares de redevenir un marais à partir de 2032 pour un gain actualisé de 36 685 \$.

Comme mentionné précédemment, la régénération du marais est envisagée sur 40 ans avec une progression linéaire débutant un an après l'année de submersion définitive des terres agricoles. Pour toutes les options, il a été supposé une régénération du marais sans intervention humaine, c'est-à-dire qu'aucun aménagement du marais n'est planifié pour accélérer la reprise ou empêcher les plantes envahissantes de proliférer.

5.2.4 Estimation du coût des options d'adaptation

Le coût de chacune des options a été estimé à partir d'études d'ingénierie réalisée au Québec pour des aménagements similaires. Le coût de chaque option comprend les coûts pour la réalisation des études environnementales et d'ingénierie requises, les coûts de construction et 20 % de frais de contingence. Les coûts d'entretien d'options d'adaptation similaires estimés dans Ropars (2010, 2012) étaient tellement faibles qu'ils ont été jugés négligeables dans le cadre de cette étude. Cette hypothèse suppose que les structures seront construites selon les règles de l'art pour s'assurer qu'elles dureront jusqu'à la fin de leur vie utile.

Pour l'option d'enrochement, la modélisation a été effectuée à partir d'une étude d'ingénierie pour une structure similaire dans la baie de Kamouraska (Chum, 2012). Les coûts unitaires proviennent d'une étude de préféabilité de Potvin (2012) effectué pour la MRC de Kamouraska. Les volumes nécessaires pour encastrer l'enrochement ont été estimés à l'aide de Chum (2012). Au total, le coût actualisé de réalisation de cette option est de 1 300 544 \$.

Pour l'épi en T, l'estimation des quantités requise a été effectuée à l'aide de Ropars (2010) qui est une étude similaire sur la protection du marais au village de Longue-Rive. Les coûts des matériaux ont été estimés à partir d'une étude de Baird (2015) effectué pour le compte d'Ouranos. Le coût total actualisé de la construction d'un épi en T est de 3 679 134 \$.

Pour le recul partiel de l'aboteau, les estimations de quantités et de conception ont été effectuées à partir de Gourde (1980) selon les plans de réfection prévue des aboteaux. Le prix pour l'excavation a été fourni par la MRC de Kamouraska selon des travaux similaires entrepris par la MRC sur l'aboteau de la baie de Kamouraska. Le coût pour l'excavation est estimé à environ 3 \$ du mètre cube de terre. Au total, le coût actualisé de reculer l'aboteau est de 276 225 \$.

Pour la dépoldérisation, aucun coût n'a été anticipé pour créer des brèches dans l'aboteau, car ces coûts ont été jugés trop faibles. Quant à la conception du nouvel aboteau qui longe le rang de l'Éventail, le design est extrait de Gourde (1980). Au total, le coût actualisé de réalisation de la dépoldérisation est de 217 483 \$.



6 ANALYSE COÛTS-AVANTAGES

Ce chapitre présente l'ensemble des coûts et avantages estimés sur un horizon temporel de 50 ans pour la non-intervention et chacune des options d'adaptation. Une comparaison des coûts et avantages est effectuée dans le cadre du calcul de la VAN, de manière à comparer la performance économique de chaque option. Ensuite, les résultats des analyses de sensibilité sont présentés afin d'évaluer la robustesse des résultats de l'ACA. Ce chapitre conclut avec l'interprétation des résultats obtenus.

6.1 CALCUL DES COÛTS SUR 50 ANS

Cette section porte sur les coûts totaux de la non-intervention et de la mise en œuvre de chacune des options d'adaptation, incluant les coûts des impacts appréhendés. Tous les coûts présentés sur l'horizon de l'étude, soit de 2015-2064, sont actualisés à un taux de 4 %.

6.1.1 Coûts liés à la non-intervention

Les principaux coûts associés à la non-intervention sont la perte de marais, les dommages aux productions agricoles et la perte de terres agricoles à cause de la submersion répétée des terres agricoles.

La non-intervention implique le recul du marais dû à l'érosion, ce qui représente une perte totale de 76 006 \$ actualisés à 4 %. La somme des dommages moyens actualisés reliée à la submersion des cultures est de 25 550 \$ sur l'horizon considéré. De plus, la

submersion des terres agricoles à partir de 2035 qui affecte 198 hectares et 17 hectares additionnels à partir de 2055, suite au rehaussement du niveau moyen des mers, implique une perte de rentabilité des terres agricoles qui s'élève à 936 817 \$ sur l'horizon 2015-2064.

Au total, les coûts actualisés à 4 % liés à l'inaction sont de l'ordre de 1 038 373 \$ sur l'horizon temporel considéré. Les coûts annuels sont présentés à l'Annexe C.

6.1.2 Coûts liés à l'enrochement

Les coûts de mise en place de l'enrochement incluent des études environnementales et d'ingénierie de l'ordre de 230 000 \$ qui débutent en 2030. La construction, prévue en 2032, représente un coût actualisé d'environ 1,1 M\$. Au total, cette option représente un investissement de 1,3 M\$ sur 50 ans. De plus, cette option comprend une perte de terres d'une valeur actualisée de 29 226 \$, qui représente une superficie cultivable d'environ 6 hectares perdue afin de fournir le remblai nécessaire à la construction de l'ouvrage.

Parmi les autres coûts, il y a les dommages aux cultures et les coûts d'ordre environnemental dus à l'érosion de milieux humides. Le premier est le dommage aux cultures engendré par les épisodes de submersion avant la construction de l'enrochement. Ces dommages représentent 14 503 \$ pour l'horizon 2015-2031. Pour l'érosion de milieux humides, les coûts sont les mêmes que pour la non-intervention soit 76 000 \$. L'ensemble des coûts associés à cette option est donc de 1,4 M\$ sur 50 ans en utilisant un taux d'actualisation de 4 %. Les coûts annuels liés à l'enrochement pour l'horizon temporel 2015-2064 sont présentés à l'Annexe C.

6.1.3 Coûts liés à l'épi en T

À l'instar de l'enrochement, la mise en place de l'épi en T est prévue en 2032 et son coût actualisé représente plus du double de celui de l'enrochement, soit 3,7 M\$ sur 50 ans. Cette option implique également des dommages aux cultures avant sa mise en place de 14 503 \$ pour l'horizon 2015-2031. Quant à l'érosion de milieux humides, l'épi en T permet de réduire de moitié les pertes environnementales comparativement à la non-intervention, ce qui équivaut à une perte de 35 753 \$. L'ensemble des coûts

associés à cette option est donc de 3,8 M\$ sur 50 ans en utilisant un taux d'actualisation de 4 %. Les coûts annuels liés à la mise en place de l'épi en T pour l'horizon temporel 2015-2064 sont présentés à l'Annexe C.

6.1.4 Coûts liés au recul partiel de l'aboteau

Les coûts de réalisation de l'option du recul partiel de l'aboteau sont plus faibles que ceux des options précédentes, car ils représentent un investissement total de 376 438 \$ sur 50 ans. Ces coûts incluent les coûts des études, de construction en 2032 ainsi qu'une perte actualisée de 100 213 \$ pour la superficie de terres requises, soit environ 6 hectares pour le remblai et 14 hectares dus au recul.

Les dommages aux cultures avant le recul sont estimés à 14 503 \$ sur l'horizon 2015-2031, alors que la perte de marais représente un coût de 76 000 \$, comme en non-intervention. L'ensemble des coûts associés à cette option est donc de 466 948 \$ sur 50 ans en utilisant un taux d'actualisation de 4 %. Les coûts annuels liés au recul partiel de l'aboteau pour l'horizon temporel 2015-2064 sont présentés à l'Annexe C.

6.1.5 Coûts liés à la dépoldérisation

Les coûts de mise en place du nouvel aboteau qui longerait le rang de l'Éventail sont estimés à un peu plus de 217 000 \$ en incluant les coûts des études et de construction en 2018. Cette option implique également une perte économique, car 200 hectares de terres agricoles ne pourront plus être exploités de façon rentable. Cette perte économique est de 1,78 M\$. Ainsi, au total, cette option représente un investissement de 1 995 476 \$ sur 50 ans.

Les dommages aux cultures sont plus faibles dans le cas de la dépoldérisation, car l'option est prévue en 2018 et il est supposé que les terres agricoles ne seront plus rentables à cultiver par la suite. Ils sont estimés à 3 096 \$ de 2015 à 2017. Les coûts d'ordre environnemental dus à l'érosion de milieux humides sont les mêmes que pour la non-intervention soit 76 000 \$.

L'ensemble des coûts associés à cette option est donc de 2 074 578 \$ sur 50 ans en utilisant un taux d'actualisation de 4 %. Les coûts annuels liés à dépoldérisation des terres agricoles sur l'horizon temporel 2015-2064 sont présentés à l'Annexe C.

6.2 CALCUL DES AVANTAGES SUR 50 ANS

Dans le cas présent, les seuls avantages considérés, en dehors des coûts évités, sont les gains de services écologiques associés à la régénération du marais sur les terres submergées dans le cas de la non-intervention, ainsi que suite au recul partiel de l'aboteau et à la dépoldérisation.

6.2.1 Avantages liés à la non-intervention

En situation de non-intervention, il est prévu que la régénération du marais débiterait un an après l'apparition de brèches dans l'aboteau, soit dès 2036. En 2064, 198 hectares de terres seraient rétablis en milieux humides à 72,5 % et 17 hectares à 25 %. Sur l'horizon considéré, les gains environnementaux liés à la non-intervention sont estimés à 418 802 \$.

6.2.2 Avantages liés au recul partiel de l'aboteau

Dans le cas du recul de l'aboteau, la régénération du marais débiterait un an après le recul, soit dès 2033. Il est supposé qu'en 2064, 14,11 hectares de terres pourraient offrir des services écologiques à 80 %, ce qui représente des gains environnementaux actualisés de 36 685 \$ sur l'horizon d'étude.

6.2.3 Avantages liés à la dépoldérisation

Dans le cas de la dépoldérisation, la régénération du marais pourrait commencer dès 2019. Il est anticipé que les 200 hectares de terres seraient redevenus des milieux humides offrant des services écologiques en 2058. Sur l'horizon considéré, les gains environnementaux liés à la dépoldérisation sont estimés à 1 331 630 \$.

6.3 VALEUR ACTUALISÉE NETTE

Cette section présente la valeur actualisée nette (VAN) des coûts et des avantages de chaque option d'adaptation et de la non-intervention. Au tableau 6.1, les VAN de chaque option sont comparées à la VAN de la non-intervention pour déterminer si l'une ou l'autre des options est plus avantageuse que l'inaction. Enfin, la ventilation des différentes composantes des VAN est présentée à la figure 6.1.

La situation de non-intervention conduit à une VAN négative à cause des nombreuses pertes de terres agricoles engendrées par la submersion. La VAN de la non-intervention est de (619 571 \$) sur la période d'étude. En comparaison à la situation de non-intervention, seule la VAN du recul partiel de l'aboteau présente un bilan plus avantageux. En fait, toutes les VAN des options sont négatives, car leurs coûts sont élevés et leurs avantages autres que la protection des terres agricoles qui seraient perdues sans intervention sont soit inexistantes ou faibles.

Lorsque l'on compare la VAN de chaque option d'adaptation à la non-intervention, seul le recul partiel de l'aboteau a une VAN comparative positive, de l'ordre de 189 308 \$. Ceci signifie que même en considérant les coûts évités, les options d'enrochement, d'épi en T et de dépoldérisation ne sont pas avantageuses du point de vue économique.

La figure 6.2 illustre la somme cumulée des avantages nets par rapport à la non-intervention actualisée à un taux de 4 % sur la période 2015-2064. Ce graphique permet de préciser à quel moment une option peut devenir plus avantageuse que la non-intervention. Dans le cas de Rivière-Ouelle, seul le recul partiel de l'aboteau devient plus avantageux que la non-intervention à partir de 2035, soit le moment où l'option d'adaptation permet d'éviter les brèches qui compromettraient l'activité agricole sur les terres de Rivière-Ouelle.

Tableau 6.1 – Valeur actualisée nette des différentes options de 2015 à 2064 et VAN rapport à la VAN de la non-intervention

Impacts annualisés nets	Non-intervention	Enrochement	Épi en T	Recul partiel	Dépoldérisation
Dommages aux cultures (submersion)	(25 550 \$)	(14 503 \$)	(14 503 \$)	(14 503 \$)	(3 096 \$)
Coûts des mesures		(1 300 544 \$)	(3 679 134 \$)	(276 225 \$)	(217 483 \$)
Impacts économiques	(936 817 \$)	(29 227 \$)	(29 227 \$)	(100 213 \$)	(1 777 993 \$)
Impacts environnementaux*	342 796 \$	(76 006 \$)	(35 753 \$)	(39 322 \$)	1 255 625 \$
VAN	(619 571 \$)	(1 420 280 \$)	(3 758 617 \$)	(430 263 \$)	(742 947 \$)
Avantages p/r à la non-intervention		(800 710 \$)	(3 139 046 \$)	189 308 \$	(123 377 \$)

* Comprend les pertes et les gains de marais dus à l'érosion et à la régénération du marais

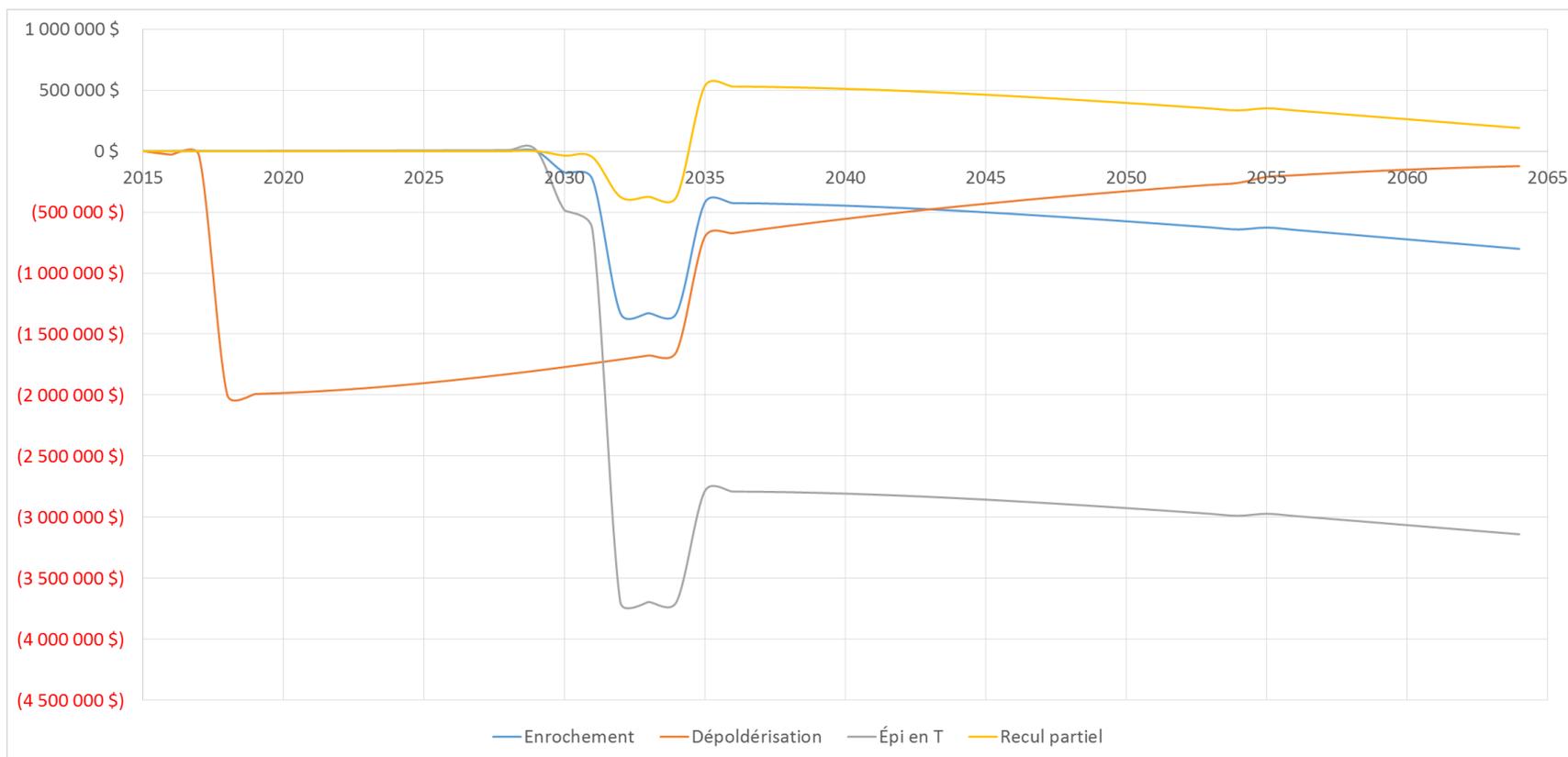


Figure 6.2 – Somme actualisée des avantages nets par rapport à la non-intervention entre 2015 et 2064

6.4 INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Comme l'indique la figure 6.3, seul le recul partiel de l'aboiteau présente un gain économique net par rapport à la situation de non-intervention. Les avantages actualisés nets de cette option sont de l'ordre de 200 000 \$ par rapport à la non-intervention. Ce résultat est dû à la revitalisation du marais sur 14 hectares, à des coûts de construction relativement faibles et au maintien des activités agricoles sur la majeure partie de la zone d'étude.

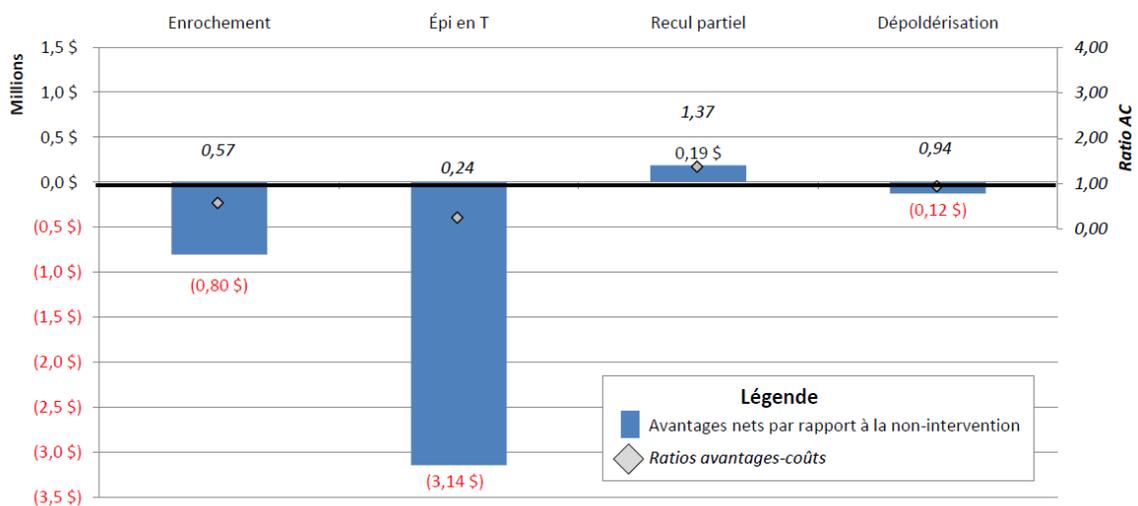


Figure 6.3 – Avantages actualisés nets par rapport à la non-intervention à Rivière-Ouelle

Les options de l'épi en T et de l'enrochement ne permettent pas d'obtenir des gains économiques nets, notamment parce que les coûts de construction sont très élevés, sans que cela permette de régénérer le marais. Les coûts nets sont de l'ordre de 0,8 M\$ pour l'enrochement et de 3,1 M\$ pour l'épi en T.

La dépoldérisation est elle aussi moins rentable que la non-intervention. Cette option n'est pas avantageuse, surtout parce que les coûts se matérialisent en début de période alors que les gains environnementaux surviennent davantage en fin de période à cause du temps de régénération du marais. Les coûts nets de cette option sont de l'ordre de 0,12 M\$.

Enfin, les ratios avantages-coûts présentés à la figure 6.3 démontrent que le recul partiel de l'aboteau est également l'option la plus avantageuse lorsque l'on se réfère à cet indicateur. Le ratio de cette option atteint 1,4 \$ d'avantages pour chaque dollar consenti par l'ensemble de la société. Pour toutes les autres options, ce ratio est inférieur à 1, ce qui signifie que les coûts sont supérieurs aux avantages.

6.5 ANALYSE DE SENSIBILITÉ

Le présent chapitre présente les VAN obtenues lorsque des hypothèses clés de l'ACA sont modifiées. L'objectif de cette analyse est d'examiner la robustesse de la VAN suite à de telles modifications. Les hypothèses ciblées incluent le taux d'actualisation, la durée de régénération du marais, la valeur attribuée au marais et le coût de l'enrochement de l'aboteau. Le tableau 6.2 résume les analyses de sensibilité réalisées.

Les résultats des analyses de sensibilité sont présentés ci-après, et ce, pour chaque modification apportée aux hypothèses comme indiqué au tableau 6.2.

Tableau 6.2 – Paramètres des analyses de sensibilité

Paramètre	Variation
Taux d'actualisation	± 2 %
Durée de régénération du marais	± 20 ans
Valeur du marais	+ 50 %
Coût de l'enrochement de l'aboteau	Pierre des champs

6.5.1 Taux d'actualisation

Dans le cas du taux d'actualisation, l'utilisation d'un taux plus faible a pour effet d'accorder une importance relative plus grande aux impacts ayant lieu à des moments plus tardifs dans l'horizon temporel considéré. À l'inverse l'utilisation d'un taux plus élevé accentue la valeur relative des coûts et avantages initiaux. Le tableau 6.3 illustre les valeurs de VAN obtenues avec des taux d'actualisation de 2 % et 6 %.

Tableau 6.3 – Résultats obtenus avec des taux d'actualisation de 2 % et 6 %

Options d'adaptation	Taux d'actualisation		
	2 %	4 % (base)	6 %
VAN non-intervention	(689 015 \$)	(619 571 \$)	(493 791 \$)
VAN enrochement	(1 986 275 \$)	(1 420 280 \$)	(1 027 752 \$)
VAN dépoldérisation	135 550 \$	(742 947 \$)	(1 145 483 \$)
VAN épi en T et rehaussement	(5 206 908 \$)	(3 758 617 \$)	(2 733 459 \$)
VAN recul partiel de l'aboiteau	(593 491 \$)	(430 263 \$)	(315 041 \$)
Enrochement - Avantage net par rapport à la non-intervention	(1 297 260 \$)	(800 710 \$)	(533 960 \$)
Dépoldérisation - Avantage net par rapport à la non-intervention	824 565 \$	(123 377 \$)	(651 692 \$)
Épi en T et rehaussement - Avantage net par rapport à la non-intervention	(4 517 894 \$)	(3 139 046 \$)	(2 239 667 \$)
Recul partiel de l'aboiteau - Avantage net par rapport à la non-intervention	95 524 \$	189 308 \$	178 750 \$

La baisse du taux d'actualisation diminue la VAN de toutes les options d'adaptation sauf de la dépoldérisation. Pour cette option, la baisse du taux d'actualisation augmente fortement le poids des gains environnementaux et rends la VAN positive. La VAN de la dépoldérisation comparée à celle de la non-intervention devient également fortement positive et en fait l'option la plus avantageuse.

Inversement, la hausse du taux d'actualisation augmente la VAN de toutes les options sauf celle de la dépoldérisation. Au taux d'actualisation de 6 %, le recul et rehaussement de l'aboiteau demeure l'option la plus avantageuse pour la société.

6.5.2 Durée de régénération du marais

La durée de régénération du marais est un paramètre sur lequel beaucoup d'incertitude plane. En effet, il semble que beaucoup de facteurs influencent la durée de régénération

d'un marais comme la topographie des terres agricoles, le temps de formation de marelles et le temps de dispersion des graines des différents végétaux (White, 2014). Afin d'éviter de donner trop de poids à un facteur très incertain, il a été décidé d'adopter une approche conservatrice et d'évaluer comment ce facteur pourrait influencer le résultat de l'ACA.

Réduire la durée de régénération du marais augmente significativement les gains environnementaux. À l'inverse, augmenter la durée de régénération devrait diminuer les gains environnementaux des options étudiées.

Tableau 6.4 – Résultats obtenus avec une variation de la durée de régénération du marais

Options d'adaptation	Durée de régénération du marais		
	20 ans	40 ans (base)	60 ans
VAN non-intervention	(268 085 \$)	(619 571 \$)	(759 172 \$)
VAN enrochement	(1 420 280 \$)	(1 420 280 \$)	(1 420 280 \$)
VAN dépoldérisation	(12 126 \$)	(742 947 \$)	(1 177 447 \$)
VAN épi en T et rehaussement	(3 758 617 \$)	(3 758 617 \$)	(3 758 617 \$)
VAN recul partiel de l'aboteau	(401 591 \$)	(430 263 \$)	(442 491 \$)
Enrochement - Avantage net par rapport à la non-intervention	(1 152 195 \$)	(800 710 \$)	(661 109 \$)
Dépoldérisation - Avantage net par rapport à la non-intervention	255 959 \$	(123 377 \$)	(418 276 \$)
Épi en T et rehaussement - Avantage net par rapport à la non-intervention	(3 490 532 \$)	(3 139 046 \$)	(2 999 446 \$)
Recul partiel de l'aboteau - Avantage net par rapport à la non-intervention	(133 506 \$)	189 308 \$	316 680 \$

Le tableau 6.4, qui présente les résultats de cette analyse de sensibilité, montre en effet que la durée de régénération complète du marais influence la VAN. Lorsque la durée diminue à 20 ans, la VAN des trois options permettant une régénération du marais

augmente. La VAN de la dépoldérisation devient même positive par rapport à la non-intervention. Dans le cas du recul et rehaussement de l'aboteau, l'accélération du processus de régénération du marais favorise la non-intervention puisque les bénéfices du marais dans la non-intervention sont générés plus rapidement.

Au contraire, lorsque la régénération complète du marais se réalise sur 60 ans, ceci réduit les gains environnementaux de la non-intervention et améliore la VAN comparée de toutes les options sauf pour la dépoldérisation.

L'option de la dépoldérisation devient la plus avantageuse lorsque les gains environnementaux sont plus rapides. Cependant, s'ils se produisent sur une période de 40 ans ou plus, alors le recul et rehaussement de l'aboteau demeure l'option la plus avantageuse pour la société.

En somme, cette analyse de sensibilité démontre que les résultats de l'ACA sont sensibles à ce paramètre. Une analyse plus poussée sur ce paramètre lors d'une étude d'impact environnemental aiderait à évaluer la performance économique des options d'adaptation étudiées.

6.5.3 Valeur du marais

Pour la région de Kamouraska, il se peut que la valeur d'un marais saumâtre soit plus élevée que celle retenue dans l'ACA. La valeur retenue de Constaza et al. (2006) est assez conservatrice selon la littérature sur la valorisation de ce type de milieu humide. Afin de tenir compte d'une potentielle sous-estimation de la valeur de ce milieu humide, cette analyse de sensibilité considère une hausse de 50 % de la valeur à l'hectare du marais. Ceci étant dit, la valeur des services rendus par le marais suppose une régénération saine composée des espèces floristiques et fauniques typiques des marais saumâtres de la région. Or, au cours des dernières années, l'invasion du phragmite dans les milieux humides et les marais du secteur s'avère une problématique de plus en plus importante. Pour tenir compte du risque que le phragmite envahisse les terres destinées à être régénérées en marais, une valeur nulle a également été testée dans l'analyse de sensibilité. Les résultats de ces deux analyses sont présentés au tableau 6.5.

Tableau 6.5 – Résultats obtenus avec l'augmentation de la valeur du marais de 50 %

Options d'adaptation	Valeur du marais		
	Valeur nulle	Base	+ 50 %
VAN non-intervention	(962 367 \$)	(619 571 \$)	(448 173 \$)
VAN enrochement	(1 344 274 \$)	(1 420 280 \$)	(1 458 283 \$)
VAN dépoldérisation	(1 998 572 \$)	(742 947 \$)	(115 135 \$)
VAN épi en T et rehaussement	(3 722 864 \$)	(3 758 617 \$)	(3 776 494 \$)
VAN recul partiel de l'aboteau	(390 941 \$)	(430 263 \$)	(449 924 \$)
Enrochement - Avantage net par rapport à la non-intervention	(381 907 \$)	(800 710 \$)	(1 010 111 \$)
Dépoldérisation - Avantage net par rapport à la non-intervention	(1 036 205 \$)	(123 377 \$)	333 038 \$
Épi en T et rehaussement - Avantage net par rapport à la non-intervention	(2 760 497 \$)	(3 139 046 \$)	(3 328 321 \$)
Recul partiel de l'aboteau - Avantage net par rapport à la non-intervention	571 425 \$	189 308 \$	(1 751 \$)

En augmentant la valeur du marais, les résultats de l'analyse de sensibilité sont similaires à ceux obtenus en accélérant la régénération du marais. La VAN de la dépoldérisation devient positive par rapport à la non-intervention et cette option devient plus avantageuse que l'option de recul et rehaussement de l'aboteau. Inversement, lorsque la valeur du marais est fixée à zéro, les gains environnementaux des options régénérant de grandes superficies de terres perdent de l'importance. À ce moment, le recul partiel de l'aboteau apparaît encore une fois comme l'option à privilégier. Cela veut également dire que même sans inclure les gains environnementaux d'un recul partiel, cette option est plus rentable économiquement que les autres options qui nécessitent des investissements plus coûteux (enrochement et épis en T).

Par ailleurs, l'estimation de la valeur des marais a fait l'objet de plusieurs analyses économiques au cours des dernières décennies, mais la variabilité des résultats dans la

littérature suggère qu'il est difficile d'arriver à un consensus sur la réelle valeur de ces écosystèmes. Il devient dès lors intéressant de connaître la valeur des services écologiques du marais qui modifient les conclusions de l'analyse. Selon les hypothèses de base de la présente ACA, la valeur des services écologiques doit être d'environ 1 063 \$ par hectare, soit 24 % plus élevée, afin que la dépoldérisation soit l'option la plus avantageuse au niveau économique. Pour toute valeur inférieure, le recul partiel de la digue apparaît comme l'option la plus avantageuse économiquement.

6.5.4 Coût d'enrochement de l'aboiteau

Les coûts de l'enrochement ont été estimés en considérant l'achat et la pose de pierres de carrière (Potvin, 2012). Cependant, lors de la réalisation de travaux récents dans d'autres secteurs, la MRC a plutôt décidé d'utiliser des pierres provenant des champs des agriculteurs, ce qui a grandement réduit le coût de construction. Il a donc été décidé d'effectuer une analyse de sensibilité sur le coût de l'option d'enrochement, afin d'évaluer si cette option pourrait être avantageuse en utilisant les pierres disponibles à proximité. Aux fins d'analyse, il a été supposé que ces pierres sont d'assez bonne qualité pour effectuer les travaux et qu'elles n'engendreraient pas de coûts d'entretien supplémentaires. L'utilisation des pierres de champ permet de réduire de plus de 50 % le coût de l'enrochement dans le secteur critique.

Malgré la diminution des coûts de l'option d'enrochement, la VAN de cette option par rapport à la non-intervention est toujours négative. L'option la plus avantageuse demeure le recul et rehaussement de l'aboiteau.

Tableau 6.6 – Résultats obtenus en utilisant des pierres des champs pour l'enrochement

Options d'adaptation	Provenance des pierres d'enrochement	
	Pierre des champs	Pierres de carrière (base)
VAN non-intervention	(619 571 \$)	(619 571 \$)
VAN enrochement	(722 120 \$)	(1 420 280 \$)
VAN dépoldérisation	(742 948 \$)	(742 947 \$)
VAN épi en T et rehaussement	(3 758 617 \$)	(3 758 617 \$)
VAN recul partiel de l'aboteau	(430 264 \$)	(430 263 \$)
Enrochement - Avantage net par rapport à la non-intervention	(102 548 \$)	(800 710 \$)
Dépoldérisation - Avantage net par rapport à la non-intervention	(123 377 \$)	(123 377 \$)
Épi en T et rehaussement - Avantage net par rapport à la non-intervention	(3 139 046 \$)	(3 139 046 \$)
Recul partiel de l'aboteau - Avantage net par rapport à la non-intervention	189 308 \$	189 308 \$

6.5.5 Synthèse de l'analyse de sensibilité

Le tableau 6.7 présente un sommaire des résultats des analyses de sensibilité réalisées pour cette ACA. Ces résultats indiquent que les options du recul partiel et de dépoldérisation sont les options les plus avantageuses selon les hypothèses posées.

Tableau 6.7 – Option d'adaptation la plus avantageuse selon l'analyse de sensibilité

Hypothèse modifiée	Option la plus avantageuse
Hypothèses de base	Recul et rehaussement
Taux d'actualisation de 2 %	Dépoldérisation
Taux d'actualisation de 6 %	Recul et rehaussement
20 ans pour la régénération complète du marais	Dépoldérisation
60 ans pour la régénération complète du marais	Recul et rehaussement
Augmentation de la valeur du marais (+ 50 %)	Dépoldérisation
Diminution de la valeur du marais (0 \$ par hectare)	Recul et rehaussement
Coût de l'enrochement de l'aboiteau (pierres des champs)	Recul et rehaussement

Il est important de souligner que l'option de dépoldérisation est la plus avantageuse seulement lorsque les hypothèses environnementales sont plutôt optimistes que conservatrices. La règle de la prudence penche donc en faveur de l'option du recul partiel. Il n'en demeure pas moins que les résultats de l'ACA sont sensibles aux paramètres relatifs au marais et qu'il serait préférable de procéder à une analyse plus approfondie de ces paramètres



7 CONCLUSION

Cette analyse coûts-avantages visait principalement à comparer les options d'adaptation pouvant limiter les dommages de submersion et faire face à l'érosion côtière à Rivière-Ouelle, et ce, en considérant l'ensemble de leurs avantages et de leurs coûts économiques respectifs.

Les résultats de l'ACA permettent de déterminer que l'option la plus avantageuse économiquement est le recul partiel et le rehaussement de l'aboteau. Cette option entraîne moins de coûts et de pertes économiques et environnementales que les autres options étudiées, tout en étant la plus robuste au niveau des analyses de sensibilité. L'avantage net de cette option est d'un peu moins de 200 000 \$ sur 50 ans à un taux d'actualisation de 4 %. De plus, le ratio avantages-coûts de cette option atteint 1,4, ce qui signifie que chaque dollar consenti pourrait générer des avantages de l'ordre de 1,4 \$.

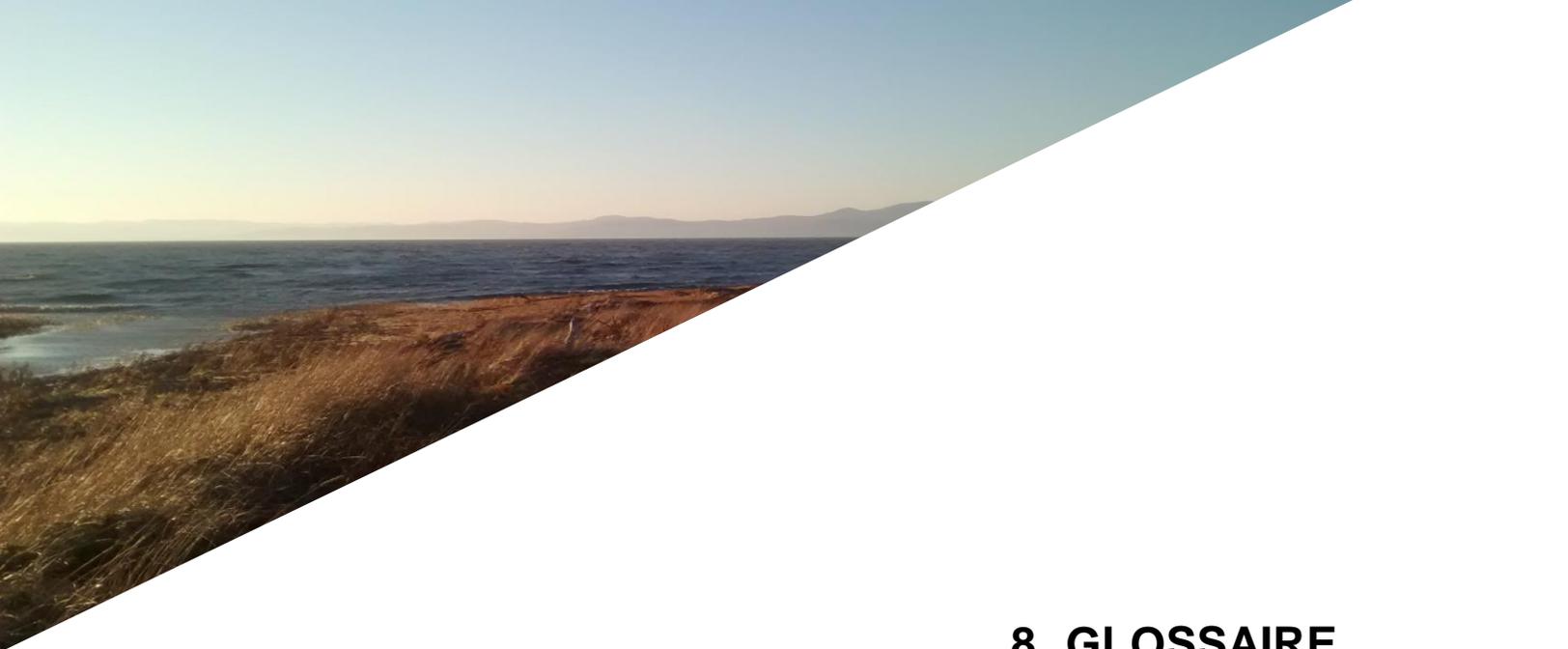
La régénération du marais dans la zone d'étude s'est avérée le principal facteur influençant la performance économique des différentes options d'adaptation. Les analyses de sensibilité ont démontré qu'en faisant varier favorablement les paramètres qui peuvent augmenter les gains environnementaux, la dépoldérisation devenait l'option la plus avantageuse économiquement. L'option de recul et de rehaussement de l'aboteau demeure cependant l'option la plus performante dans l'ensemble des situations considérées.

En plus d'être économiquement rentable, l'option de recul et de rehaussement de l'aboteau se positionne comme une solution de compromis. Étant donné l'importance de la valeur relative des milieux naturels et des terres agricoles dans la performance des options d'adaptation étudiées, le recul partiel permet de partager les coûts associés aux changements climatiques entre ces deux composantes de l'environnement. En effet, cette option a l'avantage de favoriser la régénération du marais, tout en permettant de conserver une activité agricole sur la majeure partie des terres.

Il est évident que l'ACA n'a pas pu quantifier l'ensemble des facteurs affectant la valeur des milieux humides et des terres agricoles. Pensons simplement à la valeur sentimentale que les agriculteurs accordent à leurs terres ou bien à la valeur esthétique des marais saumâtres typiques de la région de Kamouraska. La monétisation de ces composantes de la valeur des terres agricoles et des milieux naturels pourrait aider à mieux valoriser chacun de ces aspects.

Une grande incertitude dans la réalisation de cette ACA demeure la possibilité de régénérer le marais, compte tenu des diverses contraintes, du peu d'expériences réalisées à ce jour et de la sensibilité à la durée de la régénération. La structure du marché agricole, dont la gestion de certaines composantes est contrôlée, est également un élément qui génère de l'incertitude, puisque l'analyse est basée sur l'hypothèse qu'il existe un environnement concurrentiel qui guide les choix faits par les agriculteurs.

Enfin, une avenue potentielle de recherche serait la prise en compte de l'effet du réchauffement climatique sur la productivité des terres agricoles du Bas-Saint-Laurent. En effet, une hausse des unités thermiques dans la région pourrait augmenter la productivité des terres et peut-être même favoriser l'apparition de nouveaux types de cultures. Ceci aurait pour effet de modifier la marge de profit des terres agricoles et leur valeur et pourrait ainsi affecter les résultats de cette étude.



8 GLOSSAIRE

Aboiteau : digue agricole qui permet, par un système de vannes, de drainer et d'assécher des terres humides en bordure de la mer, traditionnellement utilisée par les Acadiens afin de récupérer des terres littorales pour la culture.

Ajustement eustatique : variation du niveau moyen des mers (relative par rapport aux continents supposés stables) dont les facteurs en cause sont, par exemple, les variations thermiques des océans, la fonte des glaciers et les dynamiques de glaciation et déglaciation.

Ajustement isostatique : également appelé rebond postglaciaire ou glacio-isostasie, se définit comme le soulèvement de masses terrestres consécutif à la déglaciation et plus précisément à la fonte des calottes glaciaires, puisque les masses terrestres, antérieurement *déprimées* (par compression sous les charges de glace) se relèvent durant la période postglaciaire.

Analyses coûts-avantages (ACA) : étude d'un programme ou d'une activité par l'analyse qualitative et quantitative de tous les avantages et de tous les coûts relatifs à l'implantation et au fonctionnement de ce programme ou de cette activité (Office québécois de la langue française, 1998).

Dépoldérisation : restauration de marais salés ou de terres basses en bordure de la mer autrefois occupés par l'humain, principalement pour l'agriculture grâce à des digues ou aboiteaux, par des techniques passives comme le laisser-aller suite à des dommages

ou des techniques actives comme l'ouverture de brèches, la création de chenaux de marée et la plantation d'espèces végétales indigènes.

Dérive littorale : le déplacement le long d'un littoral de matières (sédiments, sable), causé par les vents et le déferlement entraînant un courant parallèle à la côte. Le terme désigne à la fois le courant parallèle à la côte et le déplacement des sédiments qui est causé par ce courant.

Domage annuel moyen (DAM) : coût moyen des dommages causés par les événements de submersion auxquels un bâtiment sera soumis lors d'une année typique. Le dommage annuel moyen est calculé à l'aide des probabilités de niveaux d'eau extrême et des dommages sur le bâtiment associés à chaque niveau correspondant.

Effet de bout : lorsque les vagues frappent une paroi rigide et imperméable, tel un mur ou un enrochement, leur énergie est réorientée aux extrémités de l'ouvrage, ce qui peut accélérer l'érosion des rives voisines.

Épis : ouvrage de protection contre l'érosion côtière, positionné de manière perpendiculaire à la côte et formée d'empilements de roches ou de pieux verticaux enfouis dans le sol et placés les uns à côté des autres, visant à retenir les particules de sédiments transportées par les vagues, tout en permettant une certaine circulation d'eau.

Estran : aussi appelé zone intertidale (ou de marnage), l'estran est la partie du littoral située entre les limites extrêmes des plus hautes et des plus basses marées.

Fetch : distance en mer ou sur un plan d'eau au-dessus de laquelle souffle un vent donné sans rencontrer d'obstacle (une côte) depuis l'endroit où il est créé ou depuis une côte s'il vient de la terre; plus le fetch est important plus la hauteur des vagues sera grande, à l'opposé, à l'abri d'une côte (sous le vent d'une côte), la hauteur des vagues sera très faible, même si le vent est très fort, car le fetch y est plus petit.

Immunsation : mesure d'adaptation à la submersion qui consiste à rehausser les bâtiments par un remblayage du terrain jusqu'à une élévation suffisante afin d'éliminer ou de réduire les dommages causés par la submersion.

Jet de rive : phénomène de courant montant sur la côte après le point de déferlement des vagues, dont la hauteur dépend de la hauteur significative des vagues, leur période et l'inclinaison de la plage sur laquelle celles-ci déferlent. Il est à noter que le terme de *jet de rive* est utilisé de manière inclusive et équivalente au *wave setup*.

Lidar : acronyme de l'expression « lighth detection and ranging », désignant une technologie de mesure à distance qui, par l'analyse d'un faisceau de lumière – souvent un laser – renvoyé à son émetteur, permet de déterminer certaines propriétés du terrain à l'étude telle que la topographie.

Niveau moyen (relatif) des mers (NMM) : hauteur moyenne de la surface de la mer, par rapport à un niveau de référence suffisamment stable; on le considère généralement issu de la différence entre les niveaux eustatique (mesure du niveau marin relative par rapport aux continents supposés stables) et isostatique (voir rebond isostatique).

Non-intervention (NI) : option de référence qui implique un laisser-aller des structures de protection existantes et une accumulation des dommages de submersion et d'érosion par les actifs dans les zones d'étude.

Produit intérieur brut (PIB) : mesure de la richesse créée dans l'année par les unités de production résidentes « qui constitue » un indicateur de croissance (OQLF, 1989).

Ratio avantages-coûts (A/C) : quotient obtenu en divisant la valeur quantitative des avantages tirés d'une activité, d'un programme ou d'un projet, par les coûts afférents à cette activité, ce programme ou ce projet (ICCA, 2006).

Recharge de plage : méthode de protection contre l'érosion côtière qui consiste à transporter du sable et/ou du gravier sur une plage, soit en le déposant directement sur celle-ci ou en marge du site, pour produire un engraissement artificiel de la plage qui augmentera sa capacité à protéger la côte, en absorbant l'énergie des vagues. Cette méthode nécessite un entretien récurrent.

Relocalisation stratégique : option d'adaptation à l'érosion et/ou à la submersion qui consiste à déplacer les bâtiments à risque vers des zones sécuritaires (non exposées aux aléas). Les seuils utilisés sont les suivants : lorsque les bâtiments lorsqu'ils sont à

moins de 5 mètres du littoral ou que l'élévation de leur rez-de-chaussée est inférieure au niveau d'eau extrême de récurrence 20 ans

Riprap : mesure de protection contre l'érosion due aux vagues ou aux glaces qui consiste à déverser une couche de roches ou d'autres matériaux disposés en vrac, dont les tailles granulométriques sont diversifiées, et qui sert à absorber et diffuser l'énergie des vagues avant qu'elle n'atteigne la structure à protéger.

Schorre : terme désignant la partie basse des marais salés qui n'est inondée que lors des grandes marées et qui est colonisée par de la végétation tolérante au sel.

Submersion : phénomène naturel d'inondation par la mer qui survient lorsque la limite supérieure du jet de rive dépasse le niveau supérieur de la ligne de rivage ou de la structure de protection.

Subsidence (géologique) : un lent affaissement de la lithosphère (le continent) entraînant un dépôt progressif de sédiments sous une profondeur d'eau constante.

Surcote : un dépassement anormal du niveau de la marée haute ou du recul de la marée basse induit par des conditions météorologiques inhabituelles, comme une dépression atmosphérique, une tempête, un ouragan, auxquels leurs effets à ceux des marées astronomiques (la portion induite par la lune et le soleil).

Transit sédimentaire : voir dérive littorale

Valeur actualisée nette (VAN) : différence entre les avantages et les coûts actualisés découlant de la mise en place d'un projet, d'un programme ou d'une politique. L'actualisation est l'opération consistant à ramener les avantages et les coûts survenant à différents moments dans l'horizon d'étude à une année de référence.

Végétalisation : méthode de protection contre l'érosion qui consiste à planter des végétaux adaptés au milieu côtier qui retiennent les sédiments grâce à leurs racines; il peut s'agir de ballots de terre et de matières végétales ou de plantations de plantes et d'arbustes en bordure de la côte, dont les racines doivent être denses et profondes (exemple les rosiers, les framboisiers pour les plages, l'ammophile ou « blé de mer » pour les milieux dunaires).

Zéro géodésique : repère d'altitude basé sur le positionnement en trois dimensions d'un point dans un système géodésique sélectionné, lui-même dépendant d'une projection de la surface terrestre; en Amérique du Nord, les systèmes de référence géodésique les plus utilisés sont WGS84 (*world geodetic system*), notamment utilisé par le système mondial GPS, et le NAD83 (*North American datum*).

Zéro marégraphique : aussi appelé zéro hydrographique ou zéro des cartes, la référence de niveau commune pour les mesures de profondeur en mer (ou plan de référence des sondes) sur une carte marine ainsi que pour les prédictions de marée.



9 RÉFÉRENCES

- Argus inc. (1998). Perspectives d'aménagement et de restauration des marais à spartine au Québec. Rapport présenté à Environnement Canada, Service canadien de la faune, au ministère des Transports du Québec et à Canards Illimités inc., 123 pages et annexe cartographique.
- Balouin, Y. et Belon, R. (2012) – Évaluation des submersions marines lors des tempêtes en Languedoc-Roussillon – Atlas cartographique. Rapport BRGM/RP-61306-FR, 124 pages.
- Bernatchez, P., G. Boucher-Brossard et M. Sigouin-Cantin (2012). Contribution des archives à l'étude des événements météorologiques et géomorphologiques causant des dommages aux côtes du Québec maritime et analyse des tendances, des fréquences et des temps de retour des conditions météo-marines extrêmes. Rimouski, Chaire de recherche en géoscience côtière - LDGIZC-UQAR pour Ministère de la sécurité civile du Québec, 140 pages.
- Bernatchez, P., C. Fraser, S. Friesinger, Y. Jolivet, S. Dugas, S. Drejza et A. Morissette (2008). Sensibilité des côtes et vulnérabilité des communautés du golfe du Saint-Laurent aux impacts des changements climatiques. Rimouski, Chaire de recherche en géoscience côtière - Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières - Université du Québec à Rimouski, 256 pages.
- Boyer-Villemare, U. Savard, J.P., Roy, P. (2016) Évaluation des niveaux d'eau extrêmes causant des dommages de submersion en zone côtière au Québec. Ouranos, Montréal.
- Coles, S. (2001) An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values. Springer, London, 9 pages.

- Chum, M. (2013). Devis technique aboiteaux entre Saint-Denis et Kamouraska. Devis réalisé pour la MRC de Kamouraska.
- Costanza, R., Wilson, M. A., Troy, A., Voinov, A., Liu, S., & D'Agostino, J. (2006). The value of New Jersey's ecosystem services and natural capital. New Jersey Department of Environmental protection.
- Didier, D., P. Bernatchez et A. Lambert (2014). Scénarios de submersion côtière pour la municipalité de Maria dans le cadre d'une analyse économique. Rimouski, Chaire de recherche en géoscience côtière - LDGIZC-UQAR for/pour Ouranos, 33 pages et annexes.
- Efron, B., 1979. Bootstrap Methods: Another Look at the Jackknife. *The Annals of Statistics*, 7(1), p. 1–26.
- GIEC. (2013a). Annex II: Climate System Scenario Tables [Prather, M., G. Flato, P. Friedlingstein, C. Jones, J.-F. Lamarque, H. Liao and P. Rasch (eds.)]. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- GIEC. (2013b). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Horton, B. P., Rahmstorf, S., Engelhart, S. E., et Kemp, A. C. (2014). Expert assessment of sea-level rise by AD 2100 and AD 2300. *Quaternary Science Reviews*, 84, p. 1–6.
- Gourde, G. (1980). Les aboiteaux de Kamouraska étude-cadre technique et économique, Ministère de l'agriculture, 181 pages.
- Jacob, D., Perrie, W., Toulany, B., Saucier, F., Lefavre, D., et Turcotte, V. (2004). Wave Model Validation in the St. Lawrence River Estuary. *Proc. 7th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting*, October 21-25, Banff, Alberta, Canada, 14 pages.
- Koohzare, A., Vaníček, P., et Santos, M. (2008). Pattern of recent vertical crustal movements in Canada. *Journal of Geodynamics*, 45(2-3), p. 133–145.
- Lambert, A., Neumeier, U., Jacob, D., et Savard, J.-P. (2013). Évaluation du modèle WAM opéré par Environnement Canada dans le Golfe du Saint-Laurent; résultats

- intermédiaires pour les années 2010-2011. Institut des sciences de la mer de Rimouski, Université du Québec à Rimouski. Rapport technique remis au Ministère des Transports du Québec. Mai 2013.
- Penning-Rowsell, E., Priest, S., Parker, D., Morris, J., Tunstall, S., Viavattene, C., Owen, D. (2014). Flood and coastal erosion risk management: a manual for economic appraisal. Routledge, 448 pages.
- Potvin, R. (2013). Devis technique de préféabilité réalisé pour la MRC de Kamouraska. Rapport préparé pour le Ministère de l'Agriculture, des pêcheries et de l'alimentation, 17 pages.
- Ropars, Y. (2010). Protection des berges de Longue-Rive: Rapport technique. Rapport préparé pour le Ministère de la Sécurité publique, 55 pages.
- Ropars, Y. (2012). Réhabilitation de la digue des aboîteaux de Saint-André-de-Kamouraska : Rapport technique. Rapport préparé pour le Ministère de la Sécurité publique, 26 pages.
- Roy, P. et Savard, J.-P. (2014). Analyse des extrêmes de vagues à Maria et des niveaux d'eau pour Belledune et Carleton. Montréal, Ouranos, 9 pages.
- Ruest, B., Neumeier, U., Dumont, D., Bismuth, E., Senneville, S., Caveen, J. (2015) Recent wave climate and expected future changes in the seasonally ice-infested waters of the Gulf of St. Lawrence, Canada. Climate Dynamics. DOI 10.1007/s00382-015-2592-3.
- Savard, J.-P., et Roy, P. (2014). Analyse des récurrences conjointes niveaux extrêmes et vagues pour la région de Maria. Étude complémentaire partielle dans le cadre du projet d'Analyse coût avantage de l'adaptation des zones côtières au CC dans le secteur de Maria-Carleton. Montréal, Ouranos, 12 pages.
- Senneville, S. et F.J. Saucier. (2007) Étude de sensibilité de la glace de mer au réchauffement climatique dans le golfe et l'estuaire du Saint-Laurent. Institut des sciences de la mer, Rimouski, rapport préparé pour Ouranos, 28 pages.
- Stockdon, H. F., Thompson, D. M., Plant, N. G., et Long, J. W. (2014). Evaluation of wave runup predictions from numerical and parametric models. Coastal Engineering, 92, p. 1–11.
- White, A (2014) Managing the retreat: Understanding the transition to salt marsh in coastal realignment projects. Thesis submitted to Plymouth University, 243 pages.

Xu, Z. et D. Lefavre (2015). Prévion des niveaux d'eau dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent en fonction des changements climatiques. Rapport interne au Ministère des Transports du Québec, janvier 2015, 97 pages.



ANNEXE A DOMMAGES LIÉS À LA SUBMERSION

1. Dommages aux cultures

Ce type de dommage correspond à la perte directe associée aux épisodes de submersion. Elle correspond à la perte de rendement multiplié par le prix ($\Delta Q * P$), tel que recommandé par Penning-Rowsell et al. (2014).

Pour estimer les quantités de production agricole perdues sur la période d'étude, la distribution des types de cultures sur les terres dans la zone d'étude a été estimée. Pour ce faire, quatre agriculteurs ont été interviewés et ils ont indiqué effectuer une rotation des cultures telle que décrite au tableau A.1.

Tableau A.1 – Rotation des cultures chez les agriculteurs rencontrés

Agriculteur	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5	Année 6
1	Foin	Foin	Foin	Foin	Soya	Blé
2	Foin	Foin	Foin	Foin	Orge	Blé
3	Foin	Foin	Foin	Foin	Blé	Soya
4	Foin	Foin	Foin	Foin	Blé	Blé

En extrapolant les informations recueillies, il a été supposé que les terres étaient cultivées dans les proportions suivantes : Foin : 16/24 / Blé : 5/24 / Soya : 2/24 / Orge : 1/24.

Les dégâts subis par chaque type de culture lors de submersion des terres pour chaque mois de l'année ont ensuite été estimés. Le tableau A.2 présente les pertes de rendements appréhendées en fonction du moment où un événement de tempête se produit au cours de l'année. Ce tableau, tiré de Penning-RowSELL et al. (2014), indique l'ampleur des dégâts que des événements extrêmes de moins d'une semaine pourraient entraîner sur les différents types de cultures pendant l'année. Ainsi, les dégâts associés à des épisodes survenant en février et mars sont bien différents de ceux anticipés en juillet et août.

Dans le cas de la zone d'étude, les dégâts anticipés en février et mars sont considérés nuls, puisque l'on suppose qu'il y a habituellement un couvert de neige pendant ces mois de l'année. De plus, conformément à Penning-RowSELL et al. (2014), les dommages anticipés ont été majorés afin de prendre en considération les dommages liés au sel. Alors que Penning-RowSELL et al. (2014) recommandent un facteur de 10% pour le foin et 20% pour les céréales, ces pourcentages ont été ajustés à la baisse en fonction du ratio de salinisation du Saint-Laurent (en moyenne 26 gr par kilogramme d'eau) par rapport au niveau de salinisation moyen des mers près de l'Angleterre (en moyenne 35 grammes par kilogramme d'eau).

De plus, le tableau A.2 présente la distribution par mois des événements extrêmes historiques. Le seuil utilisé pour définir un événement extrême est le plus petit maxima annuel enregistré sur la période. La période de référence est 1979 à 2011 et les données proviennent de la modélisation de Xu à la station de Pointe-Aux-Originaux, à proximité de la zone d'étude.

En combinant la probabilité d'occurrence d'un événement extrême durant un mois de l'année et les dommages associés durant ce même mois, il est possible de calculer la perte pondérée associée à un événement extrême. Dans le cas présent, lorsqu'un événement extrême touche les terres agricoles, les dommages moyens associés seraient de 8 % pour le foin et de 22 % pour les céréales.

Tableau A.2 – Distribution des événements extrêmes par mois et pertes de rendement associées

Proportion d'événements extrêmes		Mois de l'année											
		Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
		10 %	6 %	11 %	14 %	7 %	6 %	4 %	3 %	1 %	11 %	7 %	20 %
Type de culture	Pertes pondérées par événement	Perte de rendement par événement extrême											
Foin	8 %	0 %	0 %	0 %	11 %	60,5 %	44 %	6,6 %	4,4 %	0 %	0 %	0 %	0 %
Blé	22 %	0 %	0 %	0 %	33 %	66 %	96 %	100 %	100 %	60 %	0 %	0 %	0 %
Soya	22 %	0 %	0 %	0 %	33 %	66 %	96 %	100 %	100 %	60 %	0 %	0 %	0 %
Orge	22 %	0 %	0 %	0 %	33 %	66 %	96 %	100 %	100 %	60 %	0 %	0 %	0 %

Source Penning-Rowse et al. (2014).

La prochaine étape afin de calculer les dommages appréhendés est d'estimer la superficie potentiellement affectée en fonction des événements de tempêtes. À partir des récurrences et des niveaux d'eau extrêmes, dont la méthodologie de calcul est expliquée dans Boyer-Villemare et al. (2016), il est possible d'estimer la superficie affectée en fonction de la récurrence de l'aléa de submersion.

Avant la brèche de l'aboiteau, il a été supposé que toutes les terres dont l'élévation géodésique est inférieure à un événement extrême qui dépasse l'aboiteau subiront des pertes de productivité. Après la brèche de l'aboiteau, toutes les terres dont l'élévation géodésique est inférieure à un événement extrême subiront également des pertes de productivité. Les tableaux A.3 et A.4 présentent respectivement les niveaux d'eau associés aux récurrences des épisodes extrêmes ainsi que le nombre d'hectares touchés selon les différentes récurrences. La hauteur moyenne de l'aboiteau a été estimée à 3,9 m géodésique par balayage par lidar.

Tableau A.3 – Niveaux d'eau extrêmes et récurrences - Rivière-Ouelle

Récurrence années	Niveau d'eau géodésique		
	actuel	2030	2055
2	3,54	3,60	3,74
10	3,76	3,82	3,96
20	3,86	3,92	4,05
30	3,91	3,97	4,11
100	4,07	4,13	4,27

Tableau A.4 – Superficie inondée selon les différentes récurrences

Superficie inondée (hectares)	Avant brèche			Après brèche			
	Récurrence	Niveau d'eau - actuel	Niveau d'eau - 2030	Niveau d'eau - 2055	Niveau d'eau - actuel	Niveau d'eau - 2030	Niveau d'eau - 2055
2		0	0	0	190	198	214
10		0	0	233	217	225	233
20		0	240	257	230	240	257
30		238	248	267	238	248	267
100		262	271	292	262	271	292

Enfin, la dernière étape consiste à établir la productivité des terres et le prix sur les marchés des différents types de cultures dans la zone d'étude. Le tableau A.5 résume les informations recueillies à ce sujet, principalement auprès de la Financière agricole.

Tableau A.5 – Productivité, prix, coût et rentabilité par type de culture

Culture	Proportion de la superficie	Tonnes/ha	Prix Moyen (2012)/tonne	Coût (2012)/tonne Inclus amortissement	Rentabilité/ tonne
Foin	66,67 %	6,04 t	110 \$	110 \$	0 \$
Blé	20,83 %	2,91 t	268 \$	214 \$	54 \$
Soya	8,33 %	2,97 t	420 \$	340 \$	23 \$
Orge	4,17 %	2,70 t	242 \$	219 \$	79 \$

Source: Financière agricole et Guide sur la production de foin de commerce; Conseil québécois des plantes fourragères (2002)

Connaissant la perte pondérée par événement, la probabilité d'occurrence des événements, la productivité des terres agricoles et le prix moyen des cultures, il est possible de trouver la perte moyenne à l'hectare attendu pour une année typique en utilisant la méthode du dommage annuel moyen (DAM) expliquée à l'Annexe B.

Le tableau A.6 présente les résultats obtenus pour l'ensemble des terres de la zone d'étude. Ce tableau indique, entre autres, que seuls les événements de récurrence 30

ans ou plus peuvent créer des dommages dans les conditions actuelles si l'aboteau n'a pas de brèche et ces dommages sont équivalents à 24 342 \$ pour un événement de 30 ans et à 26 795 \$ pour un événement de récurrence 100 ans.

Une fois qu'une brèche est créée, alors tous les événements peuvent générer des dommages variant entre 19 446 \$ et 29 908 \$, dépendant de la récurrence de des événements et de la période d'étude considérées. Les dommages estimés sont supérieurs pour les événements moins fréquents, car les superficies submergées sont alors plus importantes.

Tableau A.6 – Coût de la submersion par période de récurrence

	Période	Récurrence					DAM
		2	10	20	30	100	
Avant brèche	2015-29				24 341 \$	26 795 \$	1 073 \$
	2030-54			24 512 \$	25 337 \$	27 673 \$	1 928 \$
	2055-64		23 854 \$	26 251 \$	27 273 \$	29 908 \$	7 441 \$
Après brèche	2015-29	19 446 \$	22 179 \$	23 560 \$	24 341 \$	26 795 \$	10 738 \$
	2030-54	20 217 \$	22 979 \$	24 512 \$	25 337 \$	27 673 \$	11 142 \$
	2055-64	21 918 \$	23 854 \$	26 251 \$	27 273 \$	29 908 \$	11 825 \$

2. Perte de rentabilité des terres

Selon la théorie économique, un agriculteur a intérêt à cultiver une terre jusqu'à son seuil de rentabilité, c'est-à-dire jusqu'à ce que le bénéfice brut soit égal à ses coûts variables et ses coûts fixes ($P \cdot Q = CF + CV$). Le seuil de rentabilité est atteint lorsque la perte de productivité de la terre est égale à la marge de profit de l'agriculteur ($\Delta Q \cdot P = \pi$). À partir de ce seuil, les épisodes de submersion deviennent trop fréquents pour cultiver la terre. La terre est considérée non cultivable et la perte calculée est égale à la valeur marchande de la terre.

Afin de définir le seuil de rentabilité, le profit à l'hectare moyen a été calculé en se basant sur la distribution des cultures et les coûts de production qui ont été présentés

précédemment. Selon les données obtenues, le profit moyen annuel à l'hectare pour la région est de 55 \$.

Par ailleurs, les dommages moyens de submersion à l'hectare ont été calculés en fonction des zones définies par les superficies de submersion par récurrence. Le tableau A.7 présente les dommages à l'hectare associés à chacune de ces zones. Ainsi, pour la zone 2 ans, les dommages attendus sont de l'ordre de 85 \$ par hectare, alors qu'ils sont de 24 \$ pour la zone 10 ans. Il a donc été supposé qu'une terre qui peut être affectée par un événement de récurrence 2 ans devient non rentable à cultiver puisque la baisse de rendement est supérieure au profit moyen à l'hectare (dommages de 85 \$ > profit moyen de 55 \$). Dans ce cas, la perte totale de la terre a donc été comptabilisée à la valeur du marché (10 000 \$ par hectare).

Tableau A.7 – Coût de la submersion à l'hectare par zone

Zones submergées	Coût / ha
Récurrence 2 ans	85 \$
Récurrence 10 ans	24 \$
Récurrence 20 ans	11 \$
Récurrence 30 ans	5 \$
Récurrence 100 ans	1 \$

Il est important de noter que la valeur marchande de la terre est été considérée comme une approximation des revenus futurs de la terre, en valeur actuelle, comme le suppose la théorie économique. Ceci implique qu'aucune perte n'a été comptabilisée dû au fait que l'agriculteur aura à acheter le fourrage qu'il produisait auparavant une fois que sa terre devient non cultivable. De plus, afin de simplifier l'approche, aucune dévaluation de la terre n'a été comptabilisée entre le moment où la terre voit sa productivité diminuer et celui où le coût lié à la submersion atteint le seuil de rentabilité.



ANNEXE B

CALCUL DU DOMMAGE ANNUEL MOYEN

Dans le cadre de cette analyse économique, plusieurs calculs et projections ont été réalisés afin de pouvoir déterminer les dommages potentiels liés à la submersion. Cette annexe présente plus l'approche utilisée pour calculer le dommage annuel moyen (DAM).

La relation entre les dommages de submersion et la probabilité d'occurrence est illustrée par la courbe dommages-probabilités (figure B.1) Cette figure conceptuelle montre simplement que ce sont les événements avec une faible probabilité d'occurrence qui vont générer les dommages les plus élevés, tandis que les événements ayant une grande probabilité d'occurrence vont produire peu ou pas de dommages.

Le dommage annuel moyen (« DAM ») est calculé à partir de cette courbe de dommages-probabilités. Il correspond à l'aire sous la courbe et représente la valeur espérée des dommages annuels dus à la submersion (figure B.2). Il représente simplement la moyenne des dommages potentiels en fonction de toutes les possibilités de niveaux d'eau extrêmes possibles.

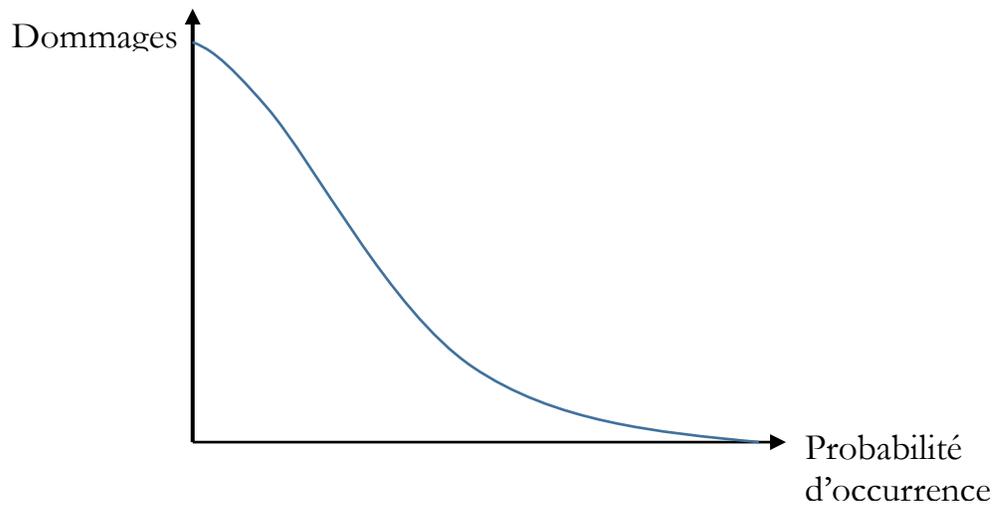


Figure B.1 – Relation entre dommages et probabilités d'occurrence

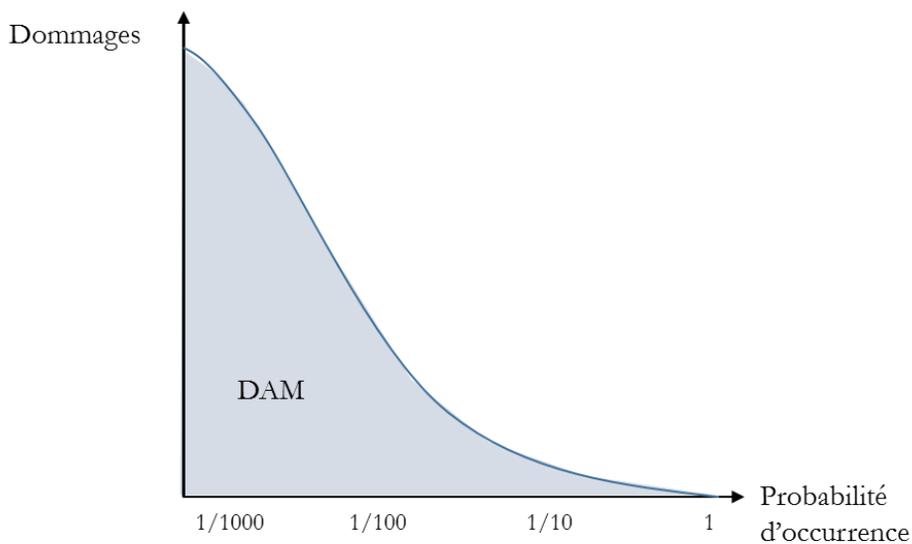


Figure B.2 – Dommage annuel moyen dû à la submersion

Plus formellement, le DAM est égal à l'intégrale de la fonction de dommages par rapport à la probabilité d'occurrence de l'événement :

$$DAM = \int D(P) dP$$

où

DAM = Dommage annuel moyen

D = valeur des dommages

P = probabilité d'occurrence de l'évènement

Comme la forme continue de la fonction de dommages n'est pas connue, le DAM est approximé par le calcul numérique de l'aire sous la courbe à l'aide de la méthode d'approximation de Riemann. Concrètement, le DAM a été calculé en effectuant la somme de la multiplication du dommage médian entre deux classes d'évènements et de la variation de la probabilité d'occurrence entre ces deux mêmes évènements :

$$\begin{aligned} DAM &= \int D(P) dP \cong \sum_{i=1}^N \frac{D(P_i) + D(P_{i+1})}{2} \times (P_i - P_{i+1}) \\ &= \frac{D(P_1) + D(P_2)}{2} \times (P_1 - P_2) + \dots + \frac{D(P_{N-1}) + D(P_N)}{2} \times (P_{N-1} - P_N) \end{aligned}$$

où N = Nombre de classes d'évènements étudiés

Dans le cadre de cette étude, les classes d'évènements utilisées pour calculer le DAM sont les récurrences 2, 10, 20, 30 et 100.



ANNEXE C VENTILATION ANNUELLE DES COÛTS PAR OPTION

Option de non-intervention

Année	Dommages aux cultures	Coûts des mesures	Impacts économiques	Impacts environnementaux	Somme des coûts	Gains environnementaux
2015	(1 073 \$)	0 \$	0 \$	(204 \$)	(1 276 \$)	0 \$
2016	(1 031 \$)	0 \$	0 \$	(388 \$)	(1 420 \$)	0 \$
2017	(992 \$)	0 \$	0 \$	(557 \$)	(1 549 \$)	0 \$
2018	(954 \$)	0 \$	0 \$	(711 \$)	(1 664 \$)	0 \$
2019	(917 \$)	0 \$	0 \$	(851 \$)	(1 768 \$)	0 \$
2020	(882 \$)	0 \$	0 \$	(979 \$)	(1 860 \$)	0 \$
2021	(848 \$)	0 \$	0 \$	(1 095 \$)	(1 942 \$)	0 \$
2022	(815 \$)	0 \$	0 \$	(1 200 \$)	(2 015 \$)	0 \$
2023	(784 \$)	0 \$	0 \$	(1 296 \$)	(2 079 \$)	0 \$
2024	(754 \$)	0 \$	0 \$	(1 382 \$)	(2 135 \$)	0 \$
2025	(725 \$)	0 \$	0 \$	(1 459 \$)	(2 184 \$)	0 \$
2026	(697 \$)	0 \$	0 \$	(1 528 \$)	(2 225 \$)	0 \$
2027	(670 \$)	0 \$	0 \$	(1 590 \$)	(2 260 \$)	0 \$
2028	(644 \$)	0 \$	0 \$	(1 644 \$)	(2 289 \$)	0 \$
2029	(619 \$)	0 \$	0 \$	(1 692 \$)	(2 312 \$)	0 \$
2030	(1 071 \$)	0 \$	0 \$	(1 734 \$)	(2 805 \$)	0 \$
2031	(1 030 \$)	0 \$	0 \$	(1 770 \$)	(2 799 \$)	0 \$
2032	(990 \$)	0 \$	0 \$	(1 800 \$)	(2 790 \$)	0 \$
2033	(952 \$)	0 \$	0 \$	(1 826 \$)	(2 778 \$)	0 \$
2034	(915 \$)	0 \$	0 \$	(1 847 \$)	(2 762 \$)	0 \$
2035	(472 \$)	0 \$	(902 168 \$)	(1 864 \$)	(904 503 \$)	0 \$
2036	(454 \$)	0 \$	0 \$	(1 876 \$)	(2 330 \$)	1 856 \$
2037	(436 \$)	0 \$	0 \$	(1 885 \$)	(2 321 \$)	3 570 \$
2038	(419 \$)	0 \$	0 \$	(1 891 \$)	(2 310 \$)	5 149 \$
2039	(403 \$)	0 \$	0 \$	(1 893 \$)	(2 296 \$)	6 601 \$
2040	(388 \$)	0 \$	0 \$	(1 892 \$)	(2 280 \$)	7 934 \$
2041	(373 \$)	0 \$	0 \$	(1 889 \$)	(2 262 \$)	9 154 \$
2042	(359 \$)	0 \$	0 \$	(1 883 \$)	(2 241 \$)	10 269 \$
2043	(345 \$)	0 \$	0 \$	(1 875 \$)	(2 219 \$)	11 285 \$
2044	(331 \$)	0 \$	0 \$	(1 864 \$)	(2 196 \$)	12 207 \$
2045	(319 \$)	0 \$	0 \$	(1 852 \$)	(2 171 \$)	13 042 \$
2046	(306 \$)	0 \$	0 \$	(1 838 \$)	(2 144 \$)	13 794 \$
2047	(295 \$)	0 \$	0 \$	(1 822 \$)	(2 117 \$)	14 470 \$
2048	(283 \$)	0 \$	0 \$	(1 805 \$)	(2 088 \$)	15 072 \$
2049	(272 \$)	0 \$	0 \$	(1 735 \$)	(2 008 \$)	15 608 \$
2050	(262 \$)	0 \$	0 \$	(1 716 \$)	(1 978 \$)	16 079 \$
2051	(252 \$)	0 \$	0 \$	(1 693 \$)	(1 945 \$)	16 492 \$
2052	(242 \$)	0 \$	0 \$	(1 668 \$)	(1 910 \$)	16 848 \$
2053	(233 \$)	0 \$	0 \$	(1 641 \$)	(1 874 \$)	17 153 \$
2054	(224 \$)	0 \$	0 \$	(1 612 \$)	(1 836 \$)	17 410 \$
2055	(180 \$)	0 \$	(34 649 \$)	(1 581 \$)	(36 411 \$)	19 104 \$
2056	(173 \$)	0 \$	0 \$	(1 548 \$)	(1 721 \$)	19 288 \$
2057	(167 \$)	0 \$	0 \$	(1 513 \$)	(1 680 \$)	19 429 \$
2058	(160 \$)	0 \$	0 \$	(1 478 \$)	(1 638 \$)	19 531 \$
2059	(154 \$)	0 \$	0 \$	(1 443 \$)	(1 597 \$)	19 596 \$
2060	(148 \$)	0 \$	0 \$	(1 408 \$)	(1 557 \$)	19 628 \$
2061	(143 \$)	0 \$	0 \$	(1 374 \$)	(1 516 \$)	19 628 \$
2062	(137 \$)	0 \$	0 \$	(1 339 \$)	(1 476 \$)	19 599 \$
2063	(132 \$)	0 \$	0 \$	(1 305 \$)	(1 436 \$)	19 543 \$
2064	(127 \$)	0 \$	0 \$	(1 270 \$)	(1 397 \$)	19 462 \$
TOTAL	(25 550 \$)	0 \$	(936 817 \$)	(76 006 \$)	(1 038 373 \$)	418 802 \$

Option d'enrochement

Année	Dommages aux cultures	Coûts des mesures	Impacts économiques	Impacts environnementaux	Somme des coûts	Gains environnementaux
2015	(1 073 \$)	0 \$	0 \$	(204 \$)	(1 276 \$)	0 \$
2016	(1 031 \$)	0 \$	0 \$	(388 \$)	(1 420 \$)	0 \$
2017	(992 \$)	0 \$	0 \$	(557 \$)	(1 549 \$)	0 \$
2018	(954 \$)	0 \$	0 \$	(711 \$)	(1 664 \$)	0 \$
2019	(917 \$)	0 \$	0 \$	(851 \$)	(1 768 \$)	0 \$
2020	(882 \$)	0 \$	0 \$	(979 \$)	(1 860 \$)	0 \$
2021	(848 \$)	0 \$	0 \$	(1 095 \$)	(1 942 \$)	0 \$
2022	(815 \$)	0 \$	0 \$	(1 200 \$)	(2 015 \$)	0 \$
2023	(784 \$)	0 \$	0 \$	(1 296 \$)	(2 079 \$)	0 \$
2024	(754 \$)	0 \$	0 \$	(1 382 \$)	(2 135 \$)	0 \$
2025	(725 \$)	0 \$	0 \$	(1 459 \$)	(2 184 \$)	0 \$
2026	(697 \$)	0 \$	0 \$	(1 528 \$)	(2 225 \$)	0 \$
2027	(670 \$)	0 \$	0 \$	(1 590 \$)	(2 260 \$)	0 \$
2028	(644 \$)	0 \$	0 \$	(1 644 \$)	(2 289 \$)	0 \$
2029	(619 \$)	0 \$	0 \$	(1 692 \$)	(2 312 \$)	0 \$
2030	(1 071 \$)	(173 771 \$)	0 \$	(1 734 \$)	(176 576 \$)	0 \$
2031	(1 030 \$)	(55 696 \$)	0 \$	(1 770 \$)	(58 495 \$)	0 \$
2032	0 \$	(1 071 077 \$)	(29 227 \$)	(1 800 \$)	(1 102 104 \$)	0 \$
2033	0 \$	0 \$	0 \$	(1 826 \$)	(1 826 \$)	0 \$
2034	0 \$	0 \$	0 \$	(1 847 \$)	(1 847 \$)	0 \$
2035	0 \$	0 \$	0 \$	(1 864 \$)	(1 864 \$)	0 \$
2036	0 \$	0 \$	0 \$	(1 876 \$)	(1 876 \$)	0 \$
2037	0 \$	0 \$	0 \$	(1 885 \$)	(1 885 \$)	0 \$
2038	0 \$	0 \$	0 \$	(1 891 \$)	(1 891 \$)	0 \$
2039	0 \$	0 \$	0 \$	(1 893 \$)	(1 893 \$)	0 \$
2040	0 \$	0 \$	0 \$	(1 892 \$)	(1 892 \$)	0 \$
2041	0 \$	0 \$	0 \$	(1 889 \$)	(1 889 \$)	0 \$
2042	0 \$	0 \$	0 \$	(1 883 \$)	(1 883 \$)	0 \$
2043	0 \$	0 \$	0 \$	(1 875 \$)	(1 875 \$)	0 \$
2044	0 \$	0 \$	0 \$	(1 864 \$)	(1 864 \$)	0 \$
2045	0 \$	0 \$	0 \$	(1 852 \$)	(1 852 \$)	0 \$
2046	0 \$	0 \$	0 \$	(1 838 \$)	(1 838 \$)	0 \$
2047	0 \$	0 \$	0 \$	(1 822 \$)	(1 822 \$)	0 \$
2048	0 \$	0 \$	0 \$	(1 805 \$)	(1 805 \$)	0 \$
2049	0 \$	0 \$	0 \$	(1 735 \$)	(1 735 \$)	0 \$
2050	0 \$	0 \$	0 \$	(1 716 \$)	(1 716 \$)	0 \$
2051	0 \$	0 \$	0 \$	(1 693 \$)	(1 693 \$)	0 \$
2052	0 \$	0 \$	0 \$	(1 668 \$)	(1 668 \$)	0 \$
2053	0 \$	0 \$	0 \$	(1 641 \$)	(1 641 \$)	0 \$
2054	0 \$	0 \$	0 \$	(1 612 \$)	(1 612 \$)	0 \$
2055	0 \$	0 \$	0 \$	(1 581 \$)	(1 581 \$)	0 \$
2056	0 \$	0 \$	0 \$	(1 548 \$)	(1 548 \$)	0 \$
2057	0 \$	0 \$	0 \$	(1 513 \$)	(1 513 \$)	0 \$
2058	0 \$	0 \$	0 \$	(1 478 \$)	(1 478 \$)	0 \$
2059	0 \$	0 \$	0 \$	(1 443 \$)	(1 443 \$)	0 \$
2060	0 \$	0 \$	0 \$	(1 408 \$)	(1 408 \$)	0 \$
2061	0 \$	0 \$	0 \$	(1 374 \$)	(1 374 \$)	0 \$
2062	0 \$	0 \$	0 \$	(1 339 \$)	(1 339 \$)	0 \$
2063	0 \$	0 \$	0 \$	(1 305 \$)	(1 305 \$)	0 \$
2064	0 \$	0 \$	0 \$	(1 270 \$)	(1 270 \$)	0 \$
TOTAL	(14 503 \$)	(1 300 544 \$)	(29 227 \$)	(76 006 \$)	(1 420 280 \$)	0 \$

Option de dépoldérisation

Année	Dommages aux cultures	Coûts des mesures	Impacts économiques	Impacts environnementaux	Somme des coûts	Gains environnementaux
2015	(1 073 \$)	0 \$	0 \$	(204 \$)	(1 276 \$)	0 \$
2016	(1 031 \$)	(29 059 \$)	0 \$	(388 \$)	(30 479 \$)	0 \$
2017	(992 \$)	(9 314 \$)	0 \$	(557 \$)	(10 862 \$)	0 \$
2018	0 \$	(179 111 \$)	(1 777 993 \$)	(711 \$)	(1 957 814 \$)	0 \$
2019	0 \$	0 \$	0 \$	(851 \$)	(851 \$)	3 658 \$
2020	0 \$	0 \$	0 \$	(979 \$)	(979 \$)	7 035 \$
2021	0 \$	0 \$	0 \$	(1 095 \$)	(1 095 \$)	10 147 \$
2022	0 \$	0 \$	0 \$	(1 200 \$)	(1 200 \$)	13 009 \$
2023	0 \$	0 \$	0 \$	(1 296 \$)	(1 296 \$)	15 636 \$
2024	0 \$	0 \$	0 \$	(1 382 \$)	(1 382 \$)	18 041 \$
2025	0 \$	0 \$	0 \$	(1 459 \$)	(1 459 \$)	20 239 \$
2026	0 \$	0 \$	0 \$	(1 528 \$)	(1 528 \$)	22 240 \$
2027	0 \$	0 \$	0 \$	(1 590 \$)	(1 590 \$)	24 058 \$
2028	0 \$	0 \$	0 \$	(1 644 \$)	(1 644 \$)	25 703 \$
2029	0 \$	0 \$	0 \$	(1 692 \$)	(1 692 \$)	27 186 \$
2030	0 \$	0 \$	0 \$	(1 734 \$)	(1 734 \$)	28 517 \$
2031	0 \$	0 \$	0 \$	(1 770 \$)	(1 770 \$)	29 705 \$
2032	0 \$	0 \$	0 \$	(1 800 \$)	(1 800 \$)	30 759 \$
2033	0 \$	0 \$	0 \$	(1 826 \$)	(1 826 \$)	31 689 \$
2034	0 \$	0 \$	0 \$	(1 847 \$)	(1 847 \$)	32 502 \$
2035	0 \$	0 \$	0 \$	(1 864 \$)	(1 864 \$)	33 205 \$
2036	0 \$	0 \$	0 \$	(1 876 \$)	(1 876 \$)	33 806 \$
2037	0 \$	0 \$	0 \$	(1 885 \$)	(1 885 \$)	34 311 \$
2038	0 \$	0 \$	0 \$	(1 891 \$)	(1 891 \$)	34 728 \$
2039	0 \$	0 \$	0 \$	(1 893 \$)	(1 893 \$)	35 062 \$
2040	0 \$	0 \$	0 \$	(1 892 \$)	(1 892 \$)	35 319 \$
2041	0 \$	0 \$	0 \$	(1 889 \$)	(1 889 \$)	35 504 \$
2042	0 \$	0 \$	0 \$	(1 883 \$)	(1 883 \$)	35 623 \$
2043	0 \$	0 \$	0 \$	(1 875 \$)	(1 875 \$)	35 680 \$
2044	0 \$	0 \$	0 \$	(1 864 \$)	(1 864 \$)	35 680 \$
2045	0 \$	0 \$	0 \$	(1 852 \$)	(1 852 \$)	35 627 \$
2046	0 \$	0 \$	0 \$	(1 838 \$)	(1 838 \$)	35 526 \$
2047	0 \$	0 \$	0 \$	(1 822 \$)	(1 822 \$)	35 379 \$
2048	0 \$	0 \$	0 \$	(1 805 \$)	(1 805 \$)	35 192 \$
2049	0 \$	0 \$	0 \$	(1 735 \$)	(1 735 \$)	34 966 \$
2050	0 \$	0 \$	0 \$	(1 716 \$)	(1 716 \$)	34 706 \$
2051	0 \$	0 \$	0 \$	(1 693 \$)	(1 693 \$)	34 414 \$
2052	0 \$	0 \$	0 \$	(1 668 \$)	(1 668 \$)	34 093 \$
2053	0 \$	0 \$	0 \$	(1 641 \$)	(1 641 \$)	33 746 \$
2054	0 \$	0 \$	0 \$	(1 612 \$)	(1 612 \$)	33 375 \$
2055	0 \$	0 \$	0 \$	(1 581 \$)	(1 581 \$)	32 983 \$
2056	0 \$	0 \$	0 \$	(1 548 \$)	(1 548 \$)	32 571 \$
2057	0 \$	0 \$	0 \$	(1 513 \$)	(1 513 \$)	32 143 \$
2058	0 \$	0 \$	0 \$	(1 478 \$)	(1 478 \$)	31 699 \$
2059	0 \$	0 \$	0 \$	(1 443 \$)	(1 443 \$)	30 480 \$
2060	0 \$	0 \$	0 \$	(1 408 \$)	(1 408 \$)	29 307 \$
2061	0 \$	0 \$	0 \$	(1 374 \$)	(1 374 \$)	28 180 \$
2062	0 \$	0 \$	0 \$	(1 339 \$)	(1 339 \$)	27 096 \$
2063	0 \$	0 \$	0 \$	(1 305 \$)	(1 305 \$)	26 054 \$
2064	0 \$	0 \$	0 \$	(1 270 \$)	(1 270 \$)	25 052 \$
TOTAL	(3 096 \$)	(217 483 \$)	(1 777 993 \$)	(76 006 \$)	(2 074 578 \$)	1 331 631 \$

Option d'épi en T

Année	Dommages aux cultures	Coûts des mesures	Impacts économiques	Impacts environnementaux	Somme des coûts	Gains environnementaux
2015	(1 073 \$)	0 \$	0 \$	(94 \$)	(1 167 \$)	0 \$
2016	(1 031 \$)	0 \$	0 \$	(180 \$)	(1 211 \$)	0 \$
2017	(992 \$)	0 \$	0 \$	(258 \$)	(1 250 \$)	0 \$
2018	(954 \$)	0 \$	0 \$	(330 \$)	(1 283 \$)	0 \$
2019	(917 \$)	0 \$	0 \$	(395 \$)	(1 312 \$)	0 \$
2020	(882 \$)	0 \$	0 \$	(455 \$)	(1 337 \$)	0 \$
2021	(848 \$)	0 \$	0 \$	(509 \$)	(1 357 \$)	0 \$
2022	(815 \$)	0 \$	0 \$	(558 \$)	(1 374 \$)	0 \$
2023	(784 \$)	0 \$	0 \$	(603 \$)	(1 387 \$)	0 \$
2024	(754 \$)	0 \$	0 \$	(643 \$)	(1 397 \$)	0 \$
2025	(725 \$)	0 \$	0 \$	(679 \$)	(1 404 \$)	0 \$
2026	(697 \$)	0 \$	0 \$	(712 \$)	(1 408 \$)	0 \$
2027	(670 \$)	0 \$	0 \$	(740 \$)	(1 410 \$)	0 \$
2028	(644 \$)	0 \$	0 \$	(766 \$)	(1 410 \$)	0 \$
2029	(619 \$)	0 \$	0 \$	(788 \$)	(1 407 \$)	0 \$
2030	(1 071 \$)	(491 585 \$)	0 \$	(807 \$)	(493 464 \$)	0 \$
2031	(1 030 \$)	(157 559 \$)	0 \$	(824 \$)	(159 413 \$)	0 \$
2032	0 \$	(3 029 989 \$)	(29 227 \$)	(838 \$)	(3 060 054 \$)	0 \$
2033	0 \$	0 \$	0 \$	(850 \$)	(850 \$)	0 \$
2034	0 \$	0 \$	0 \$	(860 \$)	(860 \$)	0 \$
2035	0 \$	0 \$	0 \$	(868 \$)	(868 \$)	0 \$
2036	0 \$	0 \$	0 \$	(874 \$)	(874 \$)	0 \$
2037	0 \$	0 \$	0 \$	(878 \$)	(878 \$)	0 \$
2038	0 \$	0 \$	0 \$	(880 \$)	(880 \$)	0 \$
2039	0 \$	0 \$	0 \$	(881 \$)	(881 \$)	0 \$
2040	0 \$	0 \$	0 \$	(881 \$)	(881 \$)	0 \$
2041	0 \$	0 \$	0 \$	(879 \$)	(879 \$)	0 \$
2042	0 \$	0 \$	0 \$	(877 \$)	(877 \$)	0 \$
2043	0 \$	0 \$	0 \$	(873 \$)	(873 \$)	0 \$
2044	0 \$	0 \$	0 \$	(868 \$)	(868 \$)	0 \$
2045	0 \$	0 \$	0 \$	(862 \$)	(862 \$)	0 \$
2046	0 \$	0 \$	0 \$	(855 \$)	(855 \$)	0 \$
2047	0 \$	0 \$	0 \$	(848 \$)	(848 \$)	0 \$
2048	0 \$	0 \$	0 \$	(840 \$)	(840 \$)	0 \$
2049	0 \$	0 \$	0 \$	(808 \$)	(808 \$)	0 \$
2050	0 \$	0 \$	0 \$	(799 \$)	(799 \$)	0 \$
2051	0 \$	0 \$	0 \$	(791 \$)	(791 \$)	0 \$
2052	0 \$	0 \$	0 \$	(781 \$)	(781 \$)	0 \$
2053	0 \$	0 \$	0 \$	(771 \$)	(771 \$)	0 \$
2054	0 \$	0 \$	0 \$	(761 \$)	(761 \$)	0 \$
2055	0 \$	0 \$	0 \$	(750 \$)	(750 \$)	0 \$
2056	0 \$	0 \$	0 \$	(739 \$)	(739 \$)	0 \$
2057	0 \$	0 \$	0 \$	(728 \$)	(728 \$)	0 \$
2058	0 \$	0 \$	0 \$	(717 \$)	(717 \$)	0 \$
2059	0 \$	0 \$	0 \$	(705 \$)	(705 \$)	0 \$
2060	0 \$	0 \$	0 \$	(693 \$)	(693 \$)	0 \$
2061	0 \$	0 \$	0 \$	(681 \$)	(681 \$)	0 \$
2062	0 \$	0 \$	0 \$	(669 \$)	(669 \$)	0 \$
2063	0 \$	0 \$	0 \$	(657 \$)	(657 \$)	0 \$
2064	0 \$	0 \$	0 \$	(645 \$)	(645 \$)	0 \$
TOTAL	(14 503 \$)	(3 679 134 \$)	(29 227 \$)	(35 753 \$)	(3 758 617 \$)	0 \$

Option de recul partiel

Année	Dommages aux cultures	Coûts des mesures	Impacts économiques	Impacts environnementaux	Somme des coûts	Gains environnementaux
2015	(1 073 \$)	0 \$	0 \$	(204 \$)	(1 276 \$)	0 \$
2016	(1 031 \$)	0 \$	0 \$	(388 \$)	(1 420 \$)	0 \$
2017	(992 \$)	0 \$	0 \$	(557 \$)	(1 549 \$)	0 \$
2018	(954 \$)	0 \$	0 \$	(711 \$)	(1 664 \$)	0 \$
2019	(917 \$)	0 \$	0 \$	(851 \$)	(1 768 \$)	0 \$
2020	(882 \$)	0 \$	0 \$	(979 \$)	(1 860 \$)	0 \$
2021	(848 \$)	0 \$	0 \$	(1 095 \$)	(1 942 \$)	0 \$
2022	(815 \$)	0 \$	0 \$	(1 200 \$)	(2 015 \$)	0 \$
2023	(784 \$)	0 \$	0 \$	(1 296 \$)	(2 079 \$)	0 \$
2024	(754 \$)	0 \$	0 \$	(1 382 \$)	(2 135 \$)	0 \$
2025	(725 \$)	0 \$	0 \$	(1 459 \$)	(2 184 \$)	0 \$
2026	(697 \$)	0 \$	0 \$	(1 528 \$)	(2 225 \$)	0 \$
2027	(670 \$)	0 \$	0 \$	(1 590 \$)	(2 260 \$)	0 \$
2028	(644 \$)	0 \$	0 \$	(1 644 \$)	(2 289 \$)	0 \$
2029	(619 \$)	0 \$	0 \$	(1 692 \$)	(2 312 \$)	0 \$
2030	(1 071 \$)	(36 908 \$)	0 \$	(1 734 \$)	(39 712 \$)	0 \$
2031	(1 030 \$)	(11 829 \$)	0 \$	(1 770 \$)	(14 629 \$)	0 \$
2032	0 \$	(227 488 \$)	(100 213 \$)	(1 800 \$)	(329 501 \$)	0 \$
2033	0 \$	0 \$	0 \$	(1 826 \$)	(1 826 \$)	149 \$
2034	0 \$	0 \$	0 \$	(1 847 \$)	(1 847 \$)	287 \$
2035	0 \$	0 \$	0 \$	(1 864 \$)	(1 864 \$)	413 \$
2036	0 \$	0 \$	0 \$	(1 876 \$)	(1 876 \$)	530 \$
2037	0 \$	0 \$	0 \$	(1 885 \$)	(1 885 \$)	637 \$
2038	0 \$	0 \$	0 \$	(1 891 \$)	(1 891 \$)	735 \$
2039	0 \$	0 \$	0 \$	(1 893 \$)	(1 893 \$)	825 \$
2040	0 \$	0 \$	0 \$	(1 892 \$)	(1 892 \$)	906 \$
2041	0 \$	0 \$	0 \$	(1 889 \$)	(1 889 \$)	980 \$
2042	0 \$	0 \$	0 \$	(1 883 \$)	(1 883 \$)	1 047 \$
2043	0 \$	0 \$	0 \$	(1 875 \$)	(1 875 \$)	1 108 \$
2044	0 \$	0 \$	0 \$	(1 864 \$)	(1 864 \$)	1 162 \$
2045	0 \$	0 \$	0 \$	(1 852 \$)	(1 852 \$)	1 210 \$
2046	0 \$	0 \$	0 \$	(1 838 \$)	(1 838 \$)	1 253 \$
2047	0 \$	0 \$	0 \$	(1 822 \$)	(1 822 \$)	1 291 \$
2048	0 \$	0 \$	0 \$	(1 805 \$)	(1 805 \$)	1 324 \$
2049	0 \$	0 \$	0 \$	(1 735 \$)	(1 735 \$)	1 353 \$
2050	0 \$	0 \$	0 \$	(1 716 \$)	(1 716 \$)	1 377 \$
2051	0 \$	0 \$	0 \$	(1 693 \$)	(1 693 \$)	1 398 \$
2052	0 \$	0 \$	0 \$	(1 668 \$)	(1 668 \$)	1 415 \$
2053	0 \$	0 \$	0 \$	(1 641 \$)	(1 641 \$)	1 428 \$
2054	0 \$	0 \$	0 \$	(1 612 \$)	(1 612 \$)	1 439 \$
2055	0 \$	0 \$	0 \$	(1 581 \$)	(1 581 \$)	1 446 \$
2056	0 \$	0 \$	0 \$	(1 548 \$)	(1 548 \$)	1 451 \$
2057	0 \$	0 \$	0 \$	(1 513 \$)	(1 513 \$)	1 454 \$
2058	0 \$	0 \$	0 \$	(1 478 \$)	(1 478 \$)	1 454 \$
2059	0 \$	0 \$	0 \$	(1 443 \$)	(1 443 \$)	1 451 \$
2060	0 \$	0 \$	0 \$	(1 408 \$)	(1 408 \$)	1 447 \$
2061	0 \$	0 \$	0 \$	(1 374 \$)	(1 374 \$)	1 441 \$
2062	0 \$	0 \$	0 \$	(1 339 \$)	(1 339 \$)	1 434 \$
2063	0 \$	0 \$	0 \$	(1 305 \$)	(1 305 \$)	1 425 \$
2064	0 \$	0 \$	0 \$	(1 270 \$)	(1 270 \$)	1 414 \$
TOTAL	(14 503 \$)	(276 225 \$)	(100 213 \$)	(76 006 \$)	(466 948 \$)	36 685 \$