DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL D'ÉVALUATION DE MESURES D'ADAPTATION POUR PROTÉGER LES INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT DES ALÉAS CÔTIERS DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Projet CC28.1

Philippe Sauvé

Pascal Bernatchez

Mathias Glaus

Chaire de recherche en géoscience côtière

Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, UQAR

Réalisé pour le compte du ministère des Transports et de la Mobilité durable

Septembre 2023

AVERTISSEMENT

La présente étude a été réalisée à la demande du ministère des Transports et de la Mobilité durable (MTMD) et a été financé par le Ministère.

Le MTMD n'est pas responsable de l'exactitude, de l'actualité et de la fiabilité du contenu de ce rapport. Les points de vue exprimés dans ce rapport émanent des auteurs et ne coïncident pas nécessairement avec ceux du ministère des Transports et de la Mobilité durable.

CHERCHEUR RESPONSABLE DU PROJET

Pascal Bernatchez, Ph. D.

Université du Québec à Rimouski
Département de biologie, chimie et géographie
Chaire de recherche en géoscience côtière
Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières (LDGIZC)
300, allée des Ursulines, case postale 3300
Rimouski (Québec) G5L 3A1
Téléphone : (418) 723-1986, poste 1257 (bureau) ou poste 1206 (laboratoire)
Télécopieur : (418) 724-1847
Courriel : pascal_bernatchez@uqar.ca
Site web : ldgizc.uqar.ca/Web/

RECHERCHE ET RÉDACTION

Philippe Sauvé, ing., Ph. D., professionnel de recherche, LDGIZC, UQAR
Revue de littérature, développement de l'outil, analyse, rédaction

Mathias Glaus, ing., Ph. D., professeur, STEPPE, ÉTS
Analyse, révision

Mathieu Cusson, Ph. D., professeur, Laboratoire d'écologie marine, UQAC
Analyse

COMITÉ DE SUIVI AU MTMD

Brann Blanchette-Émond, conseiller, Direction de la gestion des actifs routiers et de la programmation

Line Choinière, biologiste, M.Sc., Direction Bas-Saint-Laurent–Gaspésie–Îles-de-la-Madeleine

Pierre Gaudreau, ingénieur, Direction de l’hydraulique

Mathieu Leclerc, ingénieur, Direction Bas-Saint-Laurent–Gaspésie–Îles-de-la-Madeleine

Sophie Moisset, biologiste, Ph. D., Direction Bas-Saint-Laurent–Gaspésie–Îles-de-la-Madeleine

Corina Nicorici, conseillère à la recherche, Direction de la coordination de la recherche et de l’innovation

Luc Vescovi, conseiller, Direction du développement durable et des mobilités innovantes

Benoît Vigneault, géomorphologue, Direction de l’Environnement

REMERCIEMENT

Nous tenons à remercier le personnel du MTMD pour leur collaboration et les échanges de documents. Ce projet a bénéficié d'un soutien financier du gouvernement du Québec et répond aux objectifs du Plan pour une économie verte 2030.

SOMMAIRE

Les caractéristiques des environnements côtiers varient à l'échelle du Québec maritime. Plusieurs mesures d'adaptation aux aléas côtiers (MAAC) existent pour résoudre une problématique d'érosion ou de submersion dans ces environnements, dont les ouvrages de protection côtière (OPC) ainsi que la relocalisation et le rehaussement des infrastructures routières. Les effets des OPC sur le système socioécologique côtier (SSEC) sont complexes en raison des nombreuses rétroactions entre les éléments hydrodynamiques et géomorphologiques, qui ont aussi des répercussions sur les aspects écologiques et socio-économiques des communautés côtières. Le choix d'une MAAC dépend des caractéristiques socioécologiques propres à un secteur de côte, ainsi que des effets souhaités. L'objectif principal du projet de recherche est de développer un outil d'aide à la prise de décision élaboré selon une structuration cohérente de l'information, permettant de prendre en considération les données tant géomorphologiques et hydrodynamiques, qu'écologiques et socio-économiques nécessaires à l'identification des meilleures solutions en matière de MAAC au regard des conditions spécifiques d'un SSEC et des besoins exprimés par les acteurs du territoire (professionnels et gestionnaires). Pour ce faire, plusieurs méthodes ont été utilisées :

1. le développement d'un algorithme d'évaluation;
2. l'application d'une méthode d'analyse multicritère et d'un processus participatif.

Premièrement, un algorithme a été conçu pour évaluer et hiérarchiser des OPC en fonction de leurs effets sur les différents types d'environnements côtiers. Tirés de 411 études de cas scientifiques, un total de 1709 énoncés relatifs aux effets des OPC tels qu'observés par les auteurs sur les caractéristiques environnementales de secteurs d'étude (type de côte et de substrat, marnage et climat de vagues) ont été intégrés dans une base de données, catégorisés, puis pondérés selon une échelle qualitative (-5 à 5). L'utilisateur sélectionne des OPC ainsi que des caractéristiques environnementales. Puis, l'information est traitée par l'algorithme en établissant une correspondance entre les caractéristiques environnementales sélectionnées et celles enregistrées dans la base de données, permettant d'évaluer les OPC en identifiant, compilant et classant les effets observés dans des contextes environnementaux similaires. Le résultat est un outil qui permet de traiter, de structurer et de concrétiser les connaissances scientifiques en lien avec les effets des OPC sur le système côtier.

Deuxièmement, la méthode d'analyse multicritère utilisée est divisée en trois étapes. (i) Les critères de sélection ont été identifiés pour répondre aux processus des projets routiers du ministère des Transports et de la Mobilité

durable (MTMD). Puis, ils ont été pondérés par les professionnels et gestionnaires du MTMD et de différentes organisations du territoire côtier au moyen d'un questionnaire en ligne. (ii) Les MAAC sont notées au regard de chaque critère et des conditions socioécologiques locales. (iii) Les MAAC sont hiérarchisées en fonction des étapes i et ii.

L'approche d'évaluation des MAAC a été appliquée sur cinq sites d'études, dont les caractéristiques distinctives permettent de représenter différents types d'environnements côtiers présents dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent. Les résultats démontrent que l'approche d'aide à la décision proposée contribue à baser la sélection des MAAC selon une analyse holistique du SSEC et à obtenir un portrait global de l'effet potentiel des MAAC sur ses composantes. Premièrement, l'évaluation effectuée avec l'algorithme d'évaluation est réalisée à une échelle spatiale fine, soit un segment géomorphologique, en fonction d'un ensemble de quatre variables environnementales qui correspondent aux caractéristiques géomorphologiques et hydrodynamiques d'un segment de côte. L'interprétation des résultats détaillés permet d'analyser, au regard des types d'effets observés, ceux géomorphologiques, écosystémiques et culturels des OPC à l'échelle de la cellule hydrosédimentaire. Deuxièmement, l'évaluation, effectuée avec l'analyse multicritère et le processus participatif, permet de tenir compte de la dynamique multiacteurs, ce qui complète l'analyse holistique du SSEC. Ultimement, l'approche forme un outil d'aide à la prise de décision qui permet de classer, structurer et hiérarchiser afin que l'information soit présentée de manière à éclairer la sélection et la conception des MAAC, par les ingénieurs, les professionnels et les décideurs.

RÉFÉRENCE SUGGÉRÉE

Sauvé, P., Bernatchez, P. et Glaus, M. (2023). Développement d'un outil d'évaluation de mesures d'adaptation pour protéger les infrastructures de transport des aléas côtiers dans un contexte de changements climatiques. Rapport final, Chaire de recherche en géoscience côtière, Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski, projet CC28.1, remis au MTQ en septembre 2023, 123 p. + annexes.

TABLE DES MATIÈRES

1 Introduction 1
1.1 Contexte et problématique 1
1.2 Objectifs 4

2 Mesures d'adaptation aux aléas côtiers 5
2.1 Ouvrages de protection côtière 7
2.2 Solutions d'adaptation non structurelles : synthèse de la littérature 12

3 Cheminement ministériel de la réalisation de projets routiers au MTMD . 14

4 Outil d'évaluation des mesures d'adaptation aux aléas côtiers 18
4.1 Développement de l'algorithme d'évaluation des effets géomorphologiques, écosystémiques et culturels des OPC 18
4.1.1 Évaluation des énoncés d'effets d'OPC observés par les auteurs 19
4.1.2 Fonctionnement de l'algorithme d'évaluation des OPC 28
4.2 Méthode d'analyse multicritère 42
4.2.1 Critères de sélection 43
4.2.2 Méthode PROMETHEE 48

5 Résultats de l'approche d'évaluation des mesures d'adaptation aux aléas côtiers 51
5.1 Port-Daniel (A0102) 54
5.1.1 Description du site d'étude 54
5.1.2 Résultats de l'évaluation des effets géomorphologiques, écosystémiques et culturels des OPC (algorithme) 56
5.1.3 Mesures d'adaptation retenue pour le site 58
5.1.4 Résultats de l'analyse multicritère 59
5.2 Cap-des-Rosiers (B0504) 63
5.2.1 Description du site d'étude 63
5.2.2 Résultats de l'évaluation des effets géomorphologiques, écosystémiques et culturels des OPC (algorithme) 65
5.2.3 Mesures d'adaptation retenue pour le site 65
5.2.4 Résultats de l'analyse multicritère 66
5.3 Saint-Ulric (D0202) 70

5.3.1 Description du site d'étude 70
5.3.2 Résultats de l'évaluation des effets géomorphologiques, écosystémiques et culturels des OPC (algorithme) 71
5.3.3 Mesures d'adaptation retenue pour le site 74
5.3.4 Résultats de l'analyse multicritère 75
5.4 Îles-de-la-Madeleine – La Martinique (F0103) 79
5.4.1 Description du site d'étude 79
5.4.2 Résultats de l'évaluation des effets géomorphologiques, écosystémiques et culturels des OPC (algorithme) 80
5.4.3 Mesures d'adaptation retenue pour le site 83
5.4.4 Résultats de l'analyse multicritère 84
5.5 Rivière-du-Loup (G0201) 88
5.5.1 Description du site d'étude 88
5.5.2 Résultats de l'évaluation des effets géomorphologiques, écosystémiques et culturels des OPC (algorithme) 90
5.5.3 Mesures d'adaptation retenue pour le site 92
5.5.4 Résultats de l'analyse multicritère 93

6 Discussion 97
6.1 Algorithme d'évaluation des effets géomorphologiques, écosystémiques et culturels des OPC 97
6.1.1 Incertitude associée à l'algorithme d'évaluation des effets des OPC 98
6.1.2 Degré d'élargissement 98
6.1.3 Nombre d'effets observés minimal 100
6.1.4 Limite de la méthode 101
6.2 Analyse multicritère 102
6.2.1 Identification et pondération des critères de sélection 102
6.2.2 Notation des MAAC au regard des critères de sélection 104
6.2.3 Hiérarchisation des MAAC 105
6.3 Processus décisionnel 106
6.3.1 Pérennisation de l'information par une structure cohérente des connaissances 106
6.3.2 Diminution de l'incertitude dans un processus d'aide à la prise de décision 107

6.3.3 Intégration au cheminement de projet du MTMD 108

7 Conclusion 110

8 Références 111

ANNEXE A 124

ANNEXE B 138

ANNEXE C 143

ANNEXE D 147

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Sous-concepts intégrés dans les définitions du concept de résilience 5
Tableau 2. Ouvrages de protection côtière inclus dans la catégorie des structures rigides (sous-catégorie, type, *sous-type*) (tiré de Sauvé *et al.*, 2021) 9
Tableau 3. Ouvrages de protection côtière inclus dans la catégorie des techniques souples (sous-catégorie, type, sous-type) (tiré de Sauvé et al., 2023b) 11
Tableau 4. Liste de mesures d'adaptation non structurelles mentionnées dans la littérature et présentée dans le tableau 3 du rapport de Drejza et al. (2022) 12
Tableau 5. Cheminement ministériel de la réalisation de projet routier au MTMD (Stade de réalisation, phases, *étapes*, éléments d'analyse)..... 16
Tableau 6. Information relevée dans chacun des articles consultés..... 20
Tableau 7. Système de catégorisation (catégorie, type, sous-type d'effet observé) et priorisation des sous-types d'effets observés 22
Tableau 8. Échelle de cause à effet utilisée pour la hiérarchisation des effets observés 27
Tableau 9. Échelle de pondération de base pour l'évaluation de l'effet d'un OPC sur le milieu 28
Tableau 10. Exemple de regroupements de caractéristiques environnementales selon les sélections hypothétiques d'un utilisateur 30
Tableau 11. Champs de la liste des critères 30
Tableau 12. Variation des degrés d'élargissement des caractéristiques environnementales initiales..... 35
Tableau 13. Définition des différentes composantes du modèle en cascade du concept de services écologiques 36
Tableau 14. Définition des fonctions écologiques côtières (Beaumont *et al.*, 2007 ; Costanza *et al.*, 2014 ; Liquete *et al.*, 2013 ; Van Oudenhoven *et al.*, 2012) 37
Tableau 15. Services écologiques côtiers répertoriés dans le Québec maritime (Paul-Hus *et al.*, 2021) 37
Tableau 16. Liste des critères de sélection incluant les catégories, les énoncés et les définitions des versions 1 et 2. Les modifications entre les versions 1 et 2 sont indiquées par les effets de police suivants : ajouts et ~~suppressions~~) 44
Tableau 17. Type d'irrégularités dans l'identification des critères de sélection entre les ateliers 47
Tableau 18. Variation de l'intensité de la préférence de l'action a_i par rapport à l'action a_j (tiré de Brans et al. (Brans *et al.*, 1986)) 49

Tableau 19. Variation de l'intensité de la préférence de l'action a_i par rapport à l'action a_j en regard de tous les critères simultanément (tiré deBrans *et al.*, 1986)) 49
Tableau 20. Nombre de répondants au questionnaire en ligne catégorisés par site et par types d'organisation 51
Tableau 21. Résultats de l'effet géomorphologique dans le contexte du secteur d'étude de Port-Daniel (A0102 - flèche littorale, sable, microtidal et énergie des vagues élevée) 57
Tableau 22. Résultats des effets sur les services écologiques d'ordre écosystémique dans le contexte du secteur d'étude de Port-Daniel (A0102 - Flèche littorale, sable, microtidal et énergie des vagues élevée)..... 57
Tableau 23. Résultats des effets sur les services écologiques d'ordre culturel dans le contexte du secteur d'étude de Port-Daniel (A0102 - Flèche littorale, sable, microtidal et énergie des vagues élevée) 58
Tableau 24. MAAC retenus pour l'évaluation avec la méthode d'analyse multicritère au site de Port-Daniel 59
Tableau 25. Notation des MAAC au regard de chacun des critères de sélection pour le site de Port-Daniel (A0102)..... 62
Tableau 26. Résultats de l'effet géomorphologique dans le contexte du secteur d'étude de Cap-des-Rosiers (B0504)..... 65
Tableau 27. Résultats des effets sur les services écologiques d'ordre écosystémique dans le contexte du secteur d'étude de Cap-des-Rosiers (B0504)..... 65
Tableau 28. Résultats des effets sur les services écologiques d'ordre culturel dans le contexte du secteur d'étude de Cap-des-Rosiers (B0504)..... 65
Tableau 29. MAAC retenus pour l'évaluation avec la méthode d'analyse multicritère au site de Cap-des-Rosiers 66
Tableau 30. Notation des MAAC au regard de chacun des critères de sélection pour le site de Cap-des-Rosiers (B0504) 69
Tableau 31. Résultats de l'effet géomorphologique dans le contexte du secteur d'étude de Saint-Ulric (D0202)..... 73
Tableau 32. Résultats des effets sur les services écologiques d'ordre écosystémique dans le contexte du secteur d'étude de Saint-Ulric (D0202) .. 73
Tableau 33. Résultats des effets sur les services écologiques d'ordre culturel dans le contexte du secteur d'étude de Saint-Ulric (D0202)..... 74
Tableau 34. MAAC retenus pour l'évaluation avec la méthode d'analyse multicritère au site de Saint-Ulric 75
Tableau 35. Notation des MAAC au regard de chacun des critères de sélection pour le site de Saint-Ulric (D0202) 78
Tableau 36. Résultats de l'effet géomorphologique dans le contexte du secteur d'étude de La Martinique (F0103 - dunaire, sable, microtidal et énergie des vagues élevée) 82

Tableau 37. Résultats des effets sur les services écologiques d'ordre écosystémique dans le contexte du secteur d'étude de La Martinique (F0103 - dunaire, sable, microtidal et énergie des vagues élevée)..... 82
Tableau 38. Résultats des effets sur les services écologiques d'ordre culturel dans le contexte du secteur d'étude de La Martinique (F0103 - dunaire, sable, microtidal et énergie des vagues élevée)..... 83
Tableau 39. MAAC retenus pour l'évaluation avec la méthode d'analyse multicritère au site de La Martinique 84
Tableau 40. Notation des MAAC au regard de chacun des critères de sélection pour le site de La Martinique (Îles-de-la-Madeleine - F0103) 87
Tableau 41. Résultats de l'effet géomorphologique dans le contexte du secteur d'étude de Rivière-du-Loup (G0201)..... 91
Tableau 42. Résultats des effets sur les services écologiques d'ordre écosystémique dans le contexte du secteur d'étude de Rivière-du-Loup (G0201) 91
Tableau 43. Résultats des effets sur les services écologiques d'ordre culturel dans le contexte du secteur d'étude de Rivière-du-Loup (G0201)..... 91
Tableau 44. MAAC retenus pour l'évaluation avec la méthode d'analyse multicritère au site de Rivière-du-Loup (G0201)..... 92
Tableau 45. Notation des MAAC au regard de chacun des critères de sélection pour le site de Rivière-du-Loup (G0201) 95
Tableau 46. Type d'échelle qualitative en fonction des critères..... 105
Tableau 47. Choix de réponse ouvert proposés aux participants pour identifier leur fonction exercer au sein de leur organisation 133
Tableau 48. Liste finale des critères de sélection incluant les catégories, les énoncés et les définitions). 139
Tableau 49. Classification des côtes (Catégorie, sous-catégorie, type, *sous-type*) 144
Tableau 50. Classification des sédiments 146
Tableau 51. Classification du marnage 146
Tableau 52. Classification de l'énergie des vagues..... 146

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Quatre catégories de solutions d'adaptation aux aléas côtiers. Certaines solutions d'adaptation sont classées dans plus d'une catégorie (adaptée de Arlington Group Planning and Architecture, 2012) 7
Figure 2. Schématisation de l'évaluation des ouvrages de protection côtière. 18
Figure 3. Synthèse graphique de l'algorithme d'évaluation des ouvrages de protection côtière 19
Figure 4. Schéma logique de l'évaluation des énoncés d'effets d'OPC observés par les auteurs 19
Figure 5. Procédure algorithmique pour le regroupement des caractéristiques environnementales 29
Figure 6. Schématisation du module d'évaluation géomorphologique des ouvrages de protection côtière 32
Figure 7. Schématisation du module d'évaluation services écologiques des ouvrages de protection côtière 39
Figure 8. Procédure de hiérarchisation de l'algorithme d'évaluation 41
Figure 9. a) relation de surclassement entre a_i et a_j, b) relation de surclassement a_1 et $a_{2, 3, 4, 5}$ 49
Figure 10. Analyse du poids attribué aux catégories de critère par l'ensemble des répondants du questionnaire pour les cinq sites. Moyenne générale (carré jaune), poids minimum (triangle vert) et poids maximum (triangle rouge). Moyennes spécifiques aux organisations : X bleu (MTMD), orange (échelle municipale) et vert (organisme). Plus et moins gris : plage d'analyse définie par l'écart-type plus et moins la moyenne générale. 53
Figure 11. Site d'étude de Port-Daniel (A0102). (A) Imagerie aérienne du site d'étude situé sur une flèche littorale. Représentation de la dérive littorale, du courant de marée et des bancs sableux. (B) Vue du site vers le nord. (C) Vue du site vers le sud. (D) Falaise rocheuse située en amont du site à l'extrémité sud de la cellule hydrosédimentaire. (E) Terrasse de plage située en amont et au sud du site d'étude. 55
Figure 12. A) Distribution du poids attribué aux critères (version 1) par les répondants pour chacun des types d'organisation au regard des caractéristiques du site de Port-Daniel (A0102). Le nombre de répondants par organisme est inscrit entre parenthèses. B) Comparaison de la moyenne générale des répondants (carré jaune) et des moyennes spécifiques à chacun des types d'organisation (x bleu (MTMD), orange (municipalité et MRC) et vert (autre organisme)). Le cercle rouge et le triangle vert représentent le poids le plus élevé et le plus faible attribué au critère en considérant l'ensemble des répondants. Les signes plus et moins représentent respectivement l'addition et la soustraction de l'écart-type à la moyenne générale. 61

Figure 13. Quatre scénarios de hiérarchisation des MAAC pour le site de Port-Daniel en fonction de la pondération moyenne des critères de sélection (étape 1) de différents groupes de répondants. 63
Figure 14. Site d'étude de Cap-des-Rosiers (B0504). (A) Imagerie aérienne du site d'étude situé au sommet d'une falaise rocheuse. Représentation de la dérive littorale principale et de l'exutoire du ruisseau Kavanagh. (B) Vue de la cellule hydrosédimentaire au sud-est du site. (C) Vue du site au sommet de la falaise rocheuse et enrochement au pied de la falaise. 64
Figure 15. A) Distribution du poids attribué par les répondants aux critères (version 1) par les répondants pour chacun des types d'organisation au regard des caractéristiques du site de Cap-des-Rosiers (Gaspé) (B0504). Le nombre de répondants par organisme est inscrit entre parenthèses. B) Comparaison de la moyenne générale des répondants (carré jaune) et des moyennes spécifiques à chacun des types d'organisation (x bleu (MTMD), orange (municipalité et MRC) et vert (autre organisme)). Le cercle rouge et le triangle vert représentent le poids le plus élevé et le plus faible attribué au critère en considérant l'ensemble des répondants. Les signes plus et moins représentent respectivement l'addition et la soustraction de l'écart-type à la moyenne générale. 68
Figure 16. Quatre scénarios de hiérarchisation des MAAC pour le site de Cap-des-Rosiers en fonction de la pondération moyenne des critères de sélection (étape 1) de différents groupes de répondants. 70
Figure 17. Site d'étude de Saint-Ulric (D0202). (A) Imagerie aérienne du site d'étude situé au sommet d'une terrasse de plage. Représentation de la dérive littorale principale. (B et C) Vue du site au sommet de la terrasse de plage... 71
Figure 18. A) Distribution du poids attribué par les répondants aux critères (version 1) par les répondants pour chacun des types d'organisation au regard des caractéristiques du site de Saint-Ulric (D0202). Le nombre de répondants par organisme est inscrit entre parenthèses. B) Comparaison de la moyenne générale des répondants (carré jaune) et des moyennes spécifiques à chacun des types d'organisation (x bleu (MTMD), orange (municipalité et MRC) et vert (autre organisme)). Le cercle rouge et le triangle vert représentent le poids le plus élevé et le plus faible attribué au critère en considérant l'ensemble des répondants. Les signes plus et moins représentent respectivement l'addition et la soustraction de l'écart-type à la moyenne générale. 77
Figure 19. Quatre scénarios de hiérarchisation des MAAC pour le site de Saint-Ulric en fonction de la pondération moyenne des critères de sélection (étape 1) de différents groupes de répondants..... 79
Figure 20. Site d'étude de La Martinique (Îles-de-la-Madeleine - F0103)). (A) Imagerie aérienne du site d'étude situé sur un tombolo dunifié. Représentation de la dérive littorale, du courant de marée et des cordons sableux de bas estran. (B) Vue du site non dunifié. (C) Vue du site dunifié. 80
Figure 21. A) Distribution du poids attribué aux critères (version 1) par les répondants pour chacun des types d'organisation au regard des caractéristiques

du site de La Martinique (Îles-de-la-Madeleine – F0103). Le nombre de répondants par organisme est inscrit entre parenthèses. B) Comparaison de la moyenne générale des répondants (carré jaune) et des moyennes spécifiques à chacun des types d'organisation (x bleu (MTMD), orange (municipalité et MRC) et vert (autre organisme)). Le cercle rouge et le triangle vert représentent le poids le plus élevé et le plus faible attribué au critère en considérant l'ensemble des répondants. Les signes plus et moins représentent respectivement l'addition et la soustraction de l'écart-type à la moyenne générale. 86
Figure 22. Quatre scénarios de hiérarchisation des MAAC pour le site de La Martinique (Îles-de-la-Madeleine - F0103) en fonction de la pondération moyenne des critères de sélection (étape 1) de différents groupes de répondants..... 88
Figure 23. Site d'étude de Rivière-du-Loup (G0201). (A) Imagerie aérienne du site d'étude situé en bordure d'un marais maritime. Représentation du courant estuarien. (B) Vue du site vers l'ouest. (C) Vue du site vers l'est avec le brise-lame..... 90
Figure 24. A) Distribution du poids attribué par les répondants aux critères (version 1) par les répondants pour chacun des types d'organisation au regard des caractéristiques du site de Rivière-du-Loup (G0201). Le nombre de répondants par organisme est inscrit entre parenthèses. B) Comparaison de la moyenne générale des répondants (carré jaune) et des moyennes spécifiques à chacun des types d'organisation (x bleu (MTMD), orange (municipalité et MRC) et vert (autre organisme)). Le cercle rouge et le triangle vert représentent le poids le plus élevé et le plus faible attribué au critère en considérant l'ensemble des répondants. Les signes plus et moins représentent respectivement l'addition et la soustraction de l'écart-type à la moyenne générale. 94
Figure 25. Quatre scénarios de hiérarchisation des MAAC pour le site de Rivière-du-Loup (G0201) en fonction de la pondération moyenne des critères de sélection (étape 1) de différents groupes de répondants..... 96
Figure 26. Illustration du phénomène d'uniformisation des requêtes engendré par le processus d'élargissement des caractéristiques environnementales initiales (critères initiaux du scénario A, critères initiaux du scénario B)..... 100

1 INTRODUCTION

1.1 Contexte et problématique

À l'échelle mondiale, les côtes sont affectées par des aléas, tels que l'érosion, la submersion et les glissements de terrain, qui engendrent plusieurs enjeux importants pour les communautés côtières (Degbe, 2009 ; Marchand, 2010 ; Goussard, 2014; Silva *et al*., 2014 ; Jouzel *et al*., 2015). Durant les dernières décennies, le risque engendré par ses aléas est accentué par des pressions anthropiques directes et indirectes. Les pressions directes sont dues à l'augmentation de la densité des zones côtières occasionnée par le développement de villes populeuses, de ports, d'infrastructures de transports, de quartiers résidentiels. Les pressions indirectes sont dues aux activités anthropiques qui produisent des gaz à effet de serre qui mènent aux changements climatiques (Pranzini *et al.*, 2015). Les effets des changements climatiques en zones côtières sont multiples. La hausse du niveau de la mer et la diminution du nombre de jours avec un couvert de glaces côtières dans les régions froides constituent des facteurs qui augmentent les impacts des aléas côtiers sur les communautés côtières (Barnhart *et al.*, 2014 ; Church et White, 2011 ; Kopp *et al.*, 2016 ; Nicholls et Cazenave, 2010 ; Nicholls et Tol, 2006 ; Oppenheimer *et al.*, 2019). Durant les dernières décennies, l'utilisation de structures rigides a augmenté à l'échelle mondiale en réponse à l'urbanisation des zones côtières et à l'augmentation de l'exposition des communautés côtières (Dugan *et al.*, 2011 ; Gittman *et al.*, 2015 ; Horstman *et al.*, 2009 ; Pranzini *et al.*, 2015 ; Sauvé *et al.*, 2020).

Les littoraux de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent (EGSL) ne sont pas épargnés par cette tendance, ayant été touchés ces deux dernières décennies par d'importantes tempêtes qui ont provoqué des dommages considérables aux infrastructures en bordure du littoral, notamment en octobre et en décembre 2005, en décembre 2010, en décembre 2016, en septembre 2019 et en septembre 2022 (Bernatchez *et al*., 2011, 2012a; Corriveau *et al*., 2019a, 2019b; Didier *et al*., 2015; Quintin *et al*., 2013). En 2017, 97,6 % des ouvrages de protection côtière (OPC) étaient des structures réflectives rigides (enrochements et murs; Bernatchez *et al*., 2017; Sauvé *et al*., 2020). Or, ce type d'aménagement n'est pas adapté à la majorité des systèmes côtiers et contribue à réduire la capacité naturelle des écosystèmes côtiers, à absorber l'énergie des vagues, ce qui peut engendrer une augmentation du risque d'érosion et de submersion côtières (Bernatchez et Fraser, 2012; Didier *et al*., 2015; Cooper *et al*., 2020).

De plus, les systèmes côtiers sont caractérisés par une dynamique qui résulte de processus non linéaires à échelles spatio-temporelles multiples qui

impliquent des interactions entre les aspects géomorphologiques, hydrodynamiques, écosystémiques et sociaux (Baquerizo et Losada, 2008 ; Polasky *et al.*, 2011), ainsi qu'une incertitude inhérente amplifiée par les effets des changements climatiques (Hallegatte, 2009 ; Wahl *et al.*, 2017). Cette complexité rend chaque site unique et nécessite une démarche spécifique pour prendre en considération ses caractéristiques dans l'identification de la mesure d'adaptation la mieux adaptée au contexte (Jones *et al.*, 2014). À l'échelle du Québec maritime laurentien, cette dynamique est d'autant plus complexe pour la gestion des zones côtières compte tenu de la diversité et la variation des milieux environnementaux et humains.

La littérature scientifique dans le domaine montre qu'il existe une grande diversité de mesures d'adaptation aux aléas côtiers (MAAC) pouvant être déployée. Au regard de ce vaste répertoire, les décideurs des communautés côtières doivent sélectionner un scénario adapté à la dynamique du site d'intervention. Or, chaque MAAC présente des distinctions quant aux effets géomorphologiques, hydrodynamiques, écologiques et socio-économiques sur la dynamique du système socioécologique côtier (SSEC), en plus de distinctions de leurs caractéristiques intrinsèques telles que leur coût, leur durée de vie et leur efficacité.

Dans l'optique où l'objectif est la protection des infrastructures et de la population à risque, un processus d'analyse doit être enclenché pour identifier la MAAC appropriée au contexte socioécologique local. Dans ce contexte, l'aide à la prise de décision se présente comme l'ensemble des processus destinés à créer les conditions favorables à la production d'informations pertinentes et à son utilisation appropriée afin d'en arriver à des bonnes ou de meilleures décisions (Jones *et al.*, 2014). Les méthodes de support à la prise de décision ont été développées et sont utilisées dans un contexte de prise de décision en environnement, car elles permettent d'améliorer la compréhension des relations entre les variables et d'ainsi considérer les effets des scénarios sur de multiples dimensions des systèmes socioécologiques (Gamper et Turcanu, 2007). Ces méthodes ne remplacent pas le processus de planification (définition du problème et des opportunités; projection de l'évolution du système si aucune action n'est réalisée; établissement de scénarios d'intervention; analyse des effets des scénarios; évaluation de scénarios secondaires; choix d'un scénario) (USACE, 2006b). Elles y jouent un rôle de support objectif et factuel en présentant de l'information supplémentaire qui permet d'analyser la dynamique du système et de hiérarchiser différents scénarios d'intervention (Gamper et Turcanu, 2007 ; Westmacott, 2001).

À l'échelle mondiale, l'aide à la décision dans un contexte de gestion de la zone côtière est orientée sur l'évaluation des risques (Viavattene et al., 2018) et de la vulnérabilité (Johnston et al., 2014 ; Le Cozannet et al., 2013), des effets écosystémiques (Granek et al., 2009), de la planification spatiale du territoire

côtier (Bagheri et al., 2013 ; Kitsiou et al., 2002), ainsi que de l'identification de stratégies de gestion du littoral (Félix et al., 2012). Suite à une revue de la littérature scientifique, l'unique méthode d'aide à la décision trouvée qui a été employée pour évaluer les OPC en fonction du milieu d'implantation est l'analyse coût-avantage (ACA) (Amadio et al., 2022 ; André et al., 2016 ; Polomé et al., 2005). L'ACA est basée sur une unité d'agrégation monétaire pour comparer les impacts économiques de différentes options d'adaptation qui sont techniquement réalisables.

Au Québec, le processus décisionnel pour l'identification d'OPC utilisé par les firmes d'ingénierie est limité généralement à une analyse comparative de critères qualitatifs ou, simplement, sur l'expérience des ingénieurs spécialisés (Sauvé *et al.*, 2020). Or, ces approches ne proposent pas de méthode d'aide à la décision pour l'évaluation d'OPC basée sur une analyse holistique du SSEC et n'impliquent généralement, ni les acteurs locaux et régionaux, ni les résidents. L'ACA a notamment été utilisé sur dix secteurs d'études au Québec et dans les provinces maritimes de l'Est du Canada pour évaluer différentes options d'adaptation, dont les OPC (Boyer-Villemaire *et al.*, 2016 ; Circé *et al.*, 2016c, 2016d, 2016e, 2016b, 2016a ; Leclerc et Dupuis, 2008). Si la transposition en unité monétaire semble assez intuitive pour certains critères (coût des solutions d'adaptation, évaluation foncière, etc.), elle est moins bien adaptée pour les impacts intangibles (effet sur les écosystèmes, sur le paysage, sur les activités pratiquées, etc.) (Bryce *et al.*, 2016 ; Chan *et al.*, 2012 ; McCauley, 2006 ; Tudela *et al.*, 2006). Il devient alors nécessaire de multiplier les hypothèses pour parvenir à comparer des critères hétéroclites sur une base monétaire commune. En limitant l'intégration des impacts potentiels sur les écosystèmes dans les analyses d'OPC, les ACA classiques ont eu tendance à favoriser les ouvrages rigides (Amadio *et al.*, 2022 ; Ha *et al.*, 2021) et à prioriser la protection de résidences à haute valeur économique soulevant ainsi des questions de justice sociale (Siders et Keenan, 2020).

Au sein du ministère des Transports et de la Mobilité durable (MTMD), les professionnels ont mis en place une procédure de cheminement de projet qui vise à évaluer une variété de scénarios sur la base d'analyses effectuées selon différentes méthodes. Cependant, pour les projets en milieux côtiers, certaines étapes de cette procédure manquent de constance méthodologique, étant donné le caractère nouveau des enjeux rencontrés, ce qui nuit à l'analyse et aux comparaisons interprojet.

Dans ce contexte général, le ministère des Transports et de la Mobilité durable (MTMD) a réalisé dans la dernière décennie des études visant à caractériser les impacts des aléas côtiers et la vulnérabilité des infrastructures de son réseau routier (Bernatchez *et al.*, 2010 ; Corriveau *et al.*, 2016, 2019b, 2019a ; Drejza *et al.*, 2014, 2015, 2019 ; Senneville *et al.*, 2014). Dans la continuité du

processus d'augmentation de la résilience du réseau routier, le projet actuel vise à contribuer à la planification stratégique des interventions en zone côtière.

1.2 Objectifs

Le projet de recherche est réalisé dans le cadre d'une étude d'impact mené par le ministère des Transports et de la Mobilité durable (MTMD) qui vise à mettre en place un programme décennal d'interventions en milieu côtier à l'échelle régionale. Le projet de recherche vise à développer une approche intégrée d'évaluation et de hiérarchisation de MAAC adaptées aux conditions spécifiques d'un SSEC, de manière à complémenter les méthodes d'évaluation existantes et à répondre aux besoins d'informations concernant les effets potentiels des différentes mesures d'adaptation aux aléas côtiers sur le SSEC. Cette approche intègre, d'une part, les connaissances scientifiques sur les effets des OPC sur l'évolution des SSEC et, d'autre part, les priorités exprimées par les professionnels et les gestionnaires du MTMD ainsi que d'organisations impliquées dans la gestion des zones côtières à l'échelle locale (municipalités, MRC et organismes environnementaux locaux).

Les objectifs spécifiques du projet de recherche sont :

1. développer une méthode d'évaluation et de hiérarchisation des OPC en fonction de différents ensembles de caractéristiques environnementales côtières en se basant sur une synthèse qualitative de leurs effets, tels que répertoriés dans la littérature scientifique, puis intégrer les résultats au processus décisionnel, afin d'en arriver à une présélection d'OPC qui soient adaptés aux conditions du milieu d'étude;
2. adapter l'utilisation d'une méthode d'analyse multicritère de manière à hiérarchiser des MAAC, tout en impliquant les professionnels et gestionnaires du territoire côtier dans la pondération des critères de sélection;
3. colliger, sous une forme structurée, la synthèse des informations récoltées (y compris les résultats de la consultation des différentes parties prenantes) au regard de chaque site à l'étude, afin de saisir les portées et de faciliter la compréhension des enjeux d'identification d'une MAAC;
4. proposer une intégration des méthodes développées dans le cheminement de projet du MTMD.

2 MESURES D'ADAPTATION AUX ALÉAS CÔTIERS

Le MTMD doit mettre en place des solutions d'adaptation pour limiter la hausse projetée des impacts indésirables des aléas côtiers et ainsi augmenter la résilience du réseau routier. Le GIEC définit le concept de résilience de la manière suivante : « capacité d'un système social, économique ou environnemental à faire face à des perturbations […] en répondant ou en se réorganisant de façon à maintenir leurs fonctions, leurs identités et leurs structures essentielles, tout en maintenant la capacité de s'adapter, d'apprendre et de se transformer » (GIEC, 2018). Cette définition peut être divisée en deux segments qui regroupent différents sous-concepts (tableau 1) (Folke, 2006 ; Garschagen, 2013). Le premier segment est lié à la capacité d'absorption des systèmes. Elle inclut les sous-concepts d'auto-organisation et de rétablissement. Le second segment est lié à la capacité d'adaptation des systèmes. Elle inclut l'apprentissage et la transformation.

Tableau 1 : Sous-concepts intégrés dans les définitions du concept de résilience

Sous-concepts	Définition
Capacité d'absorption	Capacité d'absorber des perturbations tout en maintenant les fonctions (Folke, 2006)
Auto-organisation	Capacité à maintenir ou recréer ses propriétés face aux perturbations sans besoin d'aide externe pour persister (Lebel et al., 2006; Mileti, 1999; Ronan & Johnston, 2005).
Rétablissement4578/(<	Processus vers un retour à un état normal en réponse à une perturbation (Platt *et al.*, 2016)
Capacité de réponse	Capacité d'ajustement à une perturbation, d'atténuation des dommages potentiels, de tirer avantage des opportunités et de faire face aux conséquences (Gallopín, 2006).
Capacité d'adaptation	Capacité d'ajustement des systèmes, des institutions, des êtres humains et d'autres organismes, leur permettant de se prémunir contre les risques de dégâts, de tirer parti des occasions ou de réagir aux conséquences (GIEC, 2014).
Apprentissage	Capacité de se souvenir et de prendre de l'expérience des aléas antérieurement vécus, de prendre des moyens pour acquérir des connaissances sur le système socioécologique et d'innover dans un cycle adaptatif itératif (Berkes, 2007 ; Koontz *et al.*, 2015 ; Tribbia et Moser, 2008).
Transformation	Capacité à déplacer le développement du système vers d'autres voies émergentes et même en créer de nouvelles (Folke, 2016).

Concrètement, le sous-concept de capacité d'absorption est basé sur un état initial qui est fonction des caractéristiques environnementales (géomorphologie et écosystème). Par la suite, les solutions d'adaptation mises en place par les acteurs permettent de gérer la capacité d'absorption du système (Berkes, 2007 ; Lebel *et al.*, 2006) et ainsi de réduire les conséquences des aléas naturels. Ces

stratégies peuvent être sous forme de plans de mesures d'urgence, de mesures d'adaptation des infrastructures ou d'OPC aménagés sur le littoral.

La capacité d'adaptation est identifiée dans la littérature scientifique comme un concept propre (Smit et Wandel, 2006) généralement défini comme la capacité d'un système à planifier et à se préparer pour répondre efficacement aux aléas naturels ainsi qu'à se rétablir, à se restaurer et à mieux se reconstruire par l'implantation de stratégies d'adaptation (Klein *et al.*, 2003 ; UNISDR, 2015). La capacité d'adaptation est dynamique et spécifique au contexte de chaque communauté (Smit et Wandel, 2006). Généralement, le concept de capacité d'adaptation est intégré dans les définitions du concept de résilience en lien avec les aléas naturels.

Dans le contexte de la gestion des aléas côtiers, les solutions d'adaptation visent à augmenter la capacité d'absorption du système dans l'objectif de réduire les impacts indésirables des risques côtiers. La mise en place d'une stratégie d'adaptation peut cependant améliorer ou dégrader l'état du système. En cas de dégradation, le terme « mal adaptation » est employé pour signifier l'absence d'adaptation ou une détérioration de l'état du système (Juhola *et al.*, 2016 ; Magnan *et al.*, 2016 ; Smit *et al.*, 2000). Les solutions d'adaptation peuvent être divisées en quatre catégories : outils de réglementation, mesures de gestion du territoire, mesures sociales et OPC (figure 1). Les outils de réglementation sont les règlements adoptés par les décideurs gouvernementaux pour assurer la protection du public. Les mesures de gestion du territoire sont orientées sur les changements ou les restrictions d'utilisation du territoire ainsi que sur les mesures de planification et de gestion mises en place par les gouvernements locaux et régionaux. Les mesures sociales sont les mesures mises en place pour intégrer les acteurs du territoire côtier dans le processus d'adaptation de leur communauté (Arlington Group Planning and Architecture, 2012).

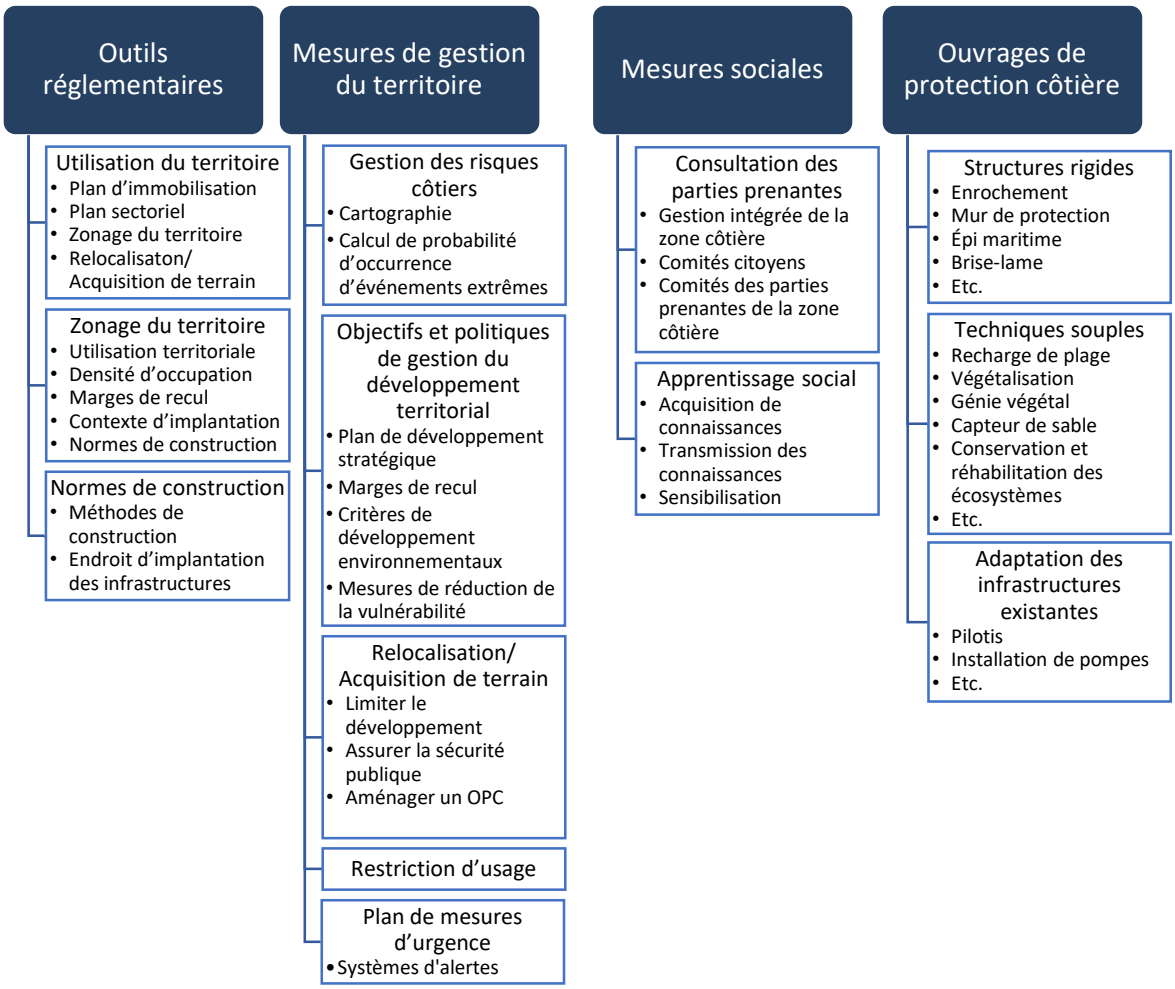

Figure 1. Quatre catégories de solutions d'adaptation aux aléas côtiers. Certaines solutions d'adaptation sont classées dans plus d'une catégorie (adaptée de Arlington Group Planning and Architecture, 2012)

Les OPC et les solutions d'adaptation non structurelles pour les infrastructures de transports sont présentés dans les prochaines sections.

2.1 Ouvrages de protection côtière

Les ouvrages de protection côtière (OPC) sont les mesures mises en place pour limiter l'effet de l'érosion et de la submersion côtières. Une revue de littérature des articles scientifiques, de guides de conception, ainsi que de rapports de firmes d'ingénierie a permis d'établir une typologie des OPC (Sauvé *et al.*,

2023b). Ils ont été classés, d'abord, en deux grandes catégories, soit les structures rigides (tableau 2) et les techniques souples (tableau 3).

Les structures rigides sont des dispositifs stables de dissipation de l'énergie des vagues ou des courants, constituées de matériaux rigides comme des pierres, du béton, du bois ou de l'acier et visant à maintenir ou à consolider des secteurs côtiers spécifiques. Elles sont dimensionnées selon deux types généraux de structures, soit les structures de type monticule de pierres (enrochements, brise-lames, jetées et digues) et les structures verticales (principalement des murs de protection). Les techniques souples sont des moyens flexibles de réaménagement du littoral, qui agissent sur le bilan sédimentaire par l'ajout de sédiments ou par des techniques végétales permettant de retenir les sédiments. Les sous-catégories d'OPC ont été regroupées en fonction de leur effet sur le milieu côtier, puis elles ont été subdivisées en types et sous-types.

La catégorie *techniques souples*, principalement les techniques végétales, intègre les solutions fondées sur la nature dans un objectif de protection côtière (p. ex. nature-based solutions, living shoreline, ecosystem based adaptation). Ces techniques sont généralement composées d'une combinaison d'OPC et elles peuvent également inclure des structures rigides comme des brise-lames ou des épis (Bilkovic *et al.*, 2017).

Tableau 2. Ouvrages de protection côtière inclus dans la catégorie des structures rigides (sous-catégorie**, type, *sous-type*) (tiré de Sauvé *et al.*, 2021)**

Nom	Définition
Structure réflexive	Catégorie d'OPC dont les composantes sont aménagées sur la côte et parallèlement à celle-ci, dont l'objectif est de maintenir le trait de côte à un endroit fixe et qui a pour effet de réfléchir l'énergie des vagues.
Mur de protection	Ouvrage aménagé sur la côte, parallèlement à celle-ci, composé de béton, de bois, d'acier, de pneus, etc., vertical ou avec une pente abrupte, dont l'objectif est de stabiliser la position du trait de côte.
Caisson	Sous-type de mur de protection, composé de casiers de bois ou de métal remplis avec des pierres.
Gabion	Sous-type de mur de protection, composé de casiers formés de fils de fer tressés remplis avec des pierres.
Enrochement	Ouvrage aménagé sur la côte, parallèlement à celle-ci, recouvrant le talus d'une côte naturelle ou d'un remblai, composé de blocs de pierre, d'unités de béton préfabriquées, de béton, etc., dont l'objectif est d'arrêter le recul du trait de côte et de dissiper une partie de l'énergie des vagues.
Revêtements en unités de béton	Ouvrage aménagé sur la côte, parallèlement à celle-ci, recouvrant le talus d'une côte naturelle ou d'un remblai, composé d'unités de béton préfabriquées
Structure de sédimentation	Catégorie d'OPC aménagée sur l'estran ou l'avant-plage, dont l'objectif est d'ajuster la dynamique hydrosédimentaire afin de favoriser la sédimentation à des endroits déterminés.
Brise-lames	Ouvrage aménagé au large, parallèlement à la ligne de rivage, généralement composé de pierres imbriquées avec une certaine pente, dont l'objectif est d'atténuer l'énergie des vagues et de provoquer le dépôt de sédiments entre l'ouvrage et la ligne de rivage.
Brise-lame émergé	Brise-lames dont l'élévation de la crête est supérieure en tout temps au niveau de l'eau et est rarement franchie par les vagues.
Brise-lame à crête basse	Brise-lames dont l'élévation de la crête est approximativement égale au niveau de l'eau et est régulièrement franchie par les vagues.
Brise-lame submergé	Brise-lames dont l'élévation de la crête est inférieure en tout temps au niveau de l'eau.
Récif artificiel	Sous-type de brise-lame à crête basse ou submergé, à couche unique, composé de pierres du même calibre, qui se reforme en fonction de l'action des vagues jusqu'à un état d'équilibre.
Seuil submergé	Variante d'un brise-lames submergé, aménagé à proximité de la côte, conçu pour réduire le transport sédimentaire transversal en agissant comme une barrière.

Tableau 2 (suite). Ouvrages de protection côtière inclus dans la catégorie des structures rigides (sous-catégorie**, type, *sous-type*) (tiré de Sauvé *et al.*, 2021)**

Épi maritime	Ouvrage aménagé sur l'estran, perpendiculairement à la ligne de rivage, composé généralement de bois ou de pierres et dont l'objectif est de capter les sédiments transportés par les courants littoraux.
Épi imperméable	Épi maritime ne permettant pas le passage de la dérive littorale et du transport sédimentaire longitudinal
Épi perméable	Épi maritime permettant le passage de la dérive littorale et du transport sédimentaire le long de la côte.
Jetée	Ouvrage généralement rectiligne et aménagé perpendiculairement à la ligne de rivage, de plus grandes envergures qu'un épi imperméable, visant à contrôler la dérive littorale ou à empêcher l'accumulation de sédiments à l'exutoire d'une rivière ou à l'entrée d'un port. Une jetée a généralement pour effet de créer une nouvelle cellule hydrosédimentaire.
Autres ouvrages rigides	Catégorie regroupant des OPC n'ayant pas les mêmes objectifs ou les mêmes effets sur la dynamique côtière que ceux des autres catégories de structures rigides.
Rip-rap	Revêtement de matériaux grossiers (62-300 mm), disposés en pente douce sur une plage, afin de stabiliser le profil de plage et de maintenir les matériaux en place.
Digue	Remblai longitudinal, aménagé sur l'arrière-plage ou l'arrière-côte, généralement composé de terre compactée, parfois de béton, et visant à contrôler la submersion.
Aboiteau	Sous-type de digue comprenant des clapets qui permettent la sortie de l'eau de ruissellement et empêchent l'entrée de l'eau salée.

Tableau 3. Ouvrages de protection côtière inclus dans la catégorie des techniques souples (sous-catégorie, type, sous-type) (tiré de Sauvé et al., 2023b)

Nom	Définitions
Recharge sédimentaire	Catégorie d'OPC consistant à déposer des sédiments d'emprunt sur une plage dans le but de reprofiler certaines sections de la plage afin d'augmenter sa capacité de dissipation de l'énergie des vagues ainsi que sa largeur et de rééquilibrer le bilan sédimentaire de la cellule hydrosédimentaire. Une recharge sédimentaire peut être localisée sur des secteurs précis du profil de plage (recharge de dune, recharge de plage, recharge d'avant-plage, etc.).
Recharge sédimentaire	
Recharge de dune	Dépôt de sédiments d'emprunt au niveau de la dune afin d'en augmenter le volume et la hauteur.
Recharge de plage	Dépôt de sédiments d'emprunt sur la haute plage, le haut estran ou le bas estran.
Recharge d'avant-plage	Dépôt de sédiments d'emprunt au niveau de la plage sous-marine, souvent du côté mer des barres subtidales, afin de provoquer le déferlement des vagues dans cette zone.
Méga-recharge	Dépôts d'une grande quantité de sédiments d'emprunt (de l'ordre de plusieurs millions de mètres cubes) afin de favoriser la répartition sédimentaire à l'échelle d'une cellule hydrosédimentaire sur plusieurs décennies.
Remblai (OPC)	Ouvrage de protection côtière consistant à ajouter du matériel sédimentaire d'emprunt sur la haute plage ou le haut estran sans effectuer de reprofilage.
Mesure de dérivation sédimentaire	Mesure permanente aménagée afin de rétablir le transport sédimentaire bloqué par un obstacle (p. ex. une jetée).
Technique végétale	Catégorie d'OPC basée sur l'utilisation de végétaux dont les systèmes racinaires retiennent les sédiments et les feuilles freinent les courants.
Végétalisation	Plantation de végétaux adaptés à la dynamique du secteur, dans des secteurs où la végétation est morcelée, peu dense ou absente, sans toutefois faire l'objet d'une conception de génie.
Génie végétal	Techniques basées sur l'utilisation de végétaux et d'autres matériaux principalement d'origine végétale comme armature qui font l'objet d'une conception de génie.
Écran organique	Technique artisanale composée d'amas de matière organique, de branches ou de troncs d'arbres, plus ou moins agencés ensemble sur la ligne de rivage ou sur le talus côtier.
Autres techniques souples	Catégorie regroupant des OPC n'ayant pas les mêmes objectifs ou les mêmes effets sur la dynamique côtière que ceux des autres catégories de techniques souples.
Capteur de sable	Aménagements implantés sur les côtes sableuses, généralement dunaires, utilisés pour contrôler l'érosion éolienne par une obstruction du vent à proximité du sol et pour créer des zones propices à la déposition de sable.
Ganivelle	Sous-type de capteur de sable, fait de lattes de bois jointes par un fil de fer.
Drainage	Aménagements implantés sur les plages sableuses, sous la surface de la plage, utilisés pour drainer la plage afin de réduire le transport sédimentaire dirigé de la zone du *swash* vers la plage sous-marine.

À noter que chaque OPC présente des distinctions quant aux effets géomorphologiques, hydrodynamiques, écologiques et socio-économiques sur la dynamique du SSEC, en plus de distinctions quant à leur coût, leur durée de vie et leur efficacité.

2.2 Solutions d'adaptation non structurelles : synthèse de la littérature

Une revue de littérature sur les pratiques d'adaptation courantes et novatrice des infrastructures routières aux échelles provinciale, nationale et internationale a été réalisée. Cette revue de littérature est présentée dans le rapport « Identification et évaluation des stratégies et des mesures d'adaptation non structurelles pour les infrastructures de transports » de Drejza et al. (2022).

Dans ce rapport, les différentes catégories de stratégie utilisées pour l'adaptation du réseau routier aux aléas côtiers sont présentées : ne rien faire, retrait, accommodement et options mixtes. Chacune de ces catégories est déclinée en plusieurs mesures d'adaptation non structurelles (tableau 4).

Tableau 4. Liste de mesures d'adaptation non structurelles mentionnées dans la littérature et présentée dans le tableau 3 du rapport de Drejza et al. (2022)

Mesure d'adaptation non structurelle	Commentaire	Section/page du rapport de Drejza et al. (2022)
Ne rien faire	N'est pas à privilégier, mais doit être comparé aux autres interventions	4.1/48
Retrait		
Relocalisation planifiée	Considérer ce qui est fait de l'ancienne route	4.6/58
Abandonner la route	Nécessite une route de remplacement de même niveau ce qui n'existe presque nulle part au Québec	4.4/54
Accommodement		
Gérer et entretenir	Dans l'attente de choisir ou d'implanter une solution d'adaptation	4.2/49
Fermeture temporaire	Circulation redistribuée sur une voie de contournement à l'aide d'une signalisation spéciale lors des épisodes de tempête	4.4/54
Amélioration de la robustesse du réseau (redondance)	Augmenter ou créer des voies de contournement	4.3/52
Rehaussement de la route/immunisation contre la submersion	Concerne les routes, les ponts et autres infrastructures routières connexes	4.7/105
Rehaussement des entrées des tunnels	Pour éviter la submersion côtière	-

Abaissement de la route	Pour qu'elle soit complètement submergée et limiter les dommages au pavage	4.8/110
Mise en place d'un pont	Doit être adapté aux nouvelles conditions climatiques pour éviter les dommages	4.9/110
Réservation de terrains	Faire une étude sur la question légale de réserver des terrains au Québec	4.12.2/130
Amélioration de la gestion durant les événements	Élaboration de plans de mesures d'urgence	4.2.3/51
Ajuster les normes de planification	Planification longue comme les infrastructures de transport ont un long cycle de vie	5.2/136
Ajuster les normes de pratiques, de gestion et d'entretien	Ajustées en fonction des changements climatiques de manière générale (pas précises au contexte côtier)	4.12.3/130
Groupes spéciaux d'intervention	Par exemple la patrouille de roche en Gaspésie	4.2.1/49
Suivi	Des aléas, des événements dommageables, de la gestion, etc.	3.1.2/43
Options mixtes		
Restauration d'écosystèmes	Peut inclure des ouvrages et des pratiques de gestion	4.10/111
Cascade de scénarios	Combinaison de mesures d'adaptation qui se suivent sur le long terme selon le contexte qui évolue	6/142

3 CHEMINEMENT MINISTÉRIEL DE LA RÉALISATION DE PROJETS ROUTIERS AU MTMD

Le cheminement ministériel de la réalisation de projets routiers est composé de trois stades de réalisation, subdivisé en cinq phases qui se décomposent en neuf étapes. Sept points de contrôle (PC) marquent la fin d'une étape et permettent de faire le point, de valider les grands paramètres de l'étape suivante, de transmettre aux autorités l'information qui leur est nécessaire afin d'assurer une gestion efficace des priorités, des ressources financières et humaines. Ils visent à limiter les risques d'efforts ou de travail non ciblés et favorisent une concertation de l'équipe de projet. Les trois stades de réalisation sont : (1.0) la préparation du projet; (2.0) la mise en œuvre du projet; et (3.0) le bilan du projet.

Le stade de préparation du projet contient 3 phases : (1.1) étude d'opportunité; (1.2) conception; (1.3) préparation des plans et devis et libération des emprises. (1.1) La première étape de l'étude d'opportunité est l'étude des besoins (1.1.1). L'objectif est d'établir la nécessité d'une intervention et de dresser un portrait global de la situation et du milieu récepteur, afin d'identifier globalement les enjeux. Cette étude est basée généralement sur des données géomatiques et d'études antérieures réalisées sur le site ou à proximité. À la suite de cette étape, le point de contrôle 0 (PC-0) vise à prendre une décision sur la nécessité d'intervenir. La seconde étape de l'étude d'opportunité est l'étude des solutions (1.1.2). L'objectif est d'identifier sommairement des solutions adaptées au besoin, en tenant compte des contraintes techniques du site et en assurant une bonne insertion du projet potentiel dans le milieu humain et naturel. L'analyse et la comparaison des solutions sont basées sur les données colligées à l'étape (1.1.1) selon plusieurs axes d'analyse. À la suite de cette étape, le point de contrôle 1 (PC-1) vise à identifier les scénarios de mesures d'adaptation qui seront développés. (1.2) La première étape de la phase de conception est l'avant-projet préliminaire (1.2.1). L'objectif est d'analyser de manière approfondie différents scénarios de ou des solutions retenues au PC-1. L'étude d'impact (si requise en vertu de l'article 31.1 de la LQE) est réalisée à cette étape. À la suite de cette étape ainsi qu'après l'obtention d'un décret en présence d'une étude d'impacts et de l'autorisation de la Commission de protection du territoire agricole du Québec si applicable, le point de contrôle 2 (PC-2) vise à retenir le meilleur scénario. La seconde étape de la phase de conception est l'avant-projet définitif (1.2.2). L'objectif est d'optimiser la conception du scénario retenu au PC-2 en analysant différentes variantes. À la suite de cette étape, le point de contrôle 3 (PC-3) vise à confirmer la poursuite du projet.

(1.3) La première étape de la phase de préparation des plans et devis et libération des emprises est le développement des plans et devis préliminaires

(1.3.1). L'objectif est de réaliser une première version des plans et devis. À la suite de cette étape, le point de contrôle 4 (PC-4) vise à évaluer la progression des plans et devis de même que valider leur conformité face aux objectifs initiaux du projet. La seconde étape de préparation des plans et devis et libération des emprises est le développement des plans et devis définitifs (1.3.2). L'objectif est de compléter les multiples démarches amorcées. À la suite de cette étape, le point de contrôle 5 (PC-5) vise à obtenir l'approbation du projet en vue de l'appel d'offres.

Le stade de mise en œuvre du projet contient 1 phase : (2.1) construction. Les deux étapes de la construction sont l'avant-travaux (2.1.1) et les travaux (2.1.2). Les objectifs de ces deux étapes sont d'obtenir le plan de surveillance et le plan qualité de mise en œuvre des travaux et de démarrer le chantier. À la suite de ces étapes, le point de contrôle 6 (PC-6) vise à présenter le bilan de la mise en œuvre du projet.

Le stade de bilan du projet contient une phase et une étape d'évaluation (3.1 et 3.1.1). L'objectif de ce stade est l'évaluation de l'atteinte des objectifs en matière de sécurité. À la suite de cette étape, le point de contrôle 7 (PC-7) vise à présenter les points positifs et négatifs du projet afin d'assurer une rétroaction efficace auprès des équipes de projets et des gestionnaires.

Tableau 5. Cheminement ministériel de la réalisation de projet routier au MTMD (Stade de réalisation**, phases, *étapes*, éléments d'analyse)**

1.0 Préparation du projet	
1.1 Étude d'opportunité	
1.1.1 Étude des besoins	
Milieu naturel et humain	Milieux humides, zone inondable, espèces en péril, espèces envahissantes, sites archéologiques et historiques, type cours d'eau, habitat et passage du poisson, zone agricole, habitat réglementé, milieu côtier d'intérêt, tenure des terres, terrain contaminé.
Dynamique côtière	Vent, marée, vagues, érosion et submersion.
Liaison avec le milieu	Identification des parties prenantes externes, évaluation du besoin de consultation autochtone, contact avec les représentants de la municipalité.
Aspects physiques	État de la chaussée, géométrie des lieux, structures, géologie, drainage, signalisation, hydraulique, géotechnique, données sur la gestion des transports, services publics, infrastructures, circulation, sécurité et corridors routiers.
1.1.2 Étude des solutions	
Milieu naturel et humain	Estimation des contraintes, des besoins d'étude d'impact et CPTAQ.
Liaison avec le milieu	Rencontre municipalité et autres parties prenantes selon besoins et perceptions des besoins, évaluation possibilités acquisition et expropriation, consultation autochtone.
Estimation des coûts	Estimation du budget, analyse avantages-coûts.
Aspects techniques	Faisabilité, échéancier, études et avis sectoriels.
1.2 Conception	
1.2.1 Avant-projet préliminaire	
Milieu naturel et humain	Identification besoins d'études et des autorisations environnementales. Avis de projet (si ÉI), mandat études : caractérisation milieux physiques, biologiques et humains.
Liaison avec le milieu	Rencontre municipalité, consultations publiques et autochtones.
Estimation des coûts	Évaluation des coûts d'acquisition/expropriation.
Aspects techniques	Faisabilité, échéancier, études et avis sectoriels : déplacement services publics, géotechnique et géologie, hydraulique, structures, architecture du paysage, signalisation routière, gestion de la circulation, éclairage et feux de signalisation.
1.2.2 Avant-projet définitif	
Milieu naturel et humain	Mise à jour des enjeux environnementaux (empiétement milieux hydriques et humides), mesures d'atténuation.
Estimation des coûts	Estimation finale : acquisition, déplacement services publics, structures, architecture du paysage, signalisation, gestion signalisation (travaux), éclairage.
Aspects techniques	Optimisation du scénario identifié

Tableau 5 (suite). Cheminement ministériel de la réalisation de projet routier au MTMD (Stade de réalisation, phases, *étapes*, éléments d'analyse)

1.3 Préparation des plans et devis et libération des emprises	
1.3.1 Plans et devis préliminaires	
Milieu naturel et humain	Devis et Clauses environnementales. Si soumis autorisation ministérielle selon LQE (AM22) : demandes d'autorisations CPTAQ, LCPN, interventions archéologiques, caractérisation sols contaminés phase 2 ou 3 au besoin. Amorce des procédures législatives au gouvernement fédéral (LPEN, LP). Recherche de projet de compensation au besoin.
Liaison avec le milieu	Plan de communication des travaux auprès des usagers, décret d'expropriation.
Estimation des coûts	Vérification du plan d'acquisition, Visite et ordre de déplacement.
Aspects techniques	Production des plans et devis et bordereaux préliminaires.
1.3.2 Plans et devis définitifs	
Milieu naturel et humain	Dépôt demande autorisation ministérielle selon LQE (AM 22), Devis 185, démarches autorisation : finalisation avec gouvernement fédéral (LPEN, LP) et projet de compensation au besoin.
Estimation des coûts	Plans et devis définitifs, Libération des emprises et déplacement services publics, plan final gestion circulation.
Aspects techniques	Bordereaux définitifs.
2.0 Mise en œuvre	
2.1 Construction	
2.1.1 Avant travaux	
Milieu naturel et humain	Vérification du Plan d'action de protection de l'Environnement de l'entrepreneur
Aspects techniques	Plan de surveillance
Aspects économiques	Appel d'offres, signature des marchés
2.1.2 Travaux	
Milieu naturel et humain	Visites de chantier et surveillance environnementale
Liaison avec le milieu	Avis des travaux et exécution dans le respect des exigences, Rapport de contrôle et d'inspection, conformité, suivi
Aspects techniques	Avis et réception des ouvrages, paiement
Aspects économiques	Informations et communications partenaires et usagers
3.0 Bilan du projet	
3.1 Évaluation	
3.1.1 Évaluation	
Milieu naturel et humain	Suivi environnemental post-intervention, réalisation des projets de compensation
Aspects techniques	Rapports finaux d'évaluation et étude de sécurité

4 OUTIL D'ÉVALUATION DES MESURES D'ADAPTATION AUX ALÉAS CÔTIERS

L'évaluation des mesures d'adaptation aux aléas côtiers (MAAC) est basée sur deux méthodes, soit un algorithme d'évaluation et une analyse multicritère (figure 2). Ainsi, en combinant les résultats de l'algorithme d'évaluation avec l'analyse multicritère, l'évaluation proposée permet de hiérarchiser les MAAC, adaptés à un milieu donné, au regard de leur impact sur l'état initial du SSEC et de la pondération attribuée par les acteurs. Le développement de l'algorithme d'évaluation et la méthode d'analyse multicritère utilisée sont présentés dans les prochaines sous-sections. Les résultats de la démarche globale sont présentés à la section 5 pour cinq secteurs d'étude.

Figure 2. Schématisation de l'évaluation des ouvrages de protection côtière

4.1 Développement de l'algorithme d'évaluation des effets géomorphologiques, écosystémiques et culturels des OPC

L'algorithme d'évaluation des OPC a été développé afin de :

i. réaliser une méta-analyse dynamique des effets des OPC sur les SSEC;
ii. répertorier et structurer les connaissances scientifiques tirées de la littérature scientifique;
iii. évaluer, comparer et hiérarchiser les OPC dans différents contextes environnementaux côtiers;
iv. fournir de l'information utile pour le processus décisionnel et la conception (Sauvé *et al.*, 2022a).

Une synthèse graphique de l'algorithme d'évaluation est présentée à la figure 3. Premièrement, l'algorithme d'évaluation est basé sur l'évaluation des énoncés d'effets d'OPC observés par les auteurs (figure 4). Deuxièmement, l'utilisateur choisit, à partir d'une liste, les caractéristiques environnementales pertinentes et les OPC à évaluer. Troisièmement, l'algorithme d'évaluation est exécuté en trois étapes qui mène à l'évaluation et à la hiérarchisation des OPC.

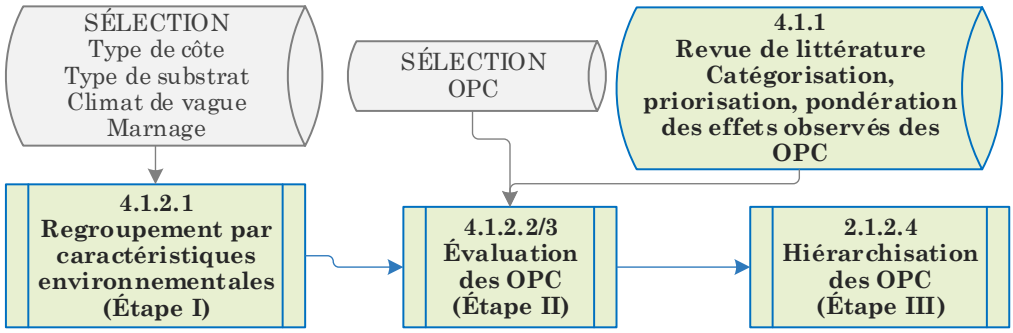

Figure 3. Synthèse graphique de l'algorithme d'évaluation des ouvrages de protection côtière

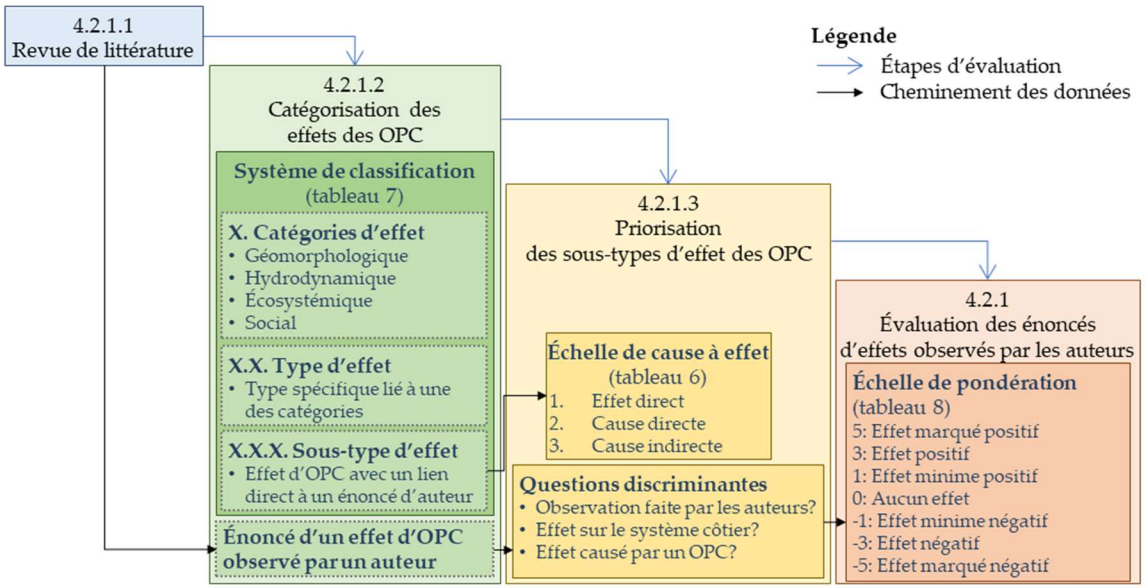

Figure 4. Schéma logique de l'évaluation des énoncés d'effets d'OPC observés par les auteurs

4.1.1 Évaluation des énoncés d'effets d'OPC observés par les auteurs

L'évaluation des effets des OPC est basée sur (i) une revue de littérature, (ii) une catégorisation des effets des OPC et (iii) la priorisation des sous-types d'effets des OPC.

4.1.1.1 Revue de littérature

Une revue de littérature des études de cas d'OPC a été réalisée afin d'identifier les effets observés sur le SSEC par les auteurs.

Les publications ont été répertoriées sur les moteurs de recherche *Scopus*, *Web of Science* et *Google scholar*. Les mémoires de maîtrise, les thèses de doctorat ainsi que les rapports de recherche ont également été intégrés dans la revue de littérature. La recherche a été limitée à des publications entre 1970 et le 1er juillet 2020.

Un processus de filtration en trois étapes a été utilisé pour identifier les publications sur les ouvrages de protection, pour lesquels, il y a eu un suivi des effets environnementaux dans la zone côtière :

- Étape 1 : sélection des études de cas basées sur des mesures terrain ou modélisées;
- Étape 2 : pour les publications retenues à l'étape 1, une sélection des publications qui effectue une évaluation d'un ou de plusieurs effets géomorphologiques, hydrodynamiques, écologiques ou socio-économiques d'OPC sur le système côtier, était effectuée;
- Étape 3 : pour les publications retenues à l'étape 2, une sélection des publications, si la réponse était positive pour les trois questions suivantes :
    1) est-ce que la publication contient une observation faite par l'auteur?;
    2) si oui, est-ce que l'énoncé observé par l'auteur est un effet sur le SSEC?;
    3) si oui, est-ce que l'effet observé par l'auteur est provoqué par un OPC ?

Un total de 411 publications ont été retenues; elles contiennent 1709 énoncés d'effets d'OPC observés. Une base de données à trois niveaux a été développée afin de compiler l'information tirée des différentes publications (tableau 6) : (1) détails de la publication; (2) caractéristiques environnementales des sites d'étude; (3) description des effets observés des OPC. Ainsi, une publication (niveau 1) pouvait intégrer plusieurs milieux (niveau 2) et plusieurs effets observés (niveau 3) pouvaient être associés à chacun de ces milieux.

Tableau 6. Information relevée dans chacun des articles consultés

Niveau 1 : Détails de la publication
Auteurs, titre, année de publication, revue
Niveau 2 : Caractéristiques environnementales des sites d'étude*
Type d'étude (mesures terrain, modélisation physique ou numérique), pays, région, lieu, type de côte, type de sédiment, caractéristiques des marées, des vagues et des courants
Niveau 3 : Description des effets observés des OPC
Type d'OPC étudié, effets observés, énoncé textuel de l'auteur, cause de l'effet observé identifié par les auteurs, zone de l'effet observé

* Si une publication contenait plus d'un site d'étude, chacun était entré individuellement dans le niveau 2.

L'information disponible dans une publication était transcrite intégralement, chaque énoncé d'effet observé représentant une entrée dans le niveau 3 de la base de données. Une fois les énoncés inscrits dans la base de données, elles ont été homogénéisées en fonction de systèmes de classification adaptés aux différents types d'informations. Ces systèmes de classification sont présentés dans les sous-sections suivantes.

4.1.1.2 Catégorisation des effets des OPC

Un système de classification des effets observés à trois niveaux a été développé pour faciliter la recherche et l'analyse des énoncés inscrits dans la base de données (tableau 7) :

1. catégories d'effet observé;
2. types d'effet observé;
3. sous-types d'effet observé.

Les catégories d'effet observé permettent de faire un premier tri parmi les différents énoncés : géomorphologique, hydrodynamique, écologique ou social. Les types d'effet observé permettent de regrouper les énoncés selon un type précis d'effet observé. Les sous-types d'effets observés sont associés directement à l'énoncé de l'auteur. Le tableau 7 présente également le niveau sur l'échelle de cause à effet accordé à chaque type d'effet observé (tableau 8).

Tableau 7. Système de catégorisation (catégorie**, type, sous-type d'effet observé) et priorisation des sous-types d'effets observés**

Catégorisation des effets observés	Description	Échelle de cause à effet (voir section 4.1.1.3)			
		Géo	Éco	Soci	Explication du niveau attribué (voir tableau 8)
1. Géomorphologique		-	-	-	
1.1. Érosion / Accumulation		-	-	-	
1.1.1. Accumulation sédimentaire	Dépôt de sédiments dans certaines zones	1	2	2	**Géo** : **effet direct (1)** - Observation directe du phénomène d'érosion ou d'accumulation côtières. **Éco** : **Cause directe (2)** - Modification de la surface colonisable disponible. Modification structurelle de la zone colonisable. **Socio** : **Cause directe (2)** - Modification de la superficie disponible pour les loisirs terrestres
1.1.2. Affouillement	Forme d'érosion au pied d'un OPC provoqué par des forces hydrodynamiques	1	2	2	
1.1.3. Bilan sédimentaire	Variation du volume sédimentaire disponible à l'échelle d'une cellule hydrosédimentaire	1	2	2	
1.1.4. Déplacement du trait de côte	Recul ou avancée du trait de côte	1	2	2	
1.1.5. Effet de bout	Augmentation des taux d'érosion à l'extrémité d'un OPC	1	2	2	
1.1.6. Érosion	Constat d'une érosion côtière généralisée (recul du trait de côte, diminution de la hauteur et de la largeur de la plage)	1	2	2	
1.1.7. Hauteur de plage	Variation du niveau de la plage	1	2	2	
1.1.8. Largeur de plage	Variation de la largeur de la plage	1	2	2	
1.1.9. Rétablissement géomorphologique	Interférence de l'OPC sur le cycle naturel érosion/accumulation de la plage	1	2	2	
1.1.10. Rétention sédimentaire	Interférence des conditions hydrodynamiques par l'OPC engendrant des zones d'accumulation et d'érosion successives	1	2	2	
1.2. Profil topo-bathymétrique		-	-	-	
1.2.1. Profil de plage	Variation de l'inclinaison, de la pente du substrat ou du profil d'équilibre	3	2	0	**Géo** : **Cause indirecte (3)** - déplacements sédimentaires submergés associés à une modification des conditions hydrodynamiques **Éco** : **Cause directe (2)** - Paramètre majeur pour la
1.2.2. Système de barres	Formation ou disparition de barres d'avant-plage	3	2	0	
1.2.3. Topographie	Variation de l'élévation de la côte en général	3	2	0	
1.2.4. Variation bathymétrique généralisée	Modification de la bathymétrie en général	3	2	0	

Catégorisation des effets observés	Description	Échelle de cause à effet (voir section 4.1.1.3)			
		Géo	Éco	Soci	Explication du niveau attribué (voir tableau 8)
1.2.5. Variation bathymétrique localisée	Formation locale d'une dépression (creux, affouillement sous-marin au pied d'une structure) ou d'une accumulation	3	2	0	structure des communautés
1.3. Sédiments		-	-	-	
1.3.1. Compaction sédimentaire	Modification de la compaction des sédiments	0	0	2	**Socio** : **Cause directe (2)** - Modification aux loisirs terrestres
1.3.2. Nature sédimentaire	Modification de la composition chimique des sédiments	0	0	0	
1.3.3. Redistribution granulo-métrique	Redistribution des sédiments sur le profil de plage selon leur taille granulométrique	0	2	0	**Éco** : **Cause directe (2)** - Affecte la faune épi- et endo- benthique en général Favorise l'émigration des organismes Modification des capacités de fouissage. **Socio** : **Cause directe (2)** - Modification aux conditions des loisirs terrestres
1.3.4. Taille granulo-métrique	Modification de la taille granulométrique des sédiments en général	0	2	2	
1.3.5. Mise en suspension	Mise en suspension des sédiments dans la colonne d'eau	0	2	0	**Éco** : **Cause directe (2)** - Affecte les processus photosynthétiques Affecte les prédateurs qui chassent grâce au visuel Peut boucher les appareils de filtration des organismes filtreurs
1.4. Transport sédimentaire		-	-	-	
1.4.1. Dispersion sédimentaire	Modification favorisant la répartition des sédiments	2	2	0	**Géo** : **Cause directe (2)** - L'interception du transport sédimentaire est une cause d'érosion (Bird, 2008) **Éco** : **Cause directe (2)** - Le transport sédimentaire peut enterrer les organismes.
1.4.2. Transport longitudinal	Modification du transport sédimentaire parallèle à la côte	2	2	0	
1.4.3. Transport sédimentaire général	Modification du transport sédimentaire (sans mentionner de direction)	2	2	0	
1.4.4. Transport transversal	Modification du transport perpendiculaire à la côte	2	2	0	
2. Hydrodynamique		-	-	-	
2.1. Caractéristiques des vagues		-	-	-	
2.1.1. Angle des vagues	Modification de l'angle des vagues incidentes	2	0	0	**Géo** : **Cause directe (2)** - Un changement de l'angle d'incidence est une cause d'érosion (Bird, 2008)

Catégorisation des effets observés	Description	Échelle de cause à effet (voir section 4.1.1.3)			
		Géo	Éco	Soci	Explication du niveau attribué (voir tableau 8)
2.1.2. Régime de vagues	Modifications aux caractéristiques du régime de vagues	2	0	0	
2.2. Courants		-	-	-	
2.2.1. Circulation	Modification de la circulation de l'eau en général (eddy current, courants circulaires, etc.)	3	2	0	**Géo** : **Cause indirecte (3)** - Déplacement des sédiments par les courants longitudinaux et transversaux, et par la circulation hydrique à proximité de la côte (Bird, 2008). **Éco** : **Cause directe (2)** - Modification potentiel des apports en nourriture et la dispersion des propagules par les courants.
2.2.2. Courants transversaux	Modification des courants transversaux vers le large ou la côte	3	2	0	
2.2.3. Dérive littorale	Modification des courants parallèles au rivage	3	2	0	
2.2.4. Courants de marée	Modification des courants causés par la variation du niveau de l'eau	0	2	0	
2.2.5. Courants d'arrachement	Création ou modification de courants d'arrachement	3	2	2	**Socio** : **Cause directe (2)** - Engendre un risque de noyade pour les baigneurs (Bird, 2008)
2.3. Eaux souterraines		-	-	-	
2.3.1. Épaisseur de la zone de plage non saturée	Modification de l'épaisseur de la zone non saturée	2	0	0	**Géo** : **Cause directe (2)** - Une plage saturée est plus sujette à l'érosion (Bird, 2008).
2.3.2. Infiltration/ Percolation	Modification de l'infiltration et de la percolation de l'eau à la surface de la plage	2	0	0	
2.3.3. Niveau de la nappe phréatique	Modification du niveau de la nappe phréatique	2	0	0	
2.4. Jet de rive		-	-	-	
2.4.1. Backwash/ Swash	Modification de l'incidence de la dissipation de la vague sur la plage (monté (swash/uprush) ou de la descente (backswash/downrush))	2	0	0	**Géo** : **Cause directe (2)** - Modification de la dissipation des vagues affectant ultimement le transport sédimentaire.
2.4.2. Franchisse-ment	Passage d'eau par-dessus un OPC	2	0	0	
2.4.3. Run-up	Modification du niveau atteint par une vague (run-up ou set-up)	2	0	0	
2.5. Processus de dissipation		-	-	-	
2.5.1. Déferlement	Modification du processus de déferlement des vagues	2	2	0	**Géo** : **Cause directe (2)** - Augmentation de l'énergie et de la réflexion des vagues sont une
2.5.2. Diffraction	Modification du phénomène de diffraction	2	2	0	

Catégorisation des effets observés	Description	Échelle de cause à effet (voir section 4.1.1.3)			
		Géo	Éco	Soci	Explication du niveau attribué (voir tableau 8)
2.5.3. Énergie des vagues	Modification en générale de la dissipation de l'énergie des vagues	2	2	0	cause d'érosion (Bird, 2008) **Éco** : **Cause directe (2)** - Délogement/arrachage et abrasion des organismes.
2.5.4. Hauteur de vagues	Modification de la hauteur des vagues	2	2	0	
2.5.5. Réflexion	Modification de la réflexion des vagues	2	2	0	
2.5.6. Transmission	Modification de la transmission des vagues, soit le passage d'une partie de l'énergie de l'eau par-dessus un OPC.	2	2	0	
2.5.7. Réfraction	Modification de la réfraction des vagues	3	2	0	**Géo** : **Cause indirecte (3)** - Résultat de changements bathymétriques
3. Écologique		-	-	-	
3.1. Biocénose		-	-	-	
3.1.1. Biocénose qualitative	Modifications qualitatives de la biocénose d'un écosystème (présence/absence d'espèce, richesse, assemblages, diversité, indices d'oiseaux, espèces non indigènes, diversité génétique des organismes, perte d'espèce)	0	1	0	**Éco** : **effet direct (1)** - Observation d'une variation de la biocénose
3.1.2. Biocénose quantitative	Modifications quantitatives de la biocénose d'un écosystème (abondance, densité, concentration en chlorophylle a, pourcentage de couverture des herbiers)	0	1	0	
3.2. Biotope		-	-	-	
3.2.1. Modification physico-chimique	Modification du biotope en termes de physico-chimie (humidité, température, pH, turbidité et qualité de l'eau)	0	3	0	
3.2.2. Modification structurelle	Modification du biotope en termes de structure (perte d'habitat, changement de type d'habitat, apparition de zone de sédiment nu, modification de la végétation ou de l'ombrage)	0	3	0	
3.2.3. Mouvement de la ressource	Modification du mouvement de la ressource	0	3	2	
3.2.4. Quantité et qualité de la ressource	Modification de la quantité et de la qualité de la ressource	0	3	0	
3.3. Processus biologiques		-	-	-	
3.3.1. Fonction de croissance	Modification de la fonction de croissance des organismes	0	2	0	

Catégorisation des effets observés	Description	Échelle de cause à effet (voir section 4.1.1.3)			
		Géo	Éco	Soci	Explication du niveau attribué (voir tableau 8)
	(croissance, biomasse et biométrie)				
3.3.2. Fonction de locomotion	Modification de la fonction de locomotion des organismes (mouvement et enterrement)	0	2	0	
3.3.3. Fonction de nutrition	Modification de la fonction de nutrition des organismes (nutrition et réserves)	0	2	0	
3.3.4. Fonction de reproduction	Modification de la fonction de reproduction des organismes (reproduction, indices de pontes et recrutement)	0	2	0	
3.3.5. Fonction de respiration	Modification de la fonction de respiration des organismes	0	2	0	
4. Social		-	-	-	
4.1. Pratique de loisirs		-	-	-	
4.1.1. Loisirs aquatiques côtiers	Loisirs pratiqués dans l'eau à proximité de la côte	0	0	1	**Socio** : **effet direct (1)** - Observation d'une modification directe à la pratique de loisirs
4.1.2. Loisirs terrestres	Loisirs pratiqués sur la côte	0	0	1	
4.2. Qualité socioculturelle		-	-	-	
4.2.1. Esthétisme	Modification du paysage/beauté du paysage	0	0	1	**Socio** : **effet direct (1)** - Observation d'une modification directe à la qualité socioculturelle
4.2.2. Qualité de vie	Modification de la qualité de vie des résidents	0	0	1	

4.1.1.3 Priorisation des sous-types d'effets des OPC

Les énoncés d'effet observé ont été hiérarchisés en fonction de leur sous-type (tableau 7, niveau 3) et pour les trois principales catégories d'effet observé (géomorphologique, écologique et social). D'abord, la hiérarchisation est basée sur une échelle de cause à effet à trois niveaux (L_n) : effet, cause directe et cause indirecte. Ainsi, le niveau 1 correspond à l'observation de l'effet direct d'un OPC. Le niveau 2 correspond à l'observation d'une cause menant directement à l'observation d'un effet (niveau 1). Le niveau 3 correspond à l'observation d'une cause indirecte. Le niveau 0 a été utilisé afin d'indiquer que la hiérarchisation n'est pas applicable au sous-type.

Une distinction a été faite entre les trois principales catégories d'effet observé (L_i) et la catégorie *hydrodynamique*, car cette catégorie ne présente aucun effet direct sur le système côtier. Les effets observés de catégorie hydrodynamique sont plutôt des causes, directes ou indirectes, d'un effet direct géomorphologique, écologique ou social.

Ainsi, pour chacune des trois principales catégories d'effet observé, une hiérarchisation des sous-types d'effet observé en fonction de l'échelle de cause à effet. Pour ces trois catégories d'effet observé, le tableau 8 présente ce qui a été considéré comme un effet direct, une cause directe et une cause indirecte.

Tableau 8. Échelle de cause à effet utilisée pour la hiérarchisation des effets observés

Niveau		Géomorphologique	Écosystème	Social
1	Effet direct	Observation de l'érosion ou de l'accumulation sédimentaire	Observation d'une variation de la biocénose	Observation d'une modification à la qualité socioculturelle ou à la pratique de loisirs
2	Cause directe	Phénomène favorisant l'érosion ou l'accumulation sédimentaire	Phénomène favorisant la variation de la biocénose	Phénomène favorisant la variation de la qualité socioculturelle ou à la pratique de loisirs
3	Cause indirecte	Phénomène qui survient dans le processus d'érosion côtière sans en être la cause directe.	Phénomène qui survient ayant un effet sur la biocénose sans en être la cause directe	Phénomène qui survient ayant un effet sur la qualité socioculturelle ou à la pratique de loisirs sans en être la cause directe.

4.1.1.4 Pondération des énoncés d'effets observés par les auteurs

L'importance des effets des OPC, tel qu'observés par les auteurs, a été évaluée selon une échelle de pondération qualitative, car la majorité des énoncés d'effet observé est présentée de manière qualitative. L'échelle de pondération est divisée en sept échelons allant de très négatif (-5) à très positif (+5) (tableau 9). Lorsque les résultats étaient présentés de manière quantitative dans l'énoncé d'observation, un ratio quantitatif a été utilisé pour transposer la valeur quantitative sur l'échelle qualitative (tableau 9, colonne 3). Ce ratio quantitatif est associé au pourcentage de changement observé par l'auteur ou par une estimation du changement basée sur les données présentes dans la publication.

Tableau 9. Échelle de pondération de base pour l'évaluation de l'effet d'un OPC sur le milieu

Échelon	Description	Ratio quantitatif	Exemples
5	Effet marqué positif de l'OPC sur le milieu par l'utilisation de termes amplificateurs ou une mention d'effet à long terme	> + 70%	*Efficiently traps sediment*, *Abundance of sediment in front of geotube LCBs*, *Significant sand accumulation*, l*ong term flanking effects*
3	Effet observé positif de l'OPC sur le milieu	40 - 70%	*wave energy is approximately reduced by 50%*, *control sediment transport*
1	Effet minime positif de l'OPC sur le milieu par l'utilisation de termes qui limitent ou une mention associée à une tendance	10 - 40%	*tends to cause accumulation, indeed covered by a thick layer of sediment*
0	Aucun effet de l'OPC sur le milieu	-10 - 10%	*No evidence of accretion*
-1	Effet minime négatif de l'OPC sur le milieu par l'utilisation de termes qui limitent ou une mention associée à une tendance	-10 - -40%	*minimizing the downdrift erosion associated with the groin*
-3	Effet observé négatif de l'OPC sur le milieu	-40 - -70%	*Erosion of the beaches*, *Lowered elevation of the beach toe*
-5	Effet marqué négatif de l'OPC sur le milieu par l'utilisation de termes amplificateurs ou une mention d'effet à long terme	> -70%	*Strong wave reflection*, *Heavy erosion in the gaps between breakwater*
NA	Le changement cité n'est pas applicable, car non observé par l'auteur	-	*Potential for scour*, *severe scour can be experienced*

4.1.2 Fonctionnement de l'algorithme d'évaluation des OPC

L'objectif de l'algorithme d'évaluation est d'analyser les effets des OPC, au regard de caractéristiques environnementales spécifiques. L'exécution de l'algorithme d'évaluation est séparée en trois parties (figure 3). Dans la première partie, des regroupements sont créés à partir des caractéristiques environnementales sélectionnées par l'utilisateur. Chaque regroupement est composé d'une des caractéristiques environnementales de chacun des quatre types (TC, TS, TM, TV, tableau 10). Dans la deuxième partie, pour chaque OPC et pour chaque regroupement (partie I), une correspondance est établie avec les caractéristiques environnementales présentes dans la base de données. Les effets des OPC observés dans le contexte environnemental associé sont retenus par l'algorithme et évalués selon leur catégorie et leur poids. Dans la troisième partie, les OPC sont hiérarchisés selon l'évaluation réalisée dans la partie II.

L'algorithme d'évaluation des OPC a été développé sur *Visual Basic for Applications* sur *Microsoft Excel* ©. Cette plateforme a été choisie pour son

accessibilité. Dans les prochaines sections, les mots entre crochets sont des fonctions ou des variables de l'algorithme.

4.1.2.1 Regroupement des caractéristiques environnementales (étape I)

La première étape de l'algorithme d'évaluation des OPC est une sélection manuelle, par l'utilisateur, de caractéristiques environnementales à partir de quatre listes préétablies qui comprennent un ensemble fini d'éléments (figure 5 et tableau 10). Pour chaque type, l'utilisateur peut sélectionner un nombre quelconque d'éléments parmi l'ensemble fini. Selon la sélection de l'utilisateur, la première étape de l'algorithme d'évaluation est la création de regroupements de caractéristiques environnementales qui définissent les conditions dans lesquelles les OPC seront évalués.

Ces regroupements sont composés d'un élément de chaque caractéristique environnementale : type de côte [TC], type de substrat [TS], marnage [TM] et énergie des vagues [TV]. L'algorithme combine chaque caractéristique environnementale d'un type avec une caractéristique de chacun des trois autres types (figure 5 et tableau 10). Cette action est répétée jusqu'à ce que toutes les combinaisons possibles soient réalisées, formant ainsi potentiellement plusieurs regroupements.

Une sélection manuelle du module d'évaluation [ME] et des OPC est également effectuée. L'utilisateur peut choisir deux modules d'évaluation : géomorphologique et services écologiques. Les deux modules peuvent être choisis simultanément. L'utilisateur peut sélectionner un nombre quelconque d'OPC parmi l'ensemble fini.

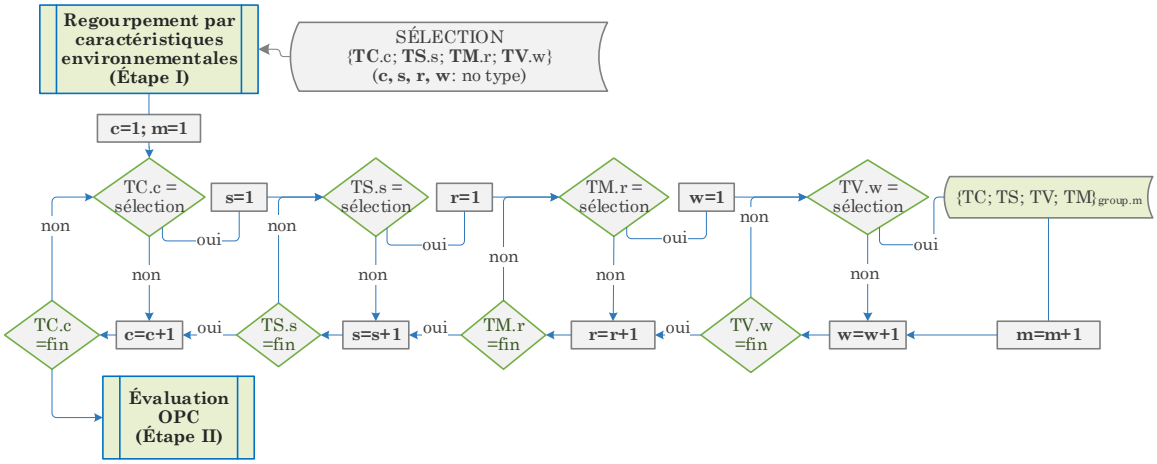

Figure 5. Procédure algorithmique pour le regroupement des caractéristiques environnementales

Tableau 10. Exemple de regroupements de caractéristiques environnementales selon les sélections hypothétiques d'un utilisateur

Caractéristiques environnementales	Sélections de l'utilisateur	Regroupements
Type de côte	• Flèche littorale (FL) • Falaise meuble (FM)	Reg 1 (FL, S, FE, Micro) Reg 2 (FL, G, FE, Micro) Reg 3 (FM, S, FE, Micro) Reg 4 (FM, G, FE, Micro)
Type de substrat	• Sable (S) • Gravier (G)	
Énergie des vagues	• Faible énergie (FE)	
Marnage	• Microtidal (Micro)	

L'élément central de l'algorithme est divisé en deux types de champs :

(i) champ de caractérisation qui contient une liste de caractéristiques environnementales [`TC, TS, TM, TV`] avec un OPC et un module d'évaluation;
(ii) champs d'enregistrement des résultats qui contient une liste de critère d'évaluation (tableau 11).

Pour chaque OPC sélectionné par l'utilisateur, une évaluation est réalisée pour chaque regroupement de caractéristiques environnementales. Les résultats de l'évaluation sont compilés dans les champs d'enregistrement des résultats. L'algorithme est composé de trois boucles principales : module d'évaluation (géomorphologique et services écologiques [`ME`], OPC [`OPC.k`] et regroupement [`ens.reg.m`]. La relation entre les trois boucles peut être décrite ainsi : pour chaque module d'évaluation, l'évaluation de chaque OPC est réalisée au regard des caractéristiques environnementales de chaque regroupement ($ME.p \subseteq OPC.k \subseteq group.m$). Les champs de stockage des résultats permettent donc d'enregistrer les résultats des différentes analyses pour ultimement établir une hiérarchisation des OPC pour chacun des regroupements.

Tableau 11. Champs de la liste des critères

Champs de caractérisation	Champs d'enregistrement des résultats
- Regroupement de caractéristiques environnementales `group.m` - Type de côte `TC` - Type de substrat `TS` - Marnage `TM` - Type de vagues `TV` - Ouvrage de protection côtière `OPC` - Module d'évaluation `ME`	- Nombre d'effets observés `nb_EO` - Degré d'élargissement des caractéristiques environnementales atteint `e` - Indice de correspondance `IC` - Atteinte du pourcentage seuil `pct.seuil` - Moyenne de pondération `moy.pond` - Position de l'OPC dans la hiérarchisation pour un regroupement donné

Selon la sélection de l'utilisateur, deux modules d'évaluation peuvent être lancés : module géomorphologique (4.1.2.2) et module services écologiques (4.1.2.3).

4.1.2.2 Évaluation des OPC – module géomorphologique (étape II.a)

La deuxième étape de l'algorithme est le processus d'évaluation des OPC (figure 6). Pour chacun des OPC et pour chacun des regroupements de caractéristiques environnementales sélectionnés par l'utilisateur (étape 1), une correspondance est établie avec les caractéristiques environnementales similaires présentes dans la base de données [`FCT nb.Effet.Obs`], puis le nombre d'occurrences d'effet observé associé à ces caractéristiques environnementales [`nb.EO`] est compté.

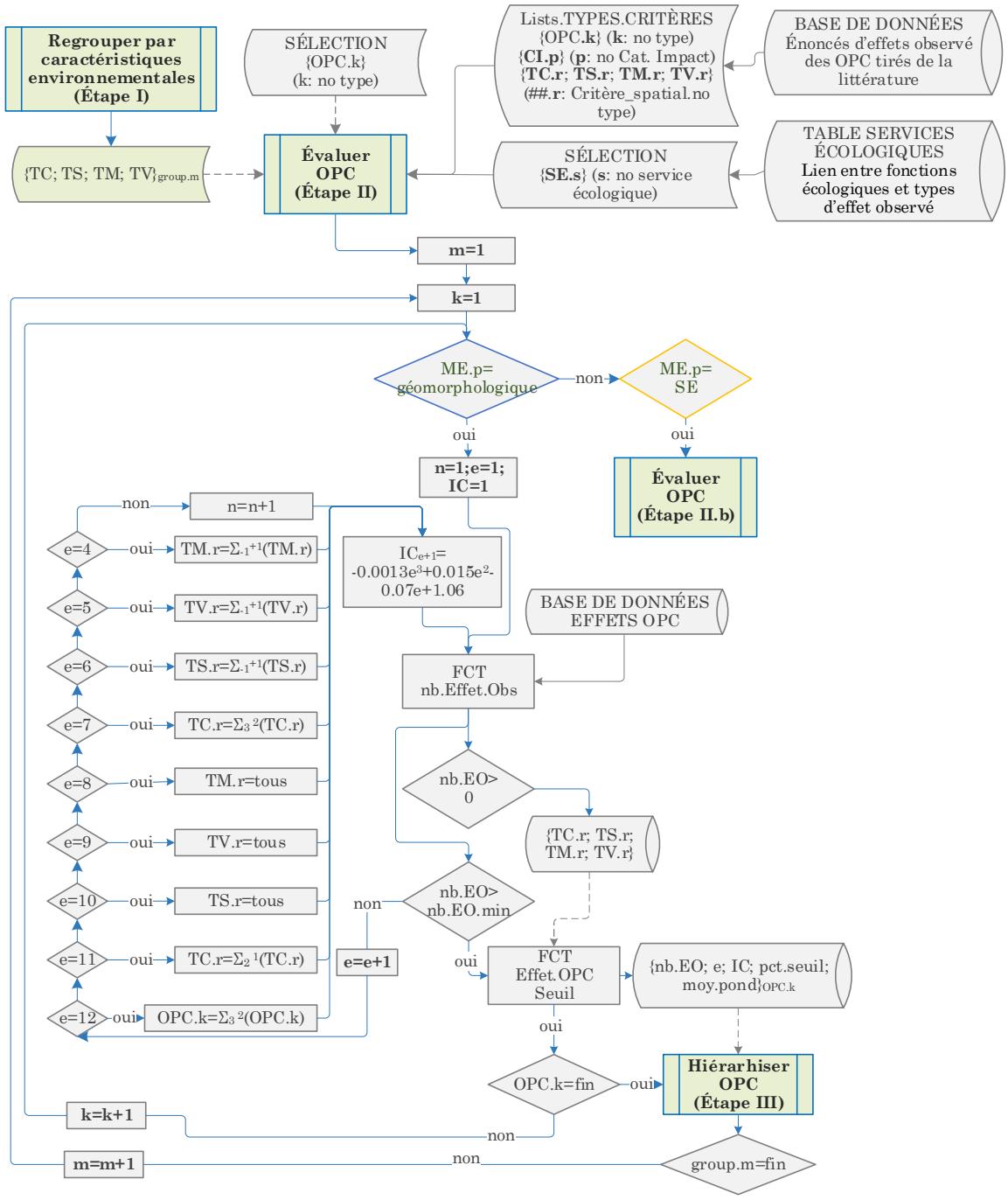

Figure 6. Schématisation du module d'évaluation géomorphologique des ouvrages de protection côtière

Le décompte des effets des OPC observés défini la précision des connaissances scientifiques disponibles dans un contexte environnemental

côtier spécifique, de manière à déterminer la pertinence de cette information dans le processus décisionnel. L'objectif de la fonction [FCT nb.Effet.Obs] est d'extraire de la base de données et d'enregistrer dans un tableau secondaire les effets observés d'un OPC [OPC.k], en association avec les caractéristiques environnementales et d'en compter le nombre d'occurrences. Trois avenues sont possibles en fonction du nombre d'effets observés comptés :

- Si le nb.EO est supérieur à 0, les caractéristiques environnementales (TC, TS, TM, TV) associées sont enregistrées dans un tableau secondaire.
- Si le nb.EO est supérieur à un nombre minimal d'effets observés [nb.EO.min] déterminés par l'équation (1), l'évaluation des OPC est basée sur le contenu de ce tableau secondaire. Les résultats de l'évaluation sont enregistrés dans les champs d'enregistrement des résultats (tableau 11).
- Si le nb.EO est inférieur à nb.EO.min, un élargissement ([e], tableau 12) des caractéristiques environnementales initiales est réalisé ce qui engendre une diminution de l'indice de correspondance ([IC], équation 2), soit un indicateur d'incertitude. Le nb.EO est recompté suite au processus d'élargissement. Cette boucle est exécutée jusqu'à ce que nb.EO soit plus élevé que nb.EO.min ou jusqu'à ce que le degré l'élargissement le plus élevé ait été atteint. Dans le dernier cas, si nb.EO est inférieur à nb.EO.min, l'OPC est rejeté de l'évaluation.

La hiérarchisation des OPC (étape 3) est réalisée lorsque chaque OPC sélectionné, par l'utilisateur, a été évalué en fonction de chaque regroupement de caractéristiques environnementales.

Le nb.EO.min, utilisé comme seuil acceptable pour le processus décisionnel, est calculé sur la base du nombre total d'effets observé [nb.EO.tot] pour un OPC dans le contexte de la catégorie de côte associée au type de côte initial (tableau 11). Par exemple, si le type de côte [TC] initialement sélectionné est une terrasse de plage, le nb.EO.tot sera calculé sur la base de tous les types de côte dans la catégorie « côte meuble » (terrasse de plage, dune, flèche littorale, ile barrière et falaise meuble). Une fois calculé, le nb.EO.min est utilisé pour déterminer, si un élargissement des caractéristiques environnementales initiales est nécessaire ([e], tableau 12).

Le calcul de nb.EO.min, est basé sur une équation qui représente un ratio d'atténuation, entre le nb.EO.min et le nb.EO.tot (équation 1). Cette équation a été développée par l'équipe de recherche, de manière à obtenir une valeur de ratio élevé (environ 0,3) lorsque le nb.EO.tot est faible (entre 0 et 20) et une atténuation progressive de cette valeur, qui converge vers un ratio de

0,14, lorsque `nb.EO.tot` est élevé (environ 350). Ainsi, un ratio plus faible entraine une limitation du `nb.EO` intégrés dans l'évaluation des OPC, tout en assurant une meilleure association de ces `nb.EO` aux caractéristiques environnementales du site d'étude.

$$nb.EO.min = -0{,}0005 \cdot nb.EO.tot^2 + 0{,}32 \cdot nb.EO.tot - 0{,}5 \quad \text{Équation 1}$$

$$IC = -0{,}0013e^3 + 0{,}015e^2 - 0{,}07e + 1{,}06 \quad \text{Équation 2}$$

Les connaissances scientifiques sur les effets des différents types d'OPC ne sont pas complètes dans l'ensemble des types d'environnement côtier (Sauvé *et al.*, 2023a). Une équation a été développée pour élargir l'applicabilité des connaissances disponibles aux caractéristiques environnementales sélectionnées par l'utilisateur. Cette opération entraine une diminution progressive de la précision des résultats. De manière à élargir progressivement les caractéristiques environnementales initiales intégrées dans l'évaluation, 12 degrés d'élargissement des caractéristiques environnementales initiales ont été définis et validés par une analyse de sensibilité (tableau 12).

La partie supérieure des degrés d'élargissement [`e = 1 à 3`] est occupée par chacun des trois niveaux de l'échelle de cause à effet (tableau 3). La partie intermédiaire [`e = 4 à 10`] est occupée par l'élargissement du type de marnage, du type de vague, du type de substrat et d'un premier élargissement du type de côte. La partie inférieure [`e = 11 et 12`] est occupée par un second élargissement du type de côte et du type d'OPC.

Un indice de correspondance [`IC`] a été intégré à l'algorithme d'évaluation pour caractériser l'incertitude de l'information utilisée dans l'évaluation des OPC. L'`IC` a une valeur initiale de 1. Cette valeur diminue progressivement en fonction d'une équation polynomiale (équation 2) qui est directement associée au degré d'élargissement [`e`]. Cette équation a été développée pour représenter une diminution exponentielle de la précision entre les degrés d'élargissement des caractéristiques environnementales initiales. Les paramètres de l'équation polynomiale au 3e degré ont été définis par une analyse visuelle.

`FCT effet.OPC` a été développée pour évaluer les effets des OPC en fonction de caractéristiques environnementales spécifiques. Premièrement, en relation avec les caractéristiques environnementales sélectionnées par `FCT nb.EO` et enregistrées dans le tableau secondaire, `FCT Effet.OPC` compte le `nb.EO` pour chaque échelon de l'échelle de pondération (-5 à 5, tableau 9). Deuxièmement, `FCT effet.OPC` classifie et compte le nombre d'effets observés par sous-type, type et catégorie (tableau 7). Ainsi, la somme d'un sous-type équivaut au total du type correspondant, puis la somme du type équivaut au total de la catégorie correspondante.

Tableau 12. Variation des degrés d'élargissement des caractéristiques environnementales initiales

e	Description	Indice
1	Conditions initiales du regroupement analysé et effets directs observés. IC inchangé	n = n + 1
2	Conditions initiales du regroupement analysé et ajout des causes directes aux effets directs observés **(tableau 8)**	n = n + 1
3	Conditions initiales du regroupement analysé et ajout des causes indirectes aux causes directes et aux effets directs observés **(tableau 8)**	n = n + 1
4	Intégration des classes de marnage inférieures et supérieures immédiates à la classe initiale (**tableau 51**)	TM.r=Σ_{-1}^{+1}(TM.r)
5	Intégration des classes de régime de vague inférieures et supérieures immédiates à la classe initiale (**tableau 52**)	TV.r=Σ_{-1}^{+1}(TV.r)
6	Intégration des classes de type de substrat inférieures et supérieures immédiates à la classe initiale (**tableau 50**)	TS.r=Σ_{-1}^{+1}(TS.r)
7	Intégration de l'ensemble des classes de marnage (**tableau 51**)	TM.r=tous
8	Intégration de l'ensemble des classes de régime de vague (**tableau 52**)	TV.r=tous
9	Intégration de l'ensemble des classes de type de substrat (**tableau 50**)	TS.r=tous
10	Intégration de l'ensemble des sous-types de côtes dans le type de côte initial (tableau 49)	$TC.r=\Sigma_3{}^2(TC.r)$
11	Intégration de l'ensemble des sous-types de côtes dans la sous-catégorie de côte (**tableau** 49)	$TC.r=\Sigma_2{}^1(TC.r)$
12	Intégration de l'ensemble des sous-types d'OPC inclus dans un même type **(tableau 2 et tableau 3)**	$OPC.k=\Sigma_3{}^2(OPC.k)$

4.1.2.3 Évaluation des OPC – module services écologiques (étape II.b)

Un module a été développé, afin d'évaluer les effets des OPC sur les services écologiques. Le concept de services écologiques permet de lier les propriétés biophysiques d'un écosystème et les valeurs que les humains peuvent en dégager. Le modèle en cascade (tableau 13), qui a été développé par Potschin et Haines-Young (2010), permet de structurer ce concept de services selon les liens entre les propriétés, les fonctions, les services, les bénéfices et les valeurs des écosystèmes (tableau 13).

Le module services écologiques de l'algorithme est basé sur les mêmes fonctions que le module géomorphologique. Cependant, quelques modifications ont été apportées, afin de réaliser une évaluation de l'effet d'un OPC sur chacun des services écologiques sélectionnés par l'utilisateur. L'algorithme a été divisé en deux phases pour l'évaluation des OPC, au regard des effets sur les services écologiques. Dans la première phase [h=1], une base de données secondaire est générée pour y enregistrer une copie de l'information associée à l'ensemble

des effets observés applicables, lorsque l'ensemble des degrés d'élargissement des caractéristiques environnementales initiales sont intégrés [e=12]. Dans la seconde phase [h=2], l'évaluation est basée sur la mise en relation matricielle (voir annexe D) des effets observés contenus dans cette base de données secondaire, les fonctions écologiques (tableau 14) et les services écologiques (tableau 15). Cette mise en relation permet de lier les types d'effet observé qui affectent chaque service écologique. Ce lien est établi selon les fonctions écologiques.

Pour le calcul du nombre d'effets observés, l'algorithme a été divisé en deux étapes. D'abord, la procédure usuelle (section 4.1.2.2) a été modifiée afin d'intégrer les 4 critères TC, TS, TM, TV, sans intégrer la catégorie d'effet observé. Cette modification permet de créer une base de données secondaire ['] qui contient seulement les effets observés qui ont potentiellement une répercussion sur un des services écologiques. Les degrés d'élargissement des caractéristiques environnementales initiales pour atteindre le nombre d'effets minimal [nb.EO.min] sont effectués à cette étape. L'indice de correspondance [IC] n'est pas utilisé pour la hiérarchisation des OPC, car les effets observés sont extraits de la base de données secondaire pour l'ensemble des services écologiques. Puis, pour chaque service écologique, l'évaluation de l'effet d'un OPC fct effet.OPC est réalisée à partir d'un ensemble d'effet observé, qui a une répercussion sur le service écologique actuel SE.s. Finalement, deux catégories de services écologiques ont été utilisées : écosystémique et culturel.

Tableau 13. Définition des différentes composantes du modèle en cascade du concept de services écologiques

Composantes du modèle en cascade	Définition
Propriétés	Ensemble des conditions, des structures et des processus biophysiques déterminant si un service écologique peut être fourni (Van Oudenhoven *et al.*, 2012).
Fonctions	Sous-ensembles de caractéristiques écologiques qui définissent la capacité d'un écosystème à fournir un service (De Groot *et al.*, 2010 ; Potschin et Haines-Young, 2016). Une fonction est généralement associée à plusieurs services écologiques (Liquete *et al.*, 2013).
Services	Activité ou fonction d'un écosystème qui fournit un bénéfice (Potschin et Haines-Young, 2016)
Bénéfices	Multiples façons que le bien-être humain est amélioré par les processus et les fonctions écosystémiques via les services écologiques (Potschin et Haines-Young, 2016)
Valeurs	Valeur est accordée aux bénéfices en fonction de l'importance que leur accordent les humains (Potschin et Haines-Young, 2016). Les valeurs sont les préférences, les principes et les vertus qu'une personne ou un groupe détient (Chan *et al.*, 2012).

Tableau 14. Définition des fonctions écologiques côtières (Beaumont *et al.*, 2007 ; Costanza *et al.*, 2014 ; Liquete *et al.*, 2013 ; Van Oudenhoven *et al.*, 2012)

Fonctions écologiques	Définitions
Superficie de côte	Effet de l'OPC sur la superficie de côte où un service écologique est présent.
Dynamique des vagues	Effet de l'OPC sur l'intensité de l'énergie des vagues à la côte.
Caractéristiques des courants	Effet de l'OPC sur les caractéristiques des courants à proximité de la côte.
Captation du carbone	Effet de l'OPC sur les habitats ou les espèces qui agissent comme un puits de carbone.
Matière en suspension	Effet de l'OPC sur la mise en suspension de sédiments engendrant l'augmentation de la turbidité dans la colonne d'eau.
Couverture végétale	Effet de l'OPC sur la couverture végétale
Biocénose	Effet de l'OPC sur l'ensemble des êtres vivants d'un écosystème, ainsi que les interactions qu'ils ont entre eux et leur environnement physique.
Zone d'alimentation	Effet de l'OPC sur une zone reconnue que des espèces utilisent pour s'alimenter.
Zone de repos	Effet de l'OPC sur une zone reconnue que des espèces utilisent pour se reposer.
Zone de reproduction	Effet de l'OPC sur une zone reconnue que des espèces utilisent pour se reproduire.
Pouponnière	Effet de l'OPC sur une zone reconnue que des espèces utilisent pour donner naissance et élever leurs petits.

Tableau 15. Services écologiques côtiers répertoriés dans le Québec maritime (Paul-Hus *et al.*, 2021)

Habitat et support			
• Zone de frai du capelan	• Aire d'alimentation	• Aire de nidification	• Aire de repos
• Zone d'élevage	• Héronnière	• Habitat	• Colonie d'oiseaux sur île
• Espèces animales menacées	• Espèces de plante menacées	• Concentration d'oiseaux aquatiques	• Colonie d'oiseaux sur falaise
Régulation et maintenance			
• Purification de l'eau	• Régulation du climat	• Protection côtière	• Maintenance du cycle de vie
Approvisionnement			
• Pêche au saumon	• Pêche à la morue	• Pêche au maquereau	• Pêche à l'éperlan
• Pêche à la truite de mer	• Pêche au capelan (récréatif)	• Chasse récréative au phoque	• Pêche aux moules
• Pêche aux palourdes	• Pêche au sébaste	• Chasse (indéterminé)	• Chasse à la bernache
• Chasse au chevreuil	• Chasse à la sauvagine (indéterminé)	• Cueillette récréative de petits fruits	• Cueillette récréative d'algues (indéterminé)

Tableau 15 (suite). Services écologiques côtiers répertoriés dans le Québec maritime (Paul-Hus *et al.*, 2021)

• Pêche commerciale au buccin	• Cueillette de plantes	• Collecte de roches ou de pierres semi-précieuses	• Collecte de coquillages
Culturel			
• Sports aquatiques	• Baignade	• Loisirs	• Croisière ou excursion
• Activité de plage	• Randonnée	• Raquette	• Escalade
• Motoneige	• Camping	• Ski de fond	• Activité motorisée
• Lieu de loisir	• Vélo à pneus surdimensionnés	• Site à haute valeur socioculturelle	• Plongée sous-marine et plongée en apnée
• Feux de grève	• Site archéologique	• Observation d'épave	• Observation de plante
• Observation de phoques	• Observation de la faune (indéterminé)	• Observation du panorama	• Observation d'oiseaux (indéterminé)
• Observation de balbuzards	• Recherche et éducation	• Site patrimonial	• Préparation de la banique

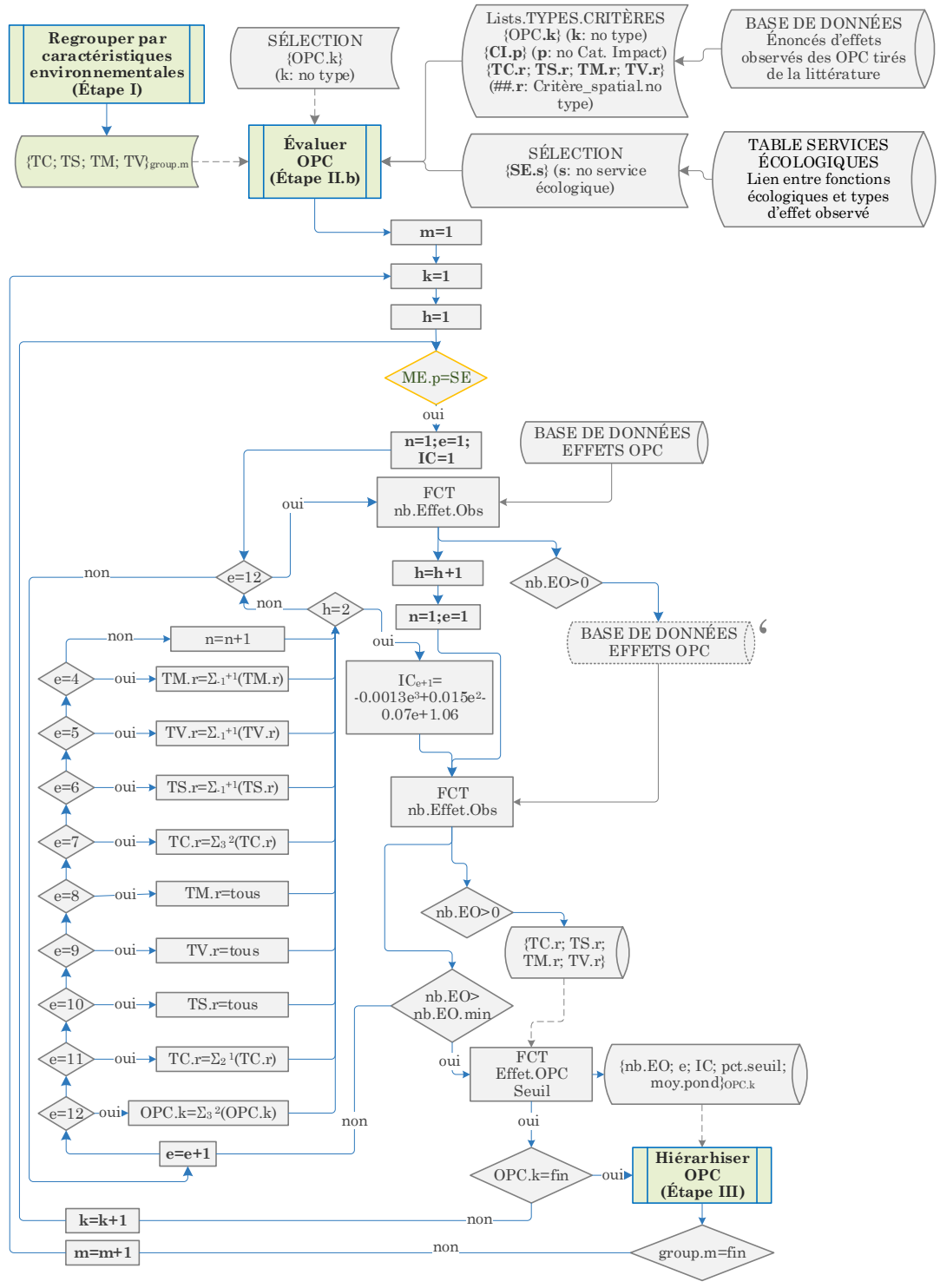

Figure 7. Schématisation du module d'évaluation services écologiques des ouvrages de protection côtière

4.1.2.4 Présentation des résultats (étape 3)

Les résultats de l'algorithme sont présentés en trois sections :

1. un sommaire des caractéristiques de l'environnement côtier;
2. une liste des résultats sommaires de l'évaluation des OPC;
3. une liste des résultats détaillés de l'évaluation des effets observés.

L'utilisateur peut sélectionner à partir de la feuille `requête` du tableur Excel les sections à intégrer dans le rapport final.

Sommaire des caractéristiques de l'environnement côtier

Les caractéristiques environnementales (type de côte, type de substrat, marnage et énergie des vagues) sont présentées dans le sommaire principal afin de contextualiser l'évaluation des OPC.

Résultats sommaires de l'évaluation des OPC (étape III)

L'objectif de l'algorithme est de caractériser les OPC afin d'établir une préhiérarchisation et d'orienter l'identification d'un OPC adapté au contexte d'intervention. Une hiérarchisation est générée pour chaque module d'évaluation (géomorphologique, services écologiques d'ordre écosystémique et services écologiques d'ordre culturel). Ce choix méthodologique a été fait, afin d'éviter d'avoir à agréger les résultats de ces trois catégories, dans un indice global et d'ainsi perdre de la précision, par rapport aux données brutes.

La hiérarchisation des OPC est basée sur trois critères : (i) l'atteinte du pourcentage seuil [`pct.seuil`], (ii) la moyenne pondérée [`moy.pond`], (iii) et l'indice de correspondance [`IC`] (figure 8). En cas d'égalité entre le `pct.seuil` et la moyenne pondérée, la deuxième a préséance sur l'indice de correspondance. Un OPC sélectionné par l'utilisateur est retiré de l'évaluation lorsque le `nb.EO` est nul, à la suite du processus d'élargissement des caractéristiques environnementales initiales. Les trois critères sont utilisés pour le module géomorphologique. Les deux premiers critères sont utilisés pour le module services écologiques.

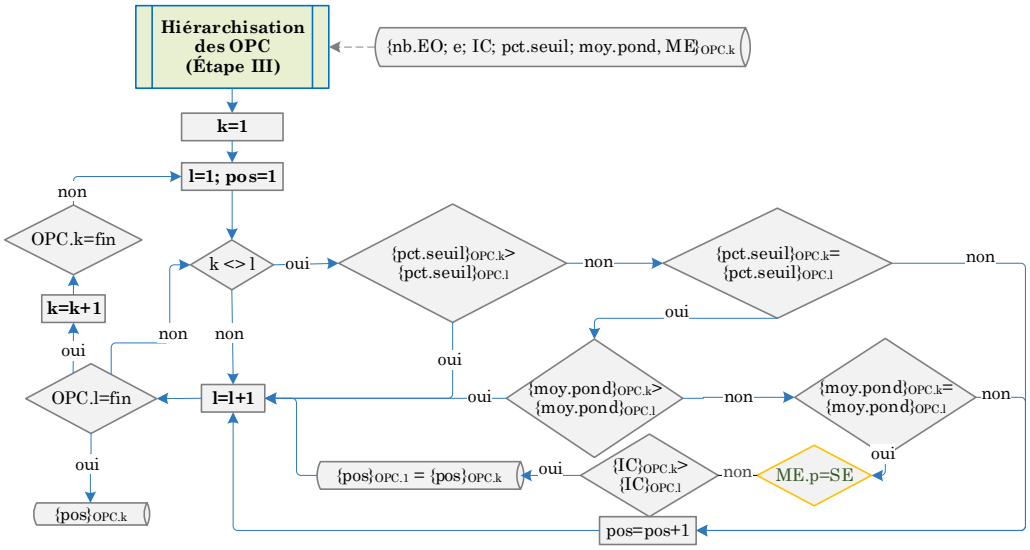

Figure 8. Procédure de hiérarchisation de l'algorithme d'évaluation

L'atteinte du pourcentage seuil [`pct.seuil`], la moyenne pondérée [`moy.pond`] et l'indice de correspondance [`IC`] permettent, également, d'obtenir de l'information complémentaire pour l'analyse d'un effet observé spécifique.

Un pourcentage seuil [`pct.seuil`] est utilisé pour identifier à quel échelon sur l'échelle de pondération (tableau 9) un pourcentage seuil défini est atteint. Ce pourcentage a été établi à 60%, en fonction des résultats d'une analyse de sensibilité. Pour chaque échelon de l'échelle de pondération, le pourcentage d'effet observé par rapport au nombre d'effets observés total est calculé. La fonction calcule, pour chacun des OPC, le pourcentage cumulatif de l'échelon le plus élevé (5) vers l'échelon le moins élevé (-5). L'échelon auquel le seuil de 60% est atteint devient l'indicateur de performance de l'OPC [`pct.seuil`]. Cet indicateur témoigne de la distribution des énoncés d'effet observé sur l'échelle de pondération.

Une moyenne pondérée [`moy.pond`] est utilisée pour obtenir un pointage global sur l'échelle de pondération (tableau 9). Pour chaque échelon, le nombre d'effets observés est multiplié par la valeur de l'échelon, puis la somme de ces multiplications est divisée par le nombre total d'occurrences de l'effet observé. Cet indicateur témoigne de la tendance centrale de la distribution des énoncés d'effet observé sur l'échelle de pondération.

Liste des résultats détaillés

La section liste des résultats détaillés présente les résultats pour les trois niveaux de la hiérarchie des effets observés, soit les sous-types, les types et les catégories, puis une agrégation de l'ensemble des effets observés de la

catégorie d'impact. Cette agrégation, notée `agr`, correspond au niveau supérieur de la hiérarchie et présente l'information déjà indiquée dans la section classement. Les catégories d'impact sont présentées dans le second niveau de la hiérarchie, en étant agrégées par niveau sur l'échelle de cause à effet, soit effet direct [`EDir`], cause directe [`CDir`] et cause indirecte [`CInd`] (tableau 8). Les types, puis les sous-types d'effet observé sont ensuite présentés aux niveaux 3 et 4 de la hiérarchie.

4.2 Méthode d'analyse multicritère

Les systèmes d'aide à la décision, développés pour améliorer la compréhension de problèmes complexes, peuvent contribuer à parfaire le processus décisionnel (National Research Council, 2009 ; Westmacott, 2001). Les méthodes d'analyse multicritère sont un type de système d'aide à la décision utilisé, pour sélectionner la meilleure ou les meilleures actions parmi un groupe en étant basé sur plusieurs procédures permettant de pondérer des critères qui ont une influence sur la décision (Marttunen *et al.*, 2017; Scott *et al*., 2012). Ces méthodes ont été utilisées dans un contexte de gestion de l'environnement côtier et maritime (Ananda et Herath, 2009).

Les méthodes d'analyse multicritère sont basées sur des unités comparatives neutres ou adaptées à chaque critère (Maystre et al., 1994). Elles ont été développées pour agréger chacun des scénarios relativement à chacun des critères en fonction d'un système de pondération défini (Caillet, 2003). Elles peuvent se diviser en trois types : agrégation complète, agrégation partielle, agrégation itérative (André et al., 2010 ; Gamper et Turcanu, 2007 ; Maystre et al., 1994). L'agrégation complète aboutie à une solution unique, synthétique, exhaustive et définitive (André et al., 2010). L'agrégation partielle considère l'incomparabilité entre les scénarios par un système référentiel de préférence basé sur la notion de surclassement (André et al., 2010). L'agrégation itérative est fondée sur un processus de tâtonnement qui permet d'explorer l'espace de faisabilité des scénarios à travers un dialogue avec les décideurs (Gamper et Turcanu, 2007). Les méthodes d'analyse multicritère basées sur une agrégation partielle sont les mieux adaptées à une gestion holistique du territoire, car l'ensemble des dimensions considérées par un ou plusieurs acteurs sont intégrées dans l'analyse (Garmendia et Gamboa, 2012).

Elles sont généralement réalisées sur la base d'une procédure à trois étapes :

1. identification et pondération des critères de sélection;
2. évaluation des MAAC au regard de chaque critère de sélection;
3. hiérarchisation des MAAC.

Les méthodologies d'identification, de pondération et de traitement des critères de sélection ainsi que la méthode PROMETHEE sont présentées dans les

prochaines sous-sections. L'application en trois étapes de la méthode d'analyse multicritère pour l'évaluation des MAAC réalisée dans le cadre du projet de recherche est présentée à la section 5.

4.2.1 Critères de sélection

Les critères de sélection sont des paramètres utilisés pour évaluer la contribution d'action à la réalisation des objectifs d'un projet (André *et al.*, 2010). L'identification de critères de sélection vise à former un ensemble de critères complets, opérationnels, indépendants mutuellement, sans doublon et cohérents avec les effets à différentes échelles temporelles (De Bruin *et al.*, 2009). Cet exercice est généralement effectué par des scientifiques, des experts (p. ex. Chang *et al*., 2012; Monterroso *et al*., 2011; Trutnevyte *et al*., 2011) ou par des parties prenantes dans des processus participatifs plus avancés, par des questionnaires, des ateliers, etc. (p. ex. Antunes *et al*., 2011; Garmendia *et al*., 2010; Garmendia and Gamboa, 2012; Stagl, 2006; Trutnevyte *et al*., 2012). La pondération des critères peut être définie comme la mesure de l'importance d'un critère de sélection, selon un acteur (Garmendia et Gamboa, 2012 ; Stagl, 2006). Un groupe d'acteurs peuvent être en accord sur un ensemble de critères, sans accorder la même importance à chacun d'entre eux (Garmendia et Gamboa, 2012).

4.2.1.1 Identification des critères de sélection

Les critères de sélection ont été identifiés en trois étapes itératives. D'abord, les critères de sélection identifiés par les acteurs du territoire, dans le cadre du projet Résilience côtière ont été utilisés à titre de point de départ (Sauvé *et al.*, 2022b). Puis, cette liste de critères de sélection a été adaptée pour répondre aux besoins internes des projets du ministère des Transports du Québec. Les énoncés et les définitions des critères de sélection sont présentés au tableau 16. Cette liste, référée en tant que version 1 dans le présent document, a été utilisée pour la pondération des critères de sélection, par les professionnels et gestionnaires du MTMD et de différentes organisations du territoire côtier (acteurs externes). Enfin, les énoncés et les définitions des critères de sélection ont été peaufinés, par l'équipe d'experts ayant réalisé la notation des MAAC, au regard de chacun des critères (étape 2 de l'analyse multicritère). Cette dernière liste de critère est référée en tant que version 2 dans le présent document.

Tableau 16. Liste des critères de sélection incluant les catégories, les énoncés et les définitions **des versions 1 et 2. Les modifications entre les versions 1 et 2 sont indiquées par les effets de police suivants :** ajouts **et** ~~suppressions~~**)**

Coûts du projet
Coût de construction Coût d'aménagement initial estimé de la mesure d'adaptation, normalisé par sa durée de vie estimée. L'évaluation de ce critère est basée sur les points suivants : • Coûts de planification et de conception; • Coûts d'acquisition immobilière (terrains et bâtiments); • Coûts de réaménagement de l'ensemble du site (démantèlement d'une structure existante, etc.); • Coûts de construction (main-d'œuvre, matériaux, équipements, etc.); • Coûts de compensation (étude, réalisation et suivi).
Coût d'entretien et de suivi Coût d'entretien et de suivi estimé de la mesure d'adaptation. Ces coûts correspondent aux coûts nécessaires pour suivre l'état et maintenir un rendement optimal de la mesure d'adaptation. L'évaluation de ce critère est basée sur les points suivants : • Résistance de la mesure d'adaptation face à l'agressivité du site en lien avec les conditions météo-marine, en tenant compte du positionnement de la mesure d'adaptation sur le profil (haut de plage, estran, infralittoral, etc.); • Coûts de la main-d'œuvre (personnel qualifié, étudiant, etc.); • Coûts des matériaux; • Coûts des équipements (machinerie, instruments de mesure, etc.).
Contexte environnemental
Effets sur les processus côtiers Effets anticipés des mesures d'adaptation sur la dynamique géomorphologique, soit le déplacement de la côte en réponse aux apports sédimentaires et aux régimes de perturbation ainsi que sur l'hydrodynamisme, soit l'ensemble des événements impliqués dans le mouvement de l'eau (courants, vagues, eaux souterraines, marées). L'évaluation des effets anticipés est réalisée à l'échelle de la cellule hydrosédimentaire et des cellules adjacentes. L'évaluation de ce critère se base sur les points suivants : • Effets géomorphologiques (bilan sédimentaire, déplacement du trait de côte, profil, transport sédimentaire, etc.) • Effets hydrodynamiques (caractéristiques des vagues, des courants et des composantes du niveau d'eau)
Effets sur les milieux naturels et les espèces d'intérêt Effets anticipés des mesures d'adaptation sur les milieux naturels d'intérêt, soit des milieux naturels reconnus pour leur rôle écologique majeur ou des milieux naturels concentrant une faune et flore d'importance ainsi que sur les espèces d'intérêt, soit les espèces jouant un rôle clé pour le fonctionnement de l'écosystème ou de l'économie. L'évaluation de ce critère est basée sur les points suivants, afin de savoir si les travaux auront lieu à proximité ou auront un effet sur les : • Effets sur les écosystèmes (milieux humides, marais et zostérais; aires protégées [fédérales, provinciales, municipales et aires protégées par une chartre d'organisme privé, par des institutions ou par des individus en vertu du statut de réserve naturelle reconnue en terres privées]; Frayères); • Effets sur les espèces (espèces d'intérêt commercial ou à statut particulier; espèces répertoriées dans le centre de données sur le patrimoine naturel du Québec (CDPNQ) faune et flore).
Empiétement Surface d'empiétement de la mesure d'adaptation qui requière de la compensation selon la loi sur la qualité de l'environnement et la loi sur les pêches. Ce critère permet de prendre en compte les effets directs de la mesure d'adaptation.

Tableau 16 (suite). Liste des critères de sélection incluant les catégories, les énoncés et les définitions **des versions 1 et 2. Les modifications entre les versions 1 et 2 sont indiquées par les effets de police suivants :** ajouts **et** ~~suppressions~~**)**

Qualité de vie des citoyens et récréotourisme
~~**Acquisition immobilière (terrains)**~~ ~~Nécessité d'acquérir des terrains privés n'entraînant pas de déplacements de personnes, afin de mettre en place la mesure d'adaptation.~~
~~**Acquisition immobilière (bâtiments)**~~ ~~Nécessité d'acquérir des bâtiments privés entraînant des déplacements de personnes, afin de mettre en place la mesure d'adaptation.~~
~~**Accessibilité aux infrastructures et activités récréotouristiques**~~ **Effet sur les activités locales** Effets anticipés des mesures d'adaptation sur l'accessibilité aux infrastructures ainsi que sur les activités récréotouristiques et économiques. L'évaluation de ce critère est basée sur les points suivants : • Effet sur l'accès au littoral, aux zones de pêche; aux observatoires de la faune et de la flore; aux activités nautiques; aux sites historiques ou sites d'intérêt archéologique ou patrimonial; etc.; • Effets sur les activités récréotouristiques; • Effets sur les activités économiques.
Préservation des paysages et esthétismes des mesures d'adaptation Effets anticipés des mesures d'adaptation sur le paysage en général. L'évaluation de ce critère est basée sur les points suivants : • Impacts visuels; • Modifications de l'aspect de la plage ou du milieu côtier; • Intégration de la mesure d'adaptation dans le milieu récepteur (agencement des matériaux avec les composantes de l'environnement naturel).
~~**Gestion du projet**~~ **Expertise pour la réalisation des étapes du projet**
~~**Capacité de réalisation (Phases de préparation)**~~ **Expertise pour la préparation** Complexité et temps nécessaire pour l'exécution de la phase préparatoire afin que le projet chemine jusqu'à la phase de construction. de la mesure d'adaptation, soit, sans s'y limiter, l'étude d'opportunité, les consultations publiques, les acquisitions immobilières ainsi que la conception et les plans et devis. ~~associée à la réalisation de la phase préparatoire (soit l'étude d'opportunité, la conception et les plans et devis) du projet d'implantation de la mesure d'adaptation.~~ L'évaluation de ce critère est basée sur les points suivants, à l'échelle provinciale : • Complexité et temps ~~Délais~~ de réalisation des études, de la conception et des plans et devis; • Disponibilité de l'expertise lors des différentes phases de préparation basée sur les expériences antérieures; • Disponibilité de la main-d'œuvre lors des différentes phases de préparation.
~~**Faisabilité technique (Étapes de mise en œuvre)**~~ **Expertise pour la construction** Complexité technique associée à la réalisation de la phase de construction ~~mise en œuvre (construction - travaux)~~ de la mesure d'adaptation au regard ~~Celle-ci est fonction des contraintes spécifiques de la mesure d'adaptation et~~ des particularités du site d'implantation et des contraintes spécifiques à chacune des mesures d'adaptation. L'évaluation de ce critère est basée sur les points suivants : • Accessibilité au site; • Type de mesure d'adaptation retenue; • Disponibilité de la main-d'œuvre (chantier, surveillance, etc.); • ~~Disponibilité des matériaux;~~ • Disponibilité des équipements (machinerie, instruments de mesure, etc.); • Besoin de modifier ou déplacer des structures existantes.

Tableau 16 (suite). Liste des critères de sélection incluant les catégories, les énoncés et les définitions **des versions 1 et 2. Les modifications entre les versions 1 et 2 sont indiquées par les effets de police suivants :** ajouts **et** ~~suppressions~~**)**

Expertise pour les suivis, les inspections et l'entretien Complexité et fréquence des entretiens et disponibilité de l'expertise pour la réalisation des phases de suivi des effets, d'inspection et d'entretien de la mesure d'adaptation. L'évaluation de ce critère est basée sur les points suivants : • Fréquence des visites; • Niveau d'expertise nécessaire pour l'acquisition et le traitement des données; • Équipement nécessaire pour l'acquisition et le traitement des données.
Caractéristiques techniques des mesures d'adaptation
~~**Inspections et entretien**~~ ~~Fréquence des inspections et entretiens nécessaires afin de garantir l'intégrité structurelle et l'efficacité de la mesure d'adaptation.~~
Adaptabilité Facilité à modifier la mesure d'adaptation en fonction de l'évolution des conditions environnementales, afin de garantir son efficacité dans un contexte de changements climatiques. L'évaluation de ce critère est basée sur les points suivants : • Nécessité d'intervenir pour adapter la mesure d'adaptation; • Difficulté de l'intervention; • Disponibilité des matériaux.
~~**Efficacité face à l'érosion**~~ **Certitude de l'efficacité face aux aléas côtiers** Niveau de certitude de l'efficacité de la mesure d'adaptation face aux aléas côtiers. L'évaluation de ce sous-critère est basée sur les points suivants : • Capacité de la mesure d'adaptation à être fiable dans un contexte de submersion marine (maintien des temps de transport de la marchandise, de l'accessibilité aux services d'urgences et à éviter la fermeture temporaire de la route durant les épisodes de tempêtes); • Capacité de la mesure d'adaptation à être fiable dans un contexte d'érosion côtière (arrêt du recul du trait de côte lorsque la marge de recul est encore suffisante, maintien d'un réseau routier fonctionnel et de la sécurité des usagers lorsque la route est en première ligne). ~~Capacité de la mesure d'adaptation à être fiable dans un contexte d'érosion côtière. L'évaluation de ce critère est basée sur les points suivants :~~ ~~• Capacité de la mesure d'adaptation à arrêter le recul du trait de côte lorsque la marge de recul est encore suffisante;~~ ~~• Capacité de la mesure d'adaptation à assurer le maintien d'un réseau routier fonctionnel ainsi que la sécurité des usagers lorsque la route est en première ligne.~~
~~**Efficacité face à la submersion**~~ ~~Capacité de la mesure d'adaptation à être fiable dans un contexte de submersion marine. L'évaluation de ce critère est basée sur les points suivants :~~ ~~• Capacité de la mesure d'adaptation à permettre un maintien des temps de transport de la marchandise;~~ ~~• Capacité de la mesure d'adaptation à permettre un maintien de l'accessibilité aux services d'urgences;~~ ~~• Capacité de la mesure d'adaptation à éviter la fermeture temporaire de la route durant les épisodes de tempêtes.~~

4.2.1.2 Pondération des critères de sélection

La pondération des critères de sélection a été réalisée au moyen d'un questionnaire en ligne, destiné à deux catégories d'acteurs impliqués dans la gestion du territoire côtier : les acteurs internes et externes au MTMD. Les acteurs internes sont les professionnels du MTMD (ingénieurs, biologistes, géomorphologues, etc.). Les acteurs externes consultés sont les gestionnaires et professionnels du territoire côtier (municipalités, MRC, comités ZIP) des cinq secteurs d'étude.

Le protocole de la consultation est présenté à l'annexe A.

4.2.1.3 Traitement de la pondération

La révision de la liste de critères de sélection, entre l'étape 1 et l'étape 2 de la méthode d'analyse multicritère, a mené à deux versions de la liste. Une correction de la pondération a été appliquée, afin d'utiliser les poids attribués aux critères de sélection lors de la consultation (version 1), tout en utilisant les critères de sélection de la version 2. Trois niveaux d'irrégularité, associés aux corrections nécessaires entre les versions, ont été établis (Friesinger ***et al.***, 2021) : faibles, moyennes ou élevées (tableau 17). Les irrégularités faibles nécessitent seulement une modification du nom du critère générale. Les irrégularités moyennes nécessitent un regroupement de critères (k_i), à l'intérieur d'une catégorie de critère (C_j). Les irrégularités élevées nécessitent un regroupement de critères généraux entre deux catégories de critère. Dans le projet actuel, des irrégularités moyenne et élevée ont été appliquées.

Tableau 17. Type d'irrégularités dans l'identification des critères de sélection entre les ateliers

Types d'irrégularité	Cause	Implication pour la pondération
Faible	- Uniformisation de l'orthographe	- Aucune
Moyenne	- Critères menant aux mêmes points d'évaluation (indépendance des critères) - Critères ne permettant pas de distinguer deux OPC (opérationnels)	- Somme des poids des critères (w_i) $w_{i'} = \sum_{k_i = k_{i'}} w_i$
Élevée	- Critères dans la mauvaise catégorie	- Définition du poids absolu par la multiplication du poids de la catégorie par le poids de chaque critère - Redistribution des critères dans les bonnes catégories - Recalcul du poids relatif des critères à l'intérieur de chaque catégorie

4.2.2 Méthode PROMETHEE

Les méthodes *Analytical Hierarchy Process* (AHP), ELECTRE et PROMETHEE sont les plus communément utilisées, dans un contexte de gestion environnementale. Les points distinctifs entre les méthodes sont le type d'agrégation, le type de calcul, les échelles de pondération et la hiérarchisation des solutions (Caillet, 2003). Dans le contexte du projet actuel, l'objectif est d'identifier une solution ou un groupe de solutions adapté à l'objectif du projet, à l'opinion des décideurs et aux critères de sélection en général.

Brans *et al*. (1986) ont démontré que la méthode PROMETHEE était plus stable que la méthode ELECTRE III. Également, cette méthode est largement appliquée dans un contexte de gestion environnementale (Behzadian *et al.*, 2010). Ainsi, la méthode PROMETHEE et le logiciel VISUAL PROMETHEE ont été utilisés dans le cadre du projet actuel (Mareschal, 2013).

PROMETHEE signifie *Preference Ranking Organization METHode for the Enrichment of Evaluation*. La méthode a initialement été développée par Jean-Pierre Brans en 1982 sur les bases des méthodes de surclassement proposé par Bernard Roy (Brans, 1982 ; Brans *et al.*, 1986). La méthode permet de résoudre le problème multicritère de l'équation 3 où A est un ensemble finit d'action et $f_{i,\, i=1,\, \ldots,\, k}$, est un nombre k de critères à maximiser (Brans *et al.*, 1986). La méthode peut être séparée en deux étapes : construction des relations de surclassement et utilisation de ces relations de manière à répondre à l'équation 3.

4.2.2.1 Relations de surclassement

Considérant un nombre d'actions $A = \{a_1, a_2, \ldots, a_n\}$ et un ensemble de critères $F = \{f_1, f_2, \ldots, f_m\}$, une comparaison binaire est faite entre chaque critère, où $\Delta_k(a_i, a_j)$ est l'écart entre l'évaluation de l'action en regard du critère f_k (équation 4). Ensuite, chaque comparaison binaire est transférée dans un index de préférence $P[\Delta_k(a_i, a_j)]$ dont la valeur est située entre 0 et 1 selon la fonction de préférence associé au critère f_k. Les fonctions de préférences permettent d'introduire des seuils dans la relation entre a_i et a_j. Brans *et al.*, (1986) présentent en détail chaque fonction de préférence. Puis, l'index de préférence multicritère $\pi(a_i, a_j)$ est calculé (équation 5) en tenant compte du poids w_k, soit une mesure de l'importance relative du critère f_i. Si tous les critères ont le même poids pour un décideur, tous les poids seront égaux. L'index de préférence multicritère est défini comme la somme pondérée de l'index de préférence (Brans *et al.*, 1986). $\pi(a_i, a_j)$ représente l'intensité de la préférence du décideur de l'action a_i par rapport à l'action a_j en regard de tous les critères simultanément (tableau 19).

Tableau 18. Variation de l'intensité de la préférence de l'action a_i par rapport à l'action a_j (tiré de Brans et al. (Brans *et al.*, 1986))

$P[\Delta_k(a_i, a_j)] = 0$	Indifférence entre a_i et a_j
$P[\Delta_k(a_i, a_j)] \sim 0$	Faible préférence pour a_i par rapport à a_j
$P[\Delta_k(a_i, a_j)] \sim 1$	Forte préférence pour a_i par rapport à a_j
$P[\Delta_k(a_i, a_j)] = 1$	Stricte préférence pour a_i par rapport à a_j

Tableau 19. Variation de l'intensité de la préférence de l'action a_i par rapport à l'action a_j en regard de tous les critères simultanément (tiré deBrans *et al.*, 1986))

$\pi(a_i, a_j) \approx 0$	Faible préférence pour a_i par rapport à a_j pour l'ensemble des critères
$\pi(a_i, a_j) \approx 1$	Forte préférence pour a_i par rapport à a_j pour l'ensemble des critères

$$Max\{f_1(a), \dots, f_k(a) | a \in A\} \quad \text{Équation 3}$$

$$\Delta_k(a_i, a_j) = f_k(a_i) - f_k(a_j) \quad \text{Équation 4}$$

$$\pi(a_i, a_j) = \sum_{x \in k} P_k(a_i, a_j) \Big/ \sum_{k} w_k \quad \text{Équation 5}$$

4.2.2.2 Hiérarchisation

L'index de préférence permet de déterminer une valeur à la relation de surclassement de l'ensemble d'action A. Cette relation peut être représentée sur un graphique, où les nœuds représentent les actions de l'ensemble A et les arcs, entre les nœuds, représentent l'intensité de la préférence entre deux actions (nœuds) (figure 9).

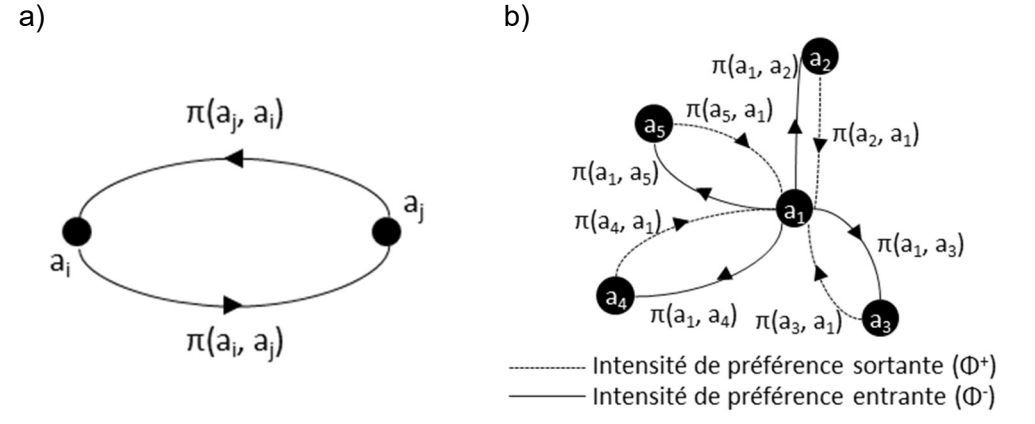

Figure 9. a) relation de surclassement entre a_i et a_j, b) relation de surclassement a_1 et $a_{2, 3, 4, 5}$

Le flux sortant $\Phi^+(a_i)$ (équation 6) est la somme des valeurs de l'intensité de préférence sortante de l'action a_i. Il représente l'étendue sur laquelle a_i surpasse par les autres actions. Le flux entrant $\Phi^-(a_i)$ (équation 7) est la somme des valeurs de l'intensité de préférence entrante de l'action a_i. Il représente l'étendue sur laquelle a_i est surpassée par les autres actions.

$$\Phi^+(a_i) = \sum_k \pi(a_i, x) \quad \text{Équation 6}$$

$$\Phi^-(a_i) = \sum_{x \in k} \pi(x, a_i) \quad \text{Équation 7}$$

Ainsi, la meilleure solution est celle avec le flux sortant le plus élevé et le flux entrant le plus faible.

5 RÉSULTATS DE L'APPROCHE D'ÉVALUATION DES MESURES D'ADAPTATION AUX ALÉAS CÔTIERS

L'approche d'évaluation des mesures d'adaptation aux aléas côtiers (MAAC) a été appliquée sur cinq sites d'études, dont les caractéristiques distinctives permettent de représenter différents types d'environnements côtiers présents dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent. Les résultats de l'approche d'évaluation des MAAC sont présentés dans les prochaines sous-sections. Les MAAC évaluées avec la méthode d'analyse multicritère ont été identifiées par une équipe de sélection composée de trois membres du MTMD et d'un membre de l'UQAR. L'identification des MAAC a été réalisée en fonction des caractéristiques socioécologiques et de la dynamique côtière des sites, ainsi que des résultats de l'algorithme. L'enrochement a été retenu, par défaut, pour l'ensemble des sites, car cet OPC sert de point de référence pour le MTMD.

La première étape de l'analyse multicritère impliquait une consultation des acteurs du territoire côtier afin de pondérer les critères de sélection au moyen d'un questionnaire en ligne. Le protocole utilisé afin de réaliser cette consultation est présenté à l'annexe A. Les résultats découlant de cette consultation sont intéressants à considérer dans une optique d'intégrer une telle démarche au cheminement de projet du MTMD.

D'abord, le nombre de répondants au questionnaire est présenté au tableau 20 en fonction du site et de l'organisation. Pour l'ensemble des sites, le nombre de répondants du MTMD est le plus élevé, parmi les trois types d'organisation. Le nombre de répondants à l'échelle municipale pour les sites de Port-Daniel et de Saint-Ulric est faible (n = 2). Le nombre de répondants de la catégorie « organisme » est également faible, pour le site de Cap-des-Rosiers, Saint-Ulric et La Martinique (n = 2), et voire très faible pour Rivière-du-Loup (n = 1). Ce faible nombre de répondants était anticipé, car, à l'exception du site de La Martinique, un seul organisme en environnement côtier œuvre sur chacun de ces territoires.

Tableau 20. Nombre de répondants au questionnaire en ligne catégorisés par site et par types d'organisation

Acteurs consultés	Port-Daniel (A0102)	Cap-des-Rosiers (B0504)	St-Ulric (D0202)	La Martinique (F0103)	Rivière-du-Loup (G0201)
MTMD	8	7	7	8	7
Municipal	2	4	2	6	4
Organisme	3	2	2	2	1
Total	**13**	**13**	**11**	**16**	**12**

Ensuite, une analyse des poids attribués aux catégories de critère par les répondants a été effectuée, afin de répondre à un questionnement sur la divergence de priorité potentiel, entre le MTMD et les autres organisations (figure 10). Pour l'ensemble des catégories, la moyenne attribuée par les répondants du MTMD est pratiquement équivalente à la moyenne générale des cinq sites, ce qui peut être expliqué par la proportion élevée de répondants du MTMD.

Les répondants de la catégorie « organisme » ont attribué, en général, davantage de poids à la catégorie Contexte environnemental, allant même au-delà de la limite supérieure de la plage d'analyse définie, par l'écart-type, pour les sites de Saint-Ulric et de La Martinique. Ils ont également attribué davantage de poids à la catégorie Qualité de vie des résidents et récréotourisme pour les sites de Saint-Ulric et de Rivière-du-Loup. Les répondants de la catégorie « organisme » ont attribué moins de poids à la catégorie Coûts du projet, pour l'ensemble des sites, à l'exception de Rivière-du-Loup, ainsi que pour la Catégorie Gestion de projet pour les sites de Saint-Ulric, La Martinique et Rivière-du-Loup et la catégorie Caractéristiques techniques des mesures d'adaptation, pour les sites de Saint-Ulric et de La Martinique.

Contrairement aux deux autres types d'organisation, aucune tendance ne peut être tirée des résultats des poids attribués par les répondants de l'échelle municipale aux catégories de critères, étant parfois près de la moyenne générale, parfois largement supérieure et parfois largement inférieure. Cette variation est davantage expliquée par des différences intersites plutôt qu'intercatégories.

La seconde étape de l'analyse multicritère impliquant la notation des MAAC retenues au regard de chacun des critères de sélection. Cette étape a été réalisée par l'équipe multidisciplinaire de MTMD et de l'UQAR. La discipline des experts impliqués dans la notation a été adaptée à la nature de chacun des critères afin de concentrer l'expertise. Ainsi, les biologistes et les géomorphologues ont noté chacun un critère, l'équipe responsable de la relation avec le milieu a noté deux critères et les ingénieurs ont noté sept critères. Un système de notation à 9 échelons a été utilisé pour l'évaluation des critères de sélection.

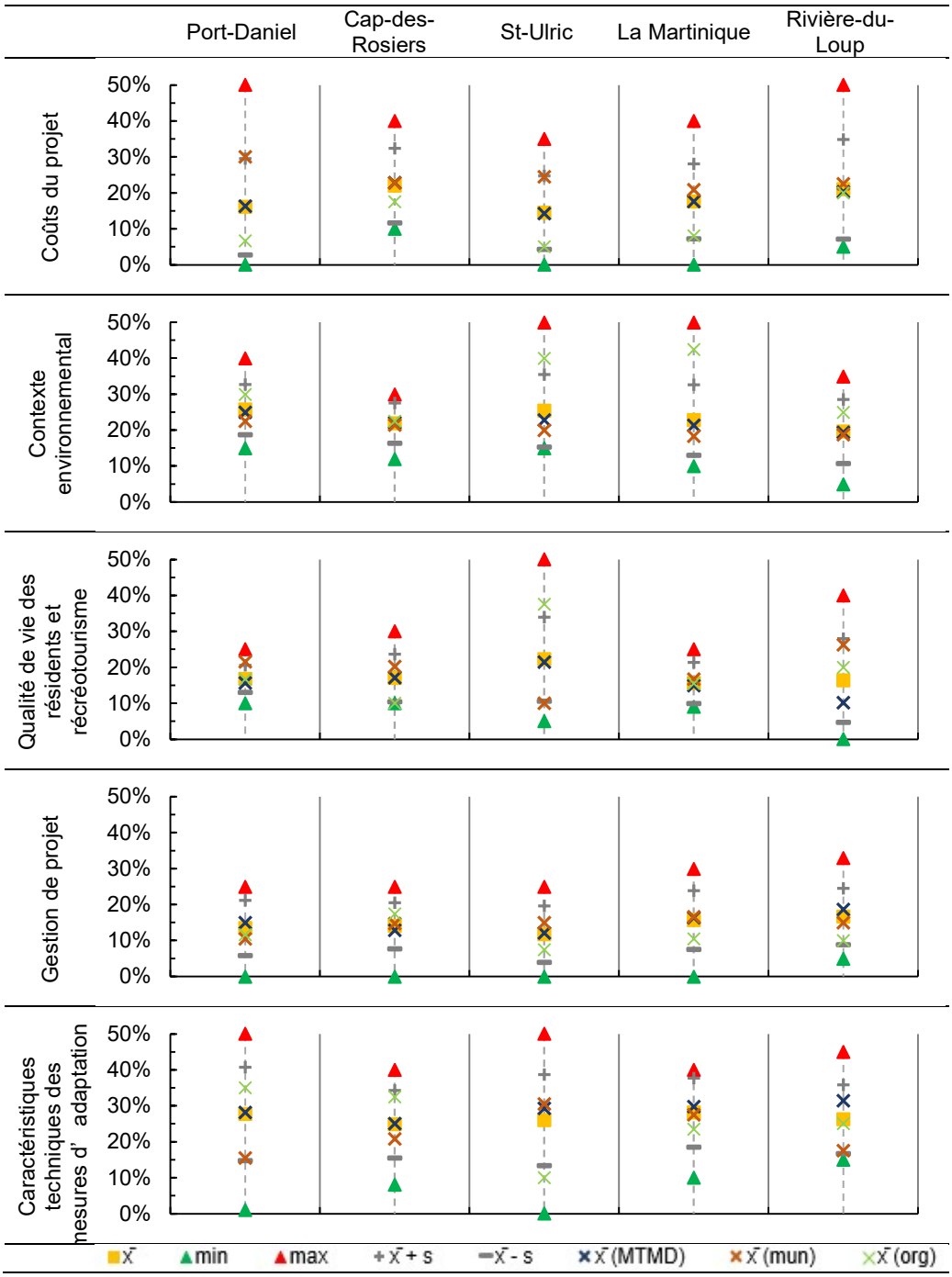

Figure 10. Analyse du poids attribué aux catégories de critère par l'ensemble des répondants du questionnaire pour les cinq sites. Moyenne générale (carré jaune), poids minimum (triangle vert) et poids maximum (triangle rouge). Moyennes spécifiques aux organisations : X bleu (MTMD), orange (échelle municipale) et vert (organisme). Plus et moins gris : plage d'analyse définie par l'écart-type plus et moins la moyenne générale.

5.1 Port-Daniel (A0102)

Les résultats du secteur routier à l'étude de Port-Daniel (A0102) sont présentés dans les sous-sections suivantes.

5.1.1 Description du site d'étude

Le secteur routier à l'étude a une longueur de 395 mètres. Il est situé sur une flèche littorale à l'embouchure de l'estuaire de la petite rivière Port-Daniel (figure 11). Le secteur est situé dans la cellule hydrosédimentaire de la baie de Port-Daniel. L'extrémité de la flèche littorale, du côté sud du pont, est située à proximité d'un point de converge de la dérive littorale : au sud, la dérive littorale principale est dirigée vers le nord et, au nord, la dérive littorale principale est dirigée vers le sud. Il y a présence d'un courant de marée à l'embouchure de l'estuaire de la rivière. Le marnage est microtidal et l'énergie des vagues est élevée. Les sédiments de la plage sont majoritairement composés de graviers et de sable, le bas estran est sableux, la zone infralittorale est meuble et colonisée par un herbier de zostère semi-végétalisé et par d'autres types de végétation indifférenciée. Deux bancs sableux qui émergent à marée basse forment des flèches littorales transversales. Un delta subaquatique est aussi observé à l'embouchure de la rivière.

Le secteur en amont du site (au sud) par rapport à la dérive littorale est constitué d'une falaise rocheuse, d'une falaise meuble, puis d'une terrasse de plage artificialisée par des enrochements. Le transport sédimentaire en provenance de cette direction semble faible en raison, entre autres, de l'absence de dépôts sédimentaires en amont du banc sableux perpendiculaire au site. Le secteur au nord-est du site est constitué d'une falaise rocheuse, d'une falaise meuble, puis d'une flèche littorale. Le transport sédimentaire en provenance de cette direction semble également faible. Ainsi, selon cette analyse de la dynamique hydrosédimentaire, il a été considéré que les flèches transversales et le delta subaquatique sont majoritairement alimentés par l'apport sédimentaire de la rivière Port-Daniel. Ces apports sédimentaires sont ensuite remaniés par les vagues et les courants côtiers.

Le site est identifié comme un site d'intérêt écologique. La baignade a été répertoriée comme une activité pratiquée à proximité du site.

Figure 11. Site d'étude de Port-Daniel (A0102). (A) Imagerie aérienne du site d'étude situé sur une flèche littorale. Représentation de la dérive littorale, du courant de marée et des bancs sableux. (B) Vue du site vers le nord. (C) Vue du site vers le sud. (D) Falaise rocheuse située en amont du site à l'extrémité sud de la cellule hydrosédimentaire. (E) Terrasse de plage située en amont et au sud du site d'étude.

5.1.2 Résultats de l'évaluation des effets géomorphologiques, écosystémiques et culturels des OPC (algorithme)

Les résultats des effets géomorphologiques, écosystémiques et culturels des OPC, dans le contexte des quatre caractéristiques environnementales du site d'étude de Port-Daniel (flèche littorale, sable, microtidal et énergie des vagues élevée), sont présentés respectivement au tableau 21, tableau 22 et tableau 23. Un total de 14 OPC a un nombre d'effets observés suffisant afin d'être évalué avec l'algorithme.

Pour les résultats géomorphologiques, neuf OPC sur 14 ont un indice de correspondance (IC) moyen (0,697), deux ont un IC élevé (0,859) et trois ont un IC très faible (0,375). Alors que l'IC est généralement moyen, le nombre d'effets observés (N) est généralement élevé. Ce constat est dû au faible ratio entre le `nb.EO.min` et le `nb.EO.tot` (4.1.2.2) dans le contexte des caractéristiques du site, ce qui engendre un élargissement des caractéristiques environnementales initiales afin d'augmenter le `nb.EO`.

Généralement, l'ensemble des techniques souples obtiennent des résultats positifs. Également, les résultats démontrent clairement les effets géomorphologiques négatifs des structures réflectives (enrochement et mur de protection) dans un contexte de côte meuble. Plus spécifiquement, la végétalisation terrestre et aquatique présente de bons résultats en termes de performance (% seuil et moy). Par contre, l'incertitude de ces résultats est élevée. La végétalisation terrestre présente un IC de 0,375 et la végétation aquatique présente un N de 1. Les trois types de recharge sédimentaire (méga-recharge, recharge d'avant-plage et recharge de plage) présentent une bonne performance, tout en présentant une correspondance très faible pour la méga-recharge et moyenne, voire bonne pour la recharge d'avant-plage et la recharge de plage (N de 232). L'épi perméable, l'épi imperméable et le brise-lame émergé obtiennent des indices de performance passable, tout en présentant une correspondance moyenne, voire bonne (N de 29, 25 et 56; IC de 0,859 et de 0,697). Les autres structures rigides obtiennent un indice de performance négatif et une correspondance généralement moyenne, voire bonne dans certains cas.

Pour les résultats d'ordre écosystémique et culturel (tableau 22 et tableau 23), la végétalisation terrestre et aquatique, la méga-recharge, les recharges d'avant-plage et de plage ainsi que l'épi perméable obtiennent un indice de performance positif et un N élevé, voire très élevé (recharge d'avant-plage et de plage) à l'exception de la végétalisation aquatique (N de 1). L'ensemble des structures rigides, à l'exception de l'épi perméable, obtiennent des indices de performance négatifs quant à leurs effets écosystémiques.

Tableau 21. Résultats de l'effet géomorphologique dans le contexte du secteur d'étude de Port-Daniel (A0102 - flèche littorale, sable, microtidal et énergie des vagues élevée)

OPC	% seuil	Moy	IC	N	-5	-3	-1	0	1	3	5
Végétalisation terrestre	3	3,026	0,375	38	0,0%	0,0%	0,0%	2,6%	2,6%	**86,8%**	7,9%
Végétalisation aquatique	3	3,00	0,697	1	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	**100,0%**	0,0%
Méga-recharge	3	2,70	0,375	30	0,0%	6,7%	0,0%	10,0%	0,0%	**63,3%**	20,0%
Recharge d'avant-plage	3	2,032	0,697	31	0,0%	6,5%	0,0%	19,4%	9,7%	**54,8%**	9,7%
Recharge de plage	1	2,034	0,697	232	0,9%	3,9%	1,3%	19,8%	**14,2%**	46,6%	13,4%
Épi perméable	1	1,00	0,697	36	8,3%	16,7%	2,8%	11,1%	**2,8%**	50,0%	8,3%
Épi imperméable	0	0,586	0,859	29	0,0%	31,0%	3,4%	**13,8%**	6,9%	37,9%	6,9%
Brise-lame émergé	0	0,24	0,697	25	4,0%	32,0%	4,0%	**12,0%**	4,0%	40,0%	4,0%
Brise-lame à crête basse	-3	-0,411	0,697	56	10,7%	**42,9%**	1,8%	1,8%	3,6%	28,6%	10,7%
Brise-lame submergé	-3	-0,851	0,697	94	12,8%	**44,7%**	2,1%	2,1%	6,4%	25,5%	6,4%
Rip-rap	-3	-1,00	0,375	7	0,0%	**42,9%**	14,3%	28,6%	0,0%	14,3%	0,0%
Mur de protection	-3	-1,966	0,859	29	6,9%	**51,7%**	17,2%	20,7%	0,0%	3,4%	0,0%
Structure réflexive	-3	-2,00	0,697	3	0,0%	**66,7%**	0,0%	33,3%	0,0%	0,0%	0,0%
Enrochement	-3	-3,30	0,697	20	30,0%	**60,0%**	0,0%	10,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Tableau 22. Résultats des effets sur les services écologiques d'ordre écosystémique dans le contexte du secteur d'étude de Port-Daniel (A0102 - Flèche littorale, sable, microtidal et énergie des vagues élevée)

OPC	% seuil	Moy	N	-5	-3	-1	0	1	3	5
Végétalisation terrestre	3	3,125	40	0,0%	0,0%	0,0%	2,5%	2,5%	**82,5%**	12,5%
Végétalisation aquatique	3	3,000	1	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	**100,0%**	0,0%
Méga-recharge	3	2,700	30	0,0%	6,7%	0,0%	10,0%	0,0%	**63,3%**	20,0%
Épi perméable	3	1,220	50	6,0%	18,0%	4,0%	10,0%	2,0%	**46,0%**	14,0%
Recharge d'avant-plage	1	1,536	110	1,8%	14,5%	0,9%	13,6%	**10,0%**	49,1%	10,0%
Recharge de plage	0	0,609	476	6,9%	17,4%	4,8%	**19,3%**	9,7%	33,0%	8,8%
Brise-lame émergé	-3	-0,471	51	5,9%	**47,1%**	2,0%	5,9%	2,0%	31,4%	5,9%
Épi imperméable	-3	-0,482	83	4,8%	**44,6%**	6,0%	8,4%	2,4%	27,7%	6,0%
Brise-lame à crête basse	-3	-0,920	88	11,4%	**47,7%**	3,4%	3,4%	3,4%	22,7%	8,0%
Brise-lame submergé	-3	-0,925	106	11,3%	**46,2%**	2,8%	3,8%	6,6%	23,6%	5,7%
Rip-rap	-3	-1,000	7	0,0%	**42,9%**	14,3%	28,6%	0,0%	14,3%	0,0%
Structure réflexive	-3	-2,125	8	12,5%	**50,0%**	0,0%	37,5%	0,0%	0,0%	0,0%
Mur de protection	-3	-2,738	126	19,0%	**60,3%**	6,3%	11,9%	0,0%	1,6%	0,8%
Enrochement	-3	-3,364	66	34,8%	**54,5%**	3,0%	6,1%	0,0%	1,5%	0,0%

Tableau 23. Résultats des effets sur les services écologiques d'ordre culturel dans le contexte du secteur d'étude de Port-Daniel (A0102 - Flèche littorale, sable, microtidal et énergie des vagues élevée)

OPC	% seuil	Moy	N	-5	-3	-1	0	1	3	5
Végétalisation terrestre	3	3,026	38	0,0%	0,0%	0,0%	2,6%	2,6%	**86,8%**	7,9%
Végétalisation aquatique	3	3,000	1	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	**100,0%**	0,0%
Méga-recharge	3	2,700	30	0,0%	6,7%	0,0%	10,0%	0,0%	**63,3%**	20,0%
Recharge d'avant-plage	3	1,723	101	0,0%	12,9%	1,0%	14,9%	**10,9%**	50,5%	9,9%
Épi perméable	3	1,413	46	6,5%	13,0%	4,3%	10,9%	2,2%	**50,0%**	13,0%
Recharge de plage	1	1,490	353	2,3%	9,9%	3,4%	**19,5%**	11,9%	41,6%	11,3%
Brise-lame émergé	-3	-0,196	46	6,5%	**41,3%**	2,2%	6,5%	2,2%	34,8%	6,5%
Épi imperméable	-3	-0,481	79	5,1%	**44,3%**	5,1%	8,9%	2,5%	29,1%	5,1%
Brise-lame à crête basse	-3	-0,718	71	11,3%	**46,5%**	1,4%	2,8%	4,2%	23,9%	9,9%
Brise-lame submergé	-3	-0,889	99	12,1%	**45,5%**	2,0%	3,0%	7,1%	24,2%	6,1%
Rip-rap	-3	-1,000	7	0,0%	**42,9%**	14,3%	28,6%	0,0%	14,3%	0,0%
Structure réflexive	-3	-1,500	4	0,0%	**50,0%**	0,0%	50,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Mur de protection	-3	-2,570	93	16,1%	**60,2%**	7,5%	12,9%	0,0%	2,2%	1,1%
Enrochement	-3	-3,179	28	25,0%	**64,3%**	0,0%	10,7%	0,0%	0,0%	0,0%

5.1.3 Mesures d'adaptation retenue pour le site

Trois scénarios[1] de MAAC ont été retenus pour l'évaluation avec la méthode d'analyse multicritère : recharge de plage, recharge de plage avec épi imperméable et enrochement (tableau 24).

Le premier scénario est composé d'une recharge de plage. Ce scénario a été sélectionné en raison du type de côte du site : une flèche littorale (côte basse meuble). Une recharge de plage convient généralement à l'évolution dynamique de ce type de côte. Le second scénario est composé d'une recharge de plage et d'un épi imperméable. L'épi imperméable a été combiné à la recharge afin de favoriser la rétention des sédiments de la recharge de plage et d'ainsi augmenter la durée de vie. L'enrochement a été retenu, par défaut, pour l'ensemble des sites, car cet OPC sert de point de référence pour le MTMD.

[1] Dans le cheminement de projet du MTMD, les termes « scénario », « solution » et « variante » sont associés à une étape précise. Les solutions sont analysées dans l'étude des solutions avant le PC1. Les scénarios sont analysés à l'avant-projet préliminaire avant le PC2 et les variantes sont analysées à l'avant-projet définitif avant le PC3. Dans la section 5 du présent rapport, le terme « scénario » est utilisé indépendamment de cette terminologie.

Au regard des résultats de l'algorithme, la végétalisation terrestre et aquatique n'a pas été retenue comme OPC principal en raison de la faible certitude d'efficacité face aux aléas côtiers. Ces deux OPC pourraient toutefois être ajoutés comme OPC complémentaire, dans la définition des scénarios, à l'étape de l'avant-projet préliminaire. Les épis perméables n'ont également pas été retenus en raison du faible volume sédimentaire transporté par la dérive littorale. La méga-recharge n'a pas été considérée pour des raisons budgétaires et de disponibilité des matériaux.

Tableau 24. MAAC retenus pour l'évaluation avec la méthode d'analyse multicritère au site de Port-Daniel

Mesures d'adaptation aux aléas côtiers	Description
Recharge de plage	Aménagement d'une recharge de plage avec des sédiments d'emprunt dont la taille granulométrique est comparable aux sédiments présents naturellement.
Recharge de plage avec épi imperméable	Aménagement d'une recharge de plage avec des sédiments d'emprunt dont la taille granulométrique est comparable aux sédiments présents naturellement en combinaison avec un épi imperméable positionné à l'embouchure de la rivière Port-Daniel du côté sud. L'objectif de l'épi imperméable est d'engendrer une rétention des sédiments d'emprunt de la recharge de plage et de forcer l'écoulement du chenal de l'estuaire de la rivière vers le large.
Enrochement	Aménagement d'un enrochement en haut de plage.

5.1.4 Résultats de l'analyse multicritère

5.1.4.1 Étape 1 – Pondération des critères de sélection

Les critères de sélection de MAAC ont été pondérés par les répondants (tableau 20) du questionnaire au regard des caractéristiques du site de Port-Daniel. Les critères pondérés correspondent à la version 1 de la liste de critère. Le poids attribué à chacun des critères varie selon l'organisation (MTMD, municipal, organisme). La distribution des poids entre les critères pour chacune des organisations est présentée à la figure 12A. La comparaison des moyennes générales et spécifiques à chaque organisation est présentée à la figure 12B. Pour chacun des critères, l'écart-type a été calculé en fonction du poids attribué par l'ensemble des participants. Il a été additionné et soustrait à la moyenne générale afin d'établir une plage d'analyse des moyennes spécifiques à chaque type d'organisation. Sur la figure 12B, les signes plus et moins représentent respectivement l'addition et la soustraction de l'écart-type à la moyenne générale.

Les poids moyens des critères « coûts de construction », « effets sur les processus côtiers » et « efficacité face à la submersion » sont les plus élevés (respectivement 10,9 %, 10,0 % et 9,8 %) (figure 12B). La distribution des poids du critère « coûts de construction » varie entre 0,0 % et 46,5 %, ce qui en fait le

critère avec la plus grande variabilité (figrue 12A). À noter que le poids de 46,5 % a été attribué par un répondant à l'échelle municipal. Ainsi, la moyenne municipale est à l'extérieur de l'écart-type pour ce critère dans une perspective globale (figure 12B). D'ailleurs, la moyenne globale pour ce critère présente la plus large variabilité entre les organisations. Les poids moyens des critères « Acquisition immobilière (bâtiments) » et « Acquisition immobilière (terrains) » sont les plus faibles (respectivement 2,9 % et 2,5 %) (figure 12B). Pour le site de Port-Daniel, trois moyennes spécifiques pour trois critères distincts sont à l'extérieur de cette plage d'analyse. Pour le critère « coût de construction », la moyenne spécifique municipale est supérieure à la plage d'analyse. Pour le critère « effets sur les processus côtiers », la moyenne spécifique de la catégorie « organisme » est légèrement supérieure à la plage d'analyse. Pour le critère « inspection et entretien », la moyenne spécifique municipale est légèrement inférieure à la plage d'analyse.

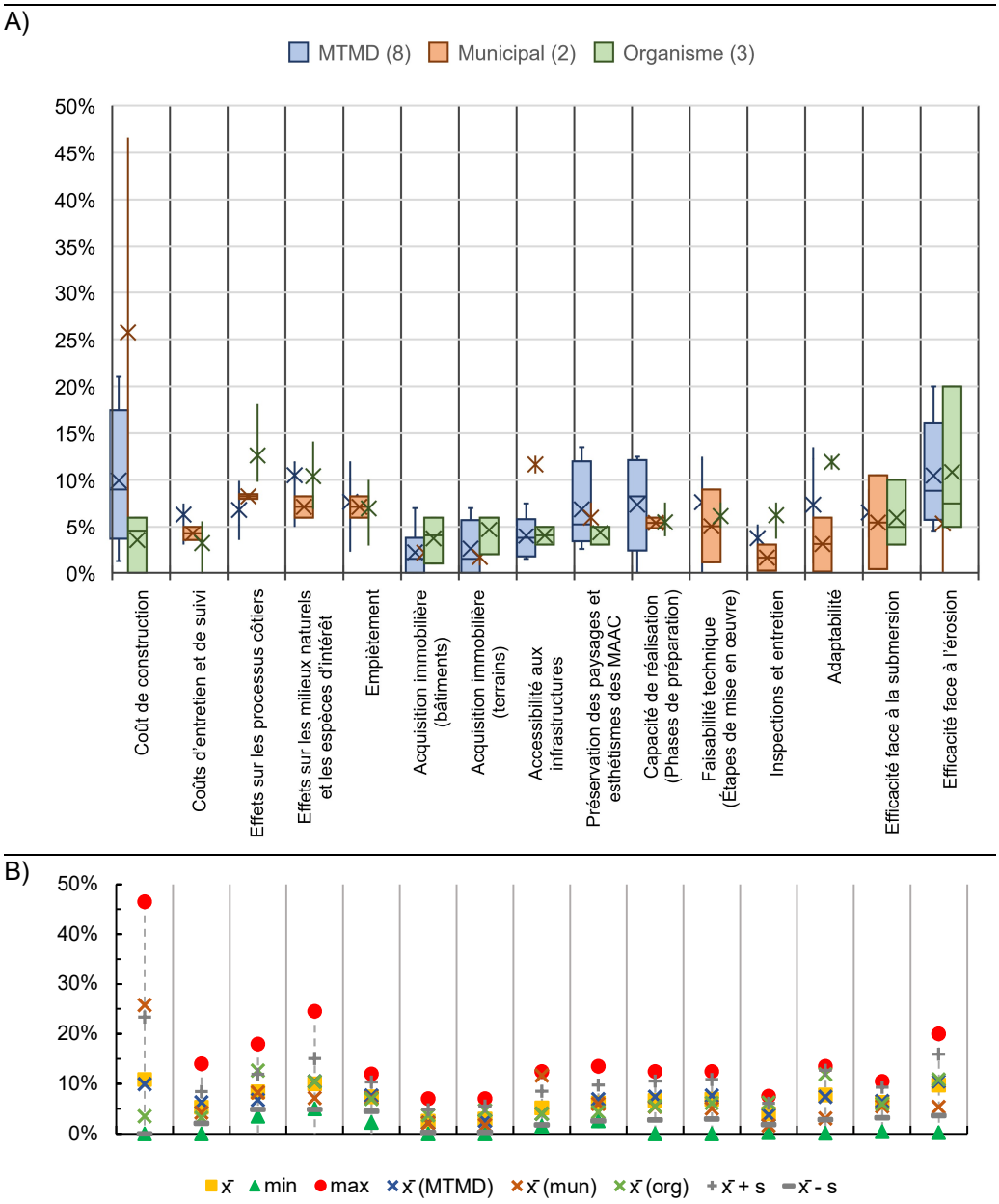

Figure 12. A) Distribution du poids attribué aux critères (version 1) par les répondants pour chacun des types d'organisation au regard des caractéristiques du site de Port-Daniel (A0102). Le nombre de répondants par organisme est inscrit entre parenthèses. B) Comparaison de la moyenne générale des répondants (carré jaune) et des moyennes spécifiques à chacun des types d'organisation (x bleu (MTMD), orange (municipalité et MRC) et vert (autre organisme)). Le cercle rouge et le triangle vert représentent le poids le plus élevé et le plus faible attribué au critère en considérant l'ensemble des répondants. Les signes plus et moins représentent respectivement l'addition et la soustraction de l'écart-type à la moyenne générale.

5.1.4.2 Étape 2 –Notation des MAAC au regard de chacun des critères de sélection

Les MAAC ont été notées au regard de chacun des critères de sélection (version 2) et des caractéristiques du SSEC du site de Port-Daniel (tableau 25). Une échelle qualitative de 9 échelons (1 = très mauvais; 9 = très bon) a été utilisée pour la notation.

Tableau 25. Notation des MAAC au regard de chacun des critères de sélection pour le site de Port-Daniel (A0102)

	Critère de sélection	Recharge de plage	Épi imperméable avec recharge de plage	Enrochement
	Contexte environnemental			
1	Effets sur les processus côtiers	8	6	2
2	Effets sur les milieux naturels et les espèces d'intérêts	5	7	2
3	Empiètement	8	5	3
	Qualité de vie et récréotourisme			
4	Accessibilité aux infrastructures et activités récréotouristiques	9	9	7
5	Préservation des paysages et esthétismes des mesures d'adaptation	8	5	1
	Expertise			
6	Expertise pour la phase de préparation	6	4	8
7	Expertise pour la phase de construction	8	4	7
8	Expertise pour les suivis et inspections	4	4	8
	Caractéristiques techniques des mesures d'adaptation			
9	Adaptabilité	8	5	4
10	Certitude de l'efficacité face aux aléas côtiers	6	7	8
	Coûts du projet			
11	Coût de construction	7	4	7
12	Coût d'entretien et de suivi	3	5	7

5.1.4.3 Étape 3 – Hiérarchisation des MAAC

La hiérarchisation des MAAC a été réalisée avec la méthode PROMETHEE en fonction de la pondération des critères de sélection (étape 1) et de la notation des MAAC au regard de chacun des critères de sélection (étape 2). La hiérarchisation des MAAC est présentée pour quatre profils d'acteur (figure 13). Ces scénarios varient selon la moyenne des poids attribuée aux critères par les différents groupes de répondants.

L'ordre de hiérarchisation des MAAC est le même dans les quatre scénarios : (1) recharge de plage, (2) recharge de plage avec épi maritime et (3) enrochement. Dans les scénarios qui impliquent tous les répondants et les

répondants du MTMD, la position 1 surpasse largement les deux autres MAAC qui obtiennent des résultats pratiquement équivalents. Dans le scénario impliquant les répondants de l'échelle municipale, la position 1 surpasse également largement les deux autres scénarios, mais la position 2 surpasse légèrement la position 3. Finalement, dans le scénario impliquant les répondants de la catégorie « organisme », le surpassement est pratiquement équivalent entre la position 1 et 2, puis la position 2 et 3.

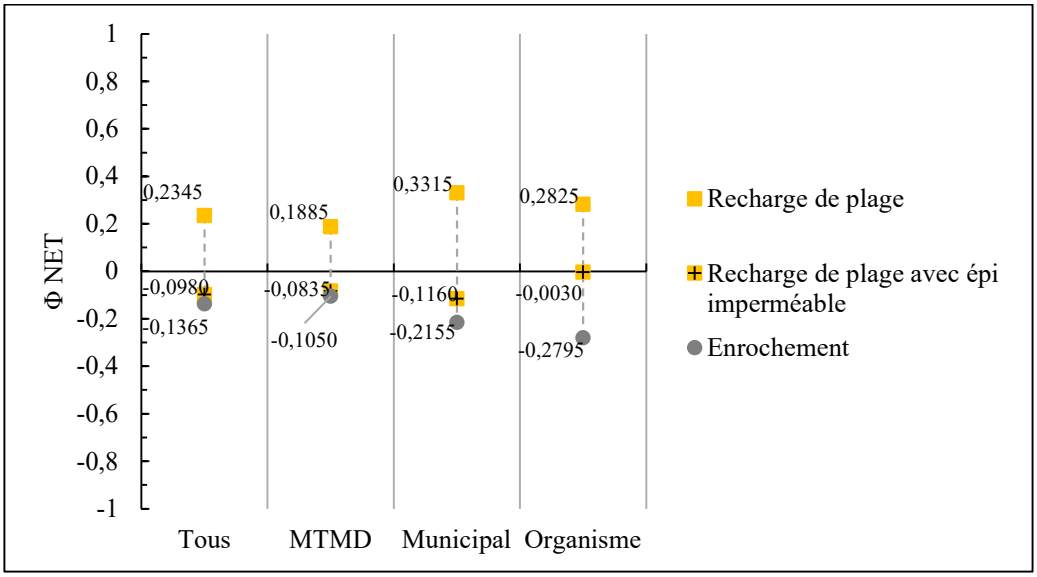

Figure 13. Quatre scénarios de hiérarchisation des MAAC pour le site de Port-Daniel en fonction de la pondération moyenne des critères de sélection (étape 1) de différents groupes de répondants.

5.2 Cap-des-Rosiers (B0504)

Les résultats du secteur routier à l'étude de Cap-des-Rosiers (B0504) sont présentés dans les sous-sections suivantes.

5.2.1 Description du site d'étude

Le secteur routier à l'étude a une longueur de 380 mètres. Il est situé au sommet d'une falaise rocheuse bordée par un estran de graviers et une zone infralittorale rocheuse (figure 14). Deux sous-secteurs sont particulièrement problématiques en raison de la présence de surcreusements au sommet de la falaise rocheuse comblés par des matériaux meubles. Un enrochement a été aménagé par le passé à la base d'un des sous-secteurs. Le secteur est situé dans la cellule hydrosédimentaire de Jersey Cove. La dérive littorale est dirigée vers le nord-ouest. Le marnage est microtidal et l'énergie des vagues est élevée. Le secteur

en amont du site (sud-est) par rapport à la dérive littorale est constitué en majorité d'une falaise rocheuse. L'élévation de la côte diminue progressivement de chaque côté du ruisseau Kavanagh où il y a présence sur de courts segments côtiers de falaise meuble et de terrasse de plage.

Le bas estran est colonisé par des algues (fucacées). Le site est principalement un secteur résidentiel dans lequel quelques infrastructures touristiques sont présentes. Les activités pratiquées sont de la relaxation et des rassemblements. Le site présente une biodiversité et une valeur socioculturelle élevée.

Figure 14. Site d'étude de Cap-des-Rosiers (B0504). (A) Imagerie aérienne du site d'étude situé au sommet d'une falaise rocheuse. Représentation de la dérive littorale principale et de l'exutoire du ruisseau Kavanagh. (B) Vue de la cellule hydrosédimentaire au sud-est du site. (C) Vue du site au sommet de la falaise rocheuse et enrochement au pied de la falaise.

5.2.2 Résultats de l'évaluation des effets géomorphologiques, écosystémiques et culturels des OPC (algorithme)

Les résultats des effets géomorphologiques, écosystémiques et culturels des OPC dans le contexte des quatre caractéristiques environnementales du site d'étude de Cap-des-Rosiers (falaise rocheuse, type de substrat non applicable (NA), microtidal et énergie des vagues élevée) sont présentés respectivement au tableau 26, tableau 27 et tableau 28. Deux OPC avaient un nombre d'effets observés suffisant afin d'être évalués avec l'algorithme : enrochement et mur de protection.

Le nombre d'effets observés pour ces deux OPC est de 1. Ainsi, les résultats de l'algorithme dans ce type d'environnement côtier sont peu nombreux et imprécis. Ce fait est expliqué par le manque d'étude réalisée dans ce type d'environnement à l'échelle internationale.

Tableau 26. Résultats de l'effet géomorphologique dans le contexte du secteur d'étude de Cap-des-Rosiers (B0504)

OPC	% seuil	Moy	IC	N	-5	-3	-1	0	1	3	5
Enrochement	-3	-3,00	0,56	1	0,0%	100,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Mur de protection	-5	-5,00	0,56	1	100,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Tableau 27. Résultats des effets sur les services écologiques d'ordre écosystémique dans le contexte du secteur d'étude de Cap-des-Rosiers (B0504)

OPC	% seuil	Moy	N	-5	-3	-1	0	1	3	5
Enrochement	-3	-3	1	0,0%	100,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Mur de protection	-5	-5	1	100,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Tableau 28. Résultats des effets sur les services écologiques d'ordre culturel dans le contexte du secteur d'étude de Cap-des-Rosiers (B0504)

OPC	% seuil	Moy	N	-5	-3	-1	0	1	3	5
Enrochement	-3	-3	1	0,0%	100,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Mur de protection	-5	-5	1	100,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

5.2.3 Mesures d'adaptation retenue pour le site

Trois scénarios de MAAC ont été retenus pour l'évaluation avec la méthode d'analyse multicritère : déplacement de la route, recharge de plage en matériaux grossiers et enrochement (tableau 29).

Dans le contexte du site de Cap-des-Rosiers, peu d'information est tirée de l'algorithme en raison du très faible nombre d'effets observés dans le contexte de côte rocheuse. Ainsi, le premier scénario est le déplacement de la route 132 sur une distance d'environ 250 mètres. Ce scénario a été retenu en raison de l'espace disponible nécessaire afin de sortir l'infrastructure de la zone à risque. Le second scénario est une recharge de plage en galet, soit des sédiments largement supérieurs aux sédiments présents sur l'estran. L'objectif est de protéger le sommet de la falaise rocheuse par une solution dynamique qui favorise l'absorption de l'énergie des vagues. L'enrochement a été retenu, par défaut, pour l'ensemble des sites, car cet OPC sert de point de référence pour le MTMD.

Tableau 29. MAAC retenus pour l'évaluation avec la méthode d'analyse multicritère au site de Cap-des-Rosiers

Mesures d'adaptation aux aléas côtiers	Description
Déplacement de la route	Déplacement de la route 132 sur une distance d'environ 250 mètres devant les infrastructures actuellement en place.
Recharge de plage (galet)	Aménagement d'une recharge de plage avec des sédiments d'emprunt, dont la taille granulométrique largement supérieure aux sédiments présents sur l'estran.
Enrochement	Aménagement d'un enrochement à la base de la falaise.

Les OPC retenus par l'équipe de sélection pour les fins de l'exercice réalisé dans le cadre du projet de recherche visaient à répondre à un processus d'érosion occasionné par des éléments hydrodynamiques. Au regard de la formation lithostratigraphique, il est possible que la problématique d'érosion soit due à des processus terrestres. Ainsi, la pertinence de mesures d'adaptation visant à contrer ce type de processus devrait être évaluée dans les analyses futures.

5.2.4 Résultats de l'analyse multicritère

5.2.4.1 Étape 1 – Pondération des critères de sélection

Les critères de sélection de MAAC ont été pondérés par les répondants (tableau 20) du questionnaire au regard des caractéristiques du site de Cap-des-Rosiers. Les critères pondérés correspondent à la version 1 de la liste de critère. Le poids attribué à chacun des critères varie selon l'organisation (MTMD, municipal, organisme). La distribution des poids entre les critères pour chacune des organisations est présentée à la figure 15A. La comparaison des moyennes générales et spécifiques à chaque organisation est présentée à la figure 15B. Pour chacun des critères, l'écart-type a été calculé en fonction du poids attribué par l'ensemble des participants. Il a été additionné et soustrait à la moyenne générale afin d'établir une plage d'analyse des moyennes spécifiques à chaque

type d'organisation. Sur la figure 15B, les signes plus et moins représentent respectivement l'addition et la soustraction de l'écart-type à la moyenne générale.

Le poids moyen des critères « coûts de construction » et « coûts d'entretien et de suivi » sont les plus élevés (respectivement 11,6 % et 10,4 %) (figure 15B). La distribution des poids du critère « coûts de construction » varie entre 2,5 % et 28,0 %, ce qui en fait le critère avec la plus grande variabilité (figure 15A). À noter que ces deux poids ont été attribués par des répondants du MTMD. Les poids moyens des critères « Expertise pour la préparation » et « Expertise pour les suivis, inspections et entretiens » sont les plus faibles (respectivement 4,1 % et 4,4 %) (figure 15B). Pour le site de Cap-des-Rosiers, trois moyennes spécifiques pour trois critères distincts sont à l'extérieur de la plage d'analyse d'écart-type (figure 15B). Pour les critères « effet sur les processus côtiers » et « Adaptabilité », la moyenne spécifique de la catégorie « organisme » est légèrement supérieure à la plage d'analyse. Pour le critère « effets sur les milieux naturels », la moyenne spécifique de la catégorie « organisme » est légèrement inférieure à la plage d'analyse.

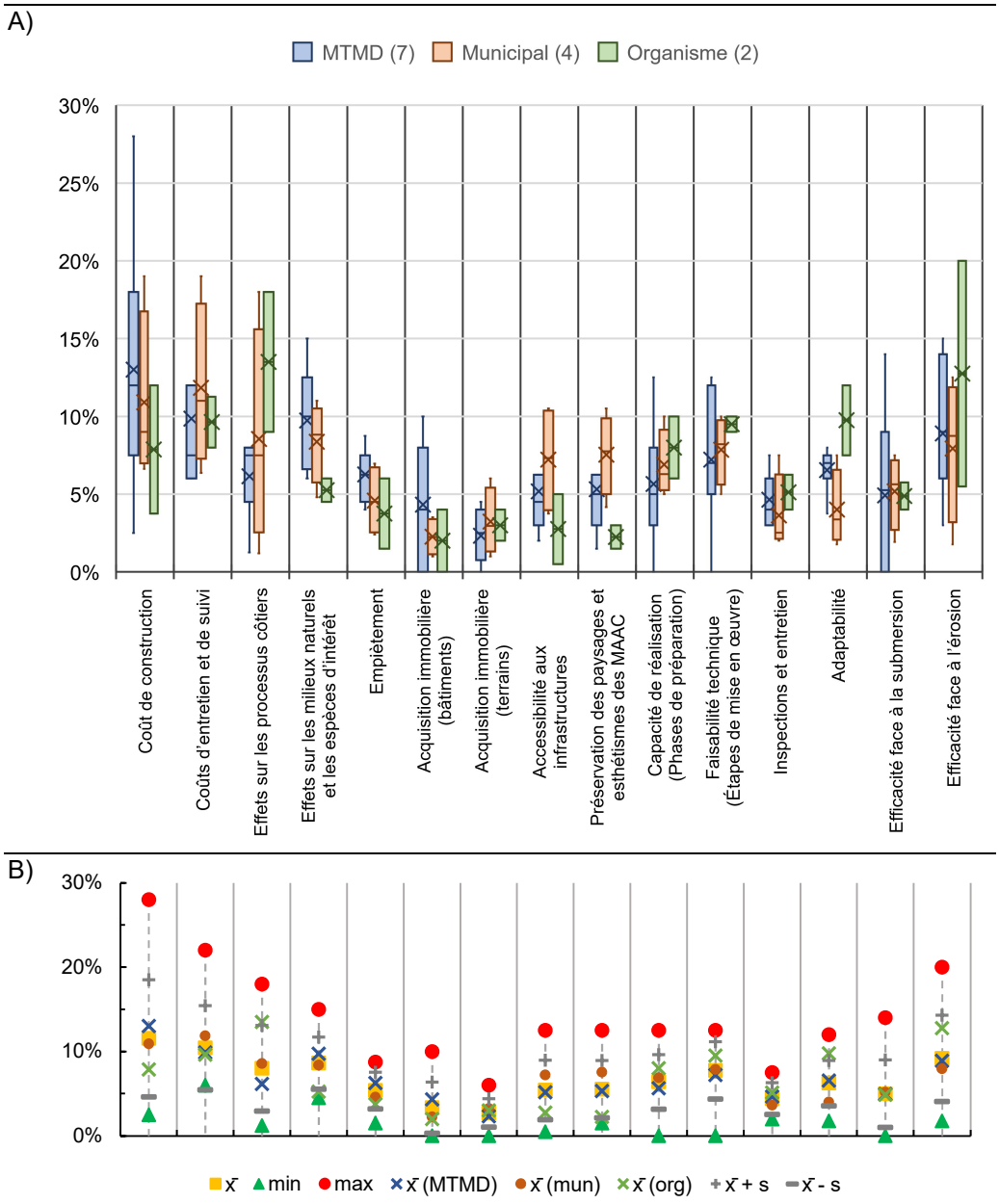

Figure 15. A) Distribution du poids attribué par les répondants aux critères (version 1) par les répondants pour chacun des types d'organisation au regard des caractéristiques du site de Cap-des-Rosiers (Gaspé) (B0504). Le nombre de répondants par organisme est inscrit entre parenthèses. B) Comparaison de la moyenne générale des répondants (carré jaune) et des moyennes spécifiques à chacun des types d'organisation (x bleu (MTMD), orange (municipalité et MRC) et vert (autre organisme)). Le cercle rouge et le triangle vert représentent le poids le plus élevé et le plus faible attribué au critère en considérant l'ensemble des répondants. Les signes plus et moins représentent respectivement l'addition et la soustraction de l'écart-type à la moyenne générale.

5.2.4.2 Étape 2 – Notation des MAAC au regard de chacun des critères de sélection

Les MAAC ont été notées au regard de chacun des critères de sélection (version 2) et des caractéristiques du SSEC du site de Cap-des-Rosiers (tableau 30). Une échelle qualitative de 9 échelons (1 = très mauvais; 9 = très bon) a été utilisée pour la notation à l'exception du critère « Coûts de construction » où des estimations de coûts basées sur des projets antécédents ont été utilisées.

Tableau 30. Notation des MAAC au regard de chacun des critères de sélection pour le site de Cap-des-Rosiers (B0504)

	Critère de sélection	Déplacement de route	Recharge de plage [galet]	Enrochement
	Contexte environnemental			
1	Effets sur les processus côtiers	9	7	8
2	Effets sur les milieux naturels et les espèces d'intérêts	7	4	5
3	Empiètement	9	7	3
	Qualité de vie et récréotourisme			
4	Accessibilité aux infrastructures et activités récréotouristiques	7	9	9
5	Préservation des paysages et esthétismes des mesures d'adaptation	6	9	8
	Expertise			
6	Expertise pour la phase de préparation	2	4	5
7	Expertise pour la phase de construction	5	4	3
8	Expertise pour les suivis et inspections	8	2	4
	Caractéristiques techniques des mesures d'adaptation			
9	Adaptabilité	8	5	2
10	Efficacité face à l'érosion	9	2	5
	Coûts du projet			
11	Coût de construction	2,5	5	3,6
12	Coût d'entretien et de suivi	9	1	4

5.2.4.3 Étape 3 – Hiérarchisation des MAAC

La hiérarchisation des MAAC a été réalisée avec la méthode PROMETHEE en fonction de la pondération des critères de sélection (étape 1) et de la notation des MAAC au regard de chacun des critères de sélection (étape 2). La hiérarchisation des MAAC est présentée pour quatre profils d'acteur (figure 16). Ces scénarios varient selon la moyenne des poids attribuée aux critères par les différents groupes de répondants.

L'ordre de hiérarchisation des MAAC est le même dans les quatre scénarios : (1) déplacement de route, (2) enrochement et (3) recharge de plage. Pour

l'ensemble des scénarios, le surpassement est pratiquement équivalent entre la position 1 et 2, puis la position 2 et 3.

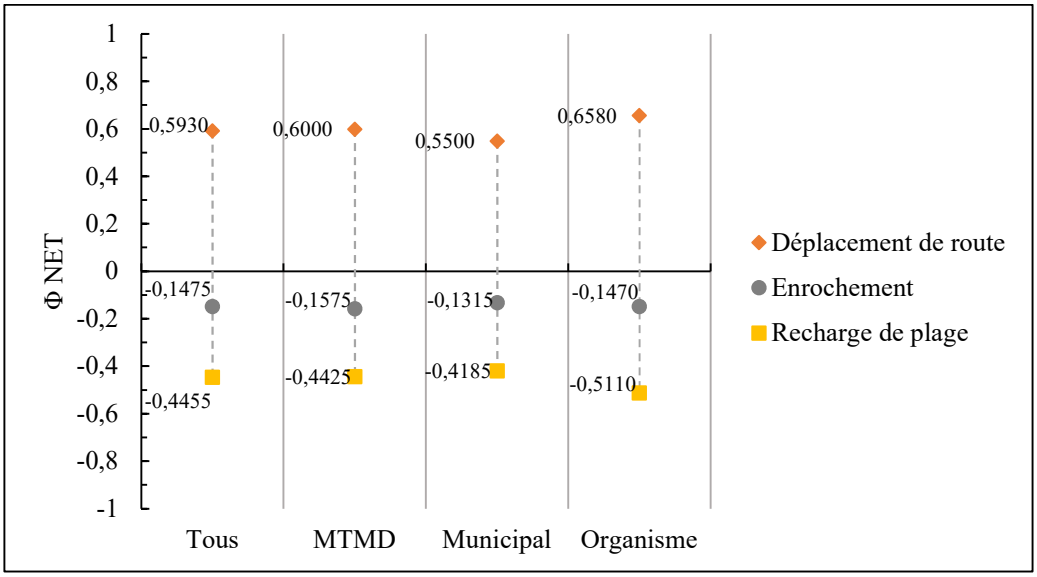

Figure 16. Quatre scénarios de hiérarchisation des MAAC pour le site de Cap-des-Rosiers en fonction de la pondération moyenne des critères de sélection (étape 1) de différents groupes de répondants.

5.3 Saint-Ulric (D0202)

Les résultats du secteur routier à l'étude de Saint-Ulric (D0202) sont présentés dans les sous-sections suivantes.

5.3.1 Description du site d'étude

Le secteur routier a une longueur d'environ 2,1 km. Il est situé sur une terrasse de plage sableuse majoritairement naturelle (figure 17). Le secteur est situé dans la cellule hydrosédimentaire de la Tartigou. La dérive littorale est dirigée vers le sud-ouest. Le marnage est mesotidal et l'énergie des vagues est élevée. Trois résidences sont situées du côté mer du secteur routier. Ces résidences sont protégées par de courts enrochements ou blocs déversés. Le bas estran est principalement rocheux avec des placages de sédiments et des blocs épars colonisés par des algues (fucacées). La plage est composée de sable et gravier. Le côté terrestre du secteur routier est occupé par des parcelles cultivables ainsi que trois bâtiments patrimoniaux.

Figure 17. Site d'étude de Saint-Ulric (D0202). (A) Imagerie aérienne du site d'étude situé au sommet d'une terrasse de plage. Représentation de la dérive littorale principale. (B et C) Vue du site au sommet de la terrasse de plage.

5.3.2 Résultats de l'évaluation des effets géomorphologiques, écosystémiques et culturels des OPC (algorithme)

Les résultats des effets géomorphologiques, écosystémiques et culturels des OPC dans le contexte des quatre caractéristiques environnementales du site d'étude de Saint-Ulric (terrasse de plage, sable, mesotidal et énergie des vagues élevée) sont présentés respectivement au tableau 31, tableau 32 et tableau 33. Un total de 14 OPC a un nombre d'effets observés suffisant afin d'être évalué avec l'algorithme.

Pour les résultats géomorphologiques, neuf OPC sur 14 ont un indice de correspondance (IC) moyen (0,697), deux ont un IC élevé (0,859) et trois ont un IC très faible (0,375). Alors que l'IC est généralement moyen, le nombre d'effets observés (N) est généralement élevé. Ce constat est dû au faible ratio entre le `nb.EO.min` et le `nb.EO.tot` (4.1.2.2) dans le contexte des caractéristiques du site, ce qui engendre un élargissement des caractéristiques environnementales initiales afin d'augmenter le `nb.EO`.

Généralement, l'ensemble des techniques souples obtiennent des résultats positifs. Également, les résultats démontrent clairement les effets géomorphologiques négatifs des structures réflectives (enrochement et mur de protection) dans un contexte de côte meuble. Plus spécifiquement, la végétalisation terrestre et aquatique présente de bons résultats en termes de performance (% seuil et moy). Cependant, l'incertitude de ces résultats est élevée. La végétalisation terrestre présente un IC de 0,375 et la végétation aquatique présente un N de 1. Les trois types de recharge sédimentaire (méga-recharge, recharge d'avant-plage et recharge de plage) présentent une bonne performance, tout en présentant une correspondance très faible pour la méga-recharge et moyenne, voire bonne pour la recharge d'avant-plage et la recharge de plage (N de 232). L'épi perméable, l'épi imperméable et le brise-lame émergé obtiennent des indices de performance passable, tout en présentant une correspondance moyenne, voire bonne (N de 29, 25 et 56; IC de 0,859 et de 0,697). Les autres structures rigides présentent des résultats négatifs dans les deux indices de performance et une correspondance généralement moyenne, voire bonne dans certains cas.

Pour les résultats d'ordre écosystémique et culturel (tableau 32 et tableau 33), la végétalisation terrestre et aquatique, la méga-recharge, les recharges d'avant-plage et de plage ainsi que l'épi perméable obtiennent un indice de performance positif et un N élevé, voire très élevé (recharge d'avant-plage et de plage) à l'exception de la végétalisation aquatique (N de 1). L'ensemble des structures rigides, à l'exception de l'épi perméable, obtiennent des indices de performance négatifs quant à leurs effets écosystémiques.

Tableau 31. Résultats de l'effet géomorphologique dans le contexte du secteur d'étude de Saint-Ulric (D0202)

OPC	% seuil	Moy	IC	N	-5	-3	-1	0	1	3	5
Végétalisation terrestre	3	3,026	0,375	38	0,0%	0,0%	0,0%	2,6%	2,6%	**86,8%**	7,9%
Végétalisation aquatique	3	3,000	0,697	1	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	**100,0%**	0,0%
Méga-recharge	3	2,700	0,375	30	0,0%	6,7%	0,0%	10,0%	0,0%	**63,3%**	20,0%
Recharge d'avant-plage	3	2,032	0,697	31	0,0%	6,5%	0,0%	19,4%	9,7%	**54,8%**	9,7%
Recharge de plage	1	2,034	0,697	232	0,9%	3,9%	1,3%	19,8%	**14,2%**	46,6%	13,4%
Épi perméable	1	1,000	0,697	36	8,3%	16,7%	2,8%	11,1%	**2,8%**	50,0%	8,3%
Épi imperméable	0	0,586	0,859	29	0,0%	31,0%	3,4%	**13,8%**	6,9%	37,9%	6,9%
Brise-lame émergé	0	0,240	0,697	25	4,0%	32,0%	4,0%	**12,0%**	4,0%	40,0%	4,0%
Brise-lame à crête basse	-3	-0,411	0,697	56	10,7%	**42,9%**	1,8%	1,8%	3,6%	28,6%	10,7%
Brise-lame submergé	-3	-0,851	0,697	94	12,8%	**44,7%**	2,1%	2,1%	6,4%	25,5%	6,4%
Rip-rap	-3	-1,000	0,375	7	0,0%	**42,9%**	14,3%	28,6%	0,0%	14,3%	0,0%
Mur de protection	-3	-1,966	0,859	29	6,9%	**51,7%**	17,2%	20,7%	0,0%	3,4%	0,0%
Structure réflexive	-3	-2,000	0,697	3	0,0%	**66,7%**	0,0%	33,3%	0,0%	0,0%	0,0%
Enrochement	-3	-3,300	0,697	20	30,0%	**60,0%**	0,0%	10,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Tableau 32. Résultats des effets sur les services écologiques d'ordre écosystémique dans le contexte du secteur d'étude de Saint-Ulric (D0202)

OPC	% seuil	Moy	N	-5	-3	-1	0	1	3	5
Végétalisation terrestre	3	3,125	40	0,0%	0,0%	0,0%	2,5%	2,5%	**82,5%**	12,5%
Végétalisation aquatique	3	3,000	1	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	**100,0%**	0,0%
Méga-recharge	3	2,700	30	0,0%	6,7%	0,0%	10,0%	0,0%	**63,3%**	20,0%
Épi perméable	3	1,220	50	6,0%	18,0%	4,0%	10,0%	2,0%	**46,0%**	14,0%
Recharge d'avant-plage	1	1,536	110	1,8%	14,5%	0,9%	13,6%	**10,0%**	49,1%	10,0%
Recharge de plage	0	0,609	476	6,9%	17,4%	4,8%	**19,3%**	9,7%	33,0%	8,8%
Brise-lame émergé	-3	-0,471	51	5,9%	**47,1%**	2,0%	5,9%	2,0%	31,4%	5,9%
Épi imperméable	-3	-0,482	83	4,8%	**44,6%**	6,0%	8,4%	2,4%	27,7%	6,0%
Brise-lame à crête basse	-3	-0,920	88	11,4%	**47,7%**	3,4%	3,4%	3,4%	22,7%	8,0%
Brise-lame submergé	-3	-0,925	106	11,3%	**46,2%**	2,8%	3,8%	6,6%	23,6%	5,7%
Rip-rap	-3	-1,000	7	0,0%	**42,9%**	14,3%	28,6%	0,0%	14,3%	0,0%
Structure réflexive	-3	-2,125	8	12,5%	**50,0%**	0,0%	37,5%	0,0%	0,0%	0,0%
Mur de protection	-3	-2,738	126	19,0%	**60,3%**	6,3%	11,9%	0,0%	1,6%	0,8%
Enrochement	-3	-3,364	66	34,8%	**54,5%**	3,0%	6,1%	0,0%	1,5%	0,0%

Tableau 33. Résultats des effets sur les services écologiques d'ordre culturel dans le contexte du secteur d'étude de Saint-Ulric (D0202)

OPC	% seuil	Moy	N	-5	-3	-1	0	1	3	5
Végétalisation terrestre	3	3,125	40	0,0%	0,0%	0,0%	2,5%	2,5%	**82,5%**	12,5%
Végétalisation aquatique	3	3,000	1	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	**100,0%**	0,0%
Méga-recharge	3	2,700	30	0,0%	6,7%	0,0%	10,0%	0,0%	**63,3%**	20,0%
Épi perméable	3	1,220	50	6,0%	18,0%	4,0%	10,0%	2,0%	**46,0%**	14,0%
Recharge d'avant-plage	1	1,536	110	1,8%	14,5%	0,9%	13,6%	**10,0%**	49,1%	10,0%
Recharge de plage	0	0,609	476	6,9%	17,4%	4,8%	**19,3%**	9,7%	33,0%	8,8%
Brise-lame émergé	-3	-0,471	51	5,9%	**47,1%**	2,0%	5,9%	2,0%	31,4%	5,9%
Épi imperméable	-3	-0,482	83	4,8%	**44,6%**	6,0%	8,4%	2,4%	27,7%	6,0%
Brise-lame à crête basse	-3	-0,920	88	11,4%	**47,7%**	3,4%	3,4%	3,4%	22,7%	8,0%
Brise-lame submergé	-3	-0,925	106	11,3%	**46,2%**	2,8%	3,8%	6,6%	23,6%	5,7%
Rip-rap	-3	-1,000	7	0,0%	**42,9%**	14,3%	28,6%	0,0%	14,3%	0,0%
Structure réflexive	-3	-2,125	8	12,5%	**50,0%**	0,0%	37,5%	0,0%	0,0%	0,0%
Mur de protection	-3	-2,738	126	19,0%	**60,3%**	6,3%	11,9%	0,0%	1,6%	0,8%
Enrochement	-3	-3,364	66	34,8%	**54,5%**	3,0%	6,1%	0,0%	1,5%	0,0%

5.3.3 Mesures d'adaptation retenue pour le site

Trois scénarios de MAAC ont été retenus pour l'évaluation avec la méthode d'analyse multicritère : déplacement de la route, recharge de plage et enrochement (tableau 34).

Le premier scénario est le déplacement de la route 132 sur une distance d'environ cinq kilomètres. Ce scénario a été retenu en raison de l'espace disponible nécessaire afin de sortir l'infrastructure de la zone à risque. Le second scénario est composé d'une recharge de plage. Ce scénario a été sélectionné en raison du type de côte du site : une terrasse de plage (côte basse meuble). Une recharge de plage convient généralement à l'évolution dynamique de ce type de côte. L'enrochement a été retenu, par défaut, pour l'ensemble des sites, car cet OPC sert de point de référence pour le MTMD.

Au regard des résultats de l'algorithme, la végétalisation terrestre et aquatique n'a pas été retenue comme OPC principal en raison de la faible certitude d'efficacité face aux aléas côtiers. Ces deux OPC pourraient toutefois être ajoutés comme OPC complémentaire dans la définition des scénarios à l'étape de l'avant-projet préliminaire. Les épis perméables n'ont également pas été retenus en raison du faible volume sédimentaire transporté par la dérive littorale. La méga-recharge n'a pas été considérée pour des raisons budgétaires et de disponibilité des matériaux.

Tableau 34. MAAC retenus pour l'évaluation avec la méthode d'analyse multicritère au site de Saint-Ulric

Mesures d'adaptation aux aléas côtiers	Description
Déplacement de la route	Déplacement de la route 132 sur une distance d'environ cinq kilomètres le long du chemin de fer actuel entre le pont de la rivière Tartigou (route 132) à l'ouest et la rue des Lacs à l'est.
Recharge de plage	Aménagement d'une recharge de plage avec des sédiments d'emprunt dont la taille granulométrique est comparable aux sédiments présents sur l'estran.
Enrochement	Aménagement d'un enrochement en haut de plage.

5.3.4 Résultats de l'analyse multicritère

5.3.4.1 Étape 1 – Pondération des critères de sélection

Les critères de sélection de MAAC ont été pondérés par les répondants (tableau 20) du questionnaire au regard des caractéristiques du site de Saint-Ulric. Les critères pondérés correspondent à la version 1 de la liste de critère. Le poids attribué à chacun des critères varie selon l'organisation (MTMD, municipal, organisme). La distribution des poids entre les critères pour chacune des organisations est présentée à la figure 18A. La comparaison des moyennes générales et spécifiques à chaque organisation est présentée à la figure 18B. Pour chacun des critères, l'écart-type a été calculé en fonction du poids attribué par l'ensemble des participants. Il a été additionné et soustrait à la moyenne générale afin d'établir une plage d'analyse des moyennes spécifiques à chaque type d'organisation. Sur la figure 18B, les signes plus et moins représentent respectivement l'addition et la soustraction de l'écart-type à la moyenne générale.

Les poids moyens des critères « effets sur les milieux naturels et les espèces d'intérêt », « efficacité face à la submersion », « préservation des paysages et esthétismes des mesures d'adaptation » et coûts de construction » sont les plus élevés (respectivement 11,8 %, 9,0 %, 8,7 % et 8,4 %) (figure 18B). La distribution des poids du critère « effets sur les milieux naturels et les espèces d'intérêt » varie entre 3,0 % et 50,0 %, ce qui en fait le critère avec la plus grande variabilité (figure 18A). À noter que le poids de 50,0 % a été attribué par un répondant de la catégorie « organisme ». Également, pour ce critère, la moyenne spécifique de la catégorie « organisme » est largement supérieure à la plage d'analyse des écarts-types. Les poids moyens des critères « acquisition immobilière (bâtiments) » et « Acquisition immobilière (terrains) » sont les plus faibles (respectivement 4,1 % et 3,3 %) (figure 18B). Pour le site de Saint-Ulric, huit moyennes spécifiques pour trois critères distincts sont à l'extérieur de la plage d'analyse d'écart-type (figure 18B). Les moyennes spécifiques de la catégorie « organisme » sont à l'extérieur de la plage d'analyse pour sept des

15 critères. La moyenne spécifique des critères « effets sur les milieux naturels et les espèces d'intérêt », « accessibilité aux infrastructures et activités récréotouristiques », « préservation des paysages et esthétismes des mesures d'adaptation » est supérieure à la plage d'analyse. La moyenne spécifique des critères « effets sur les processus côtiers », « efficacité face à la submersion » et « efficacité face à l'érosion » est inférieure à la plage d'analyse. Finalement, la moyenne spécifique de l'échelle municipale pour le critère « coûts d'entretien et de suivi » est supérieure à la plage d'analyse.

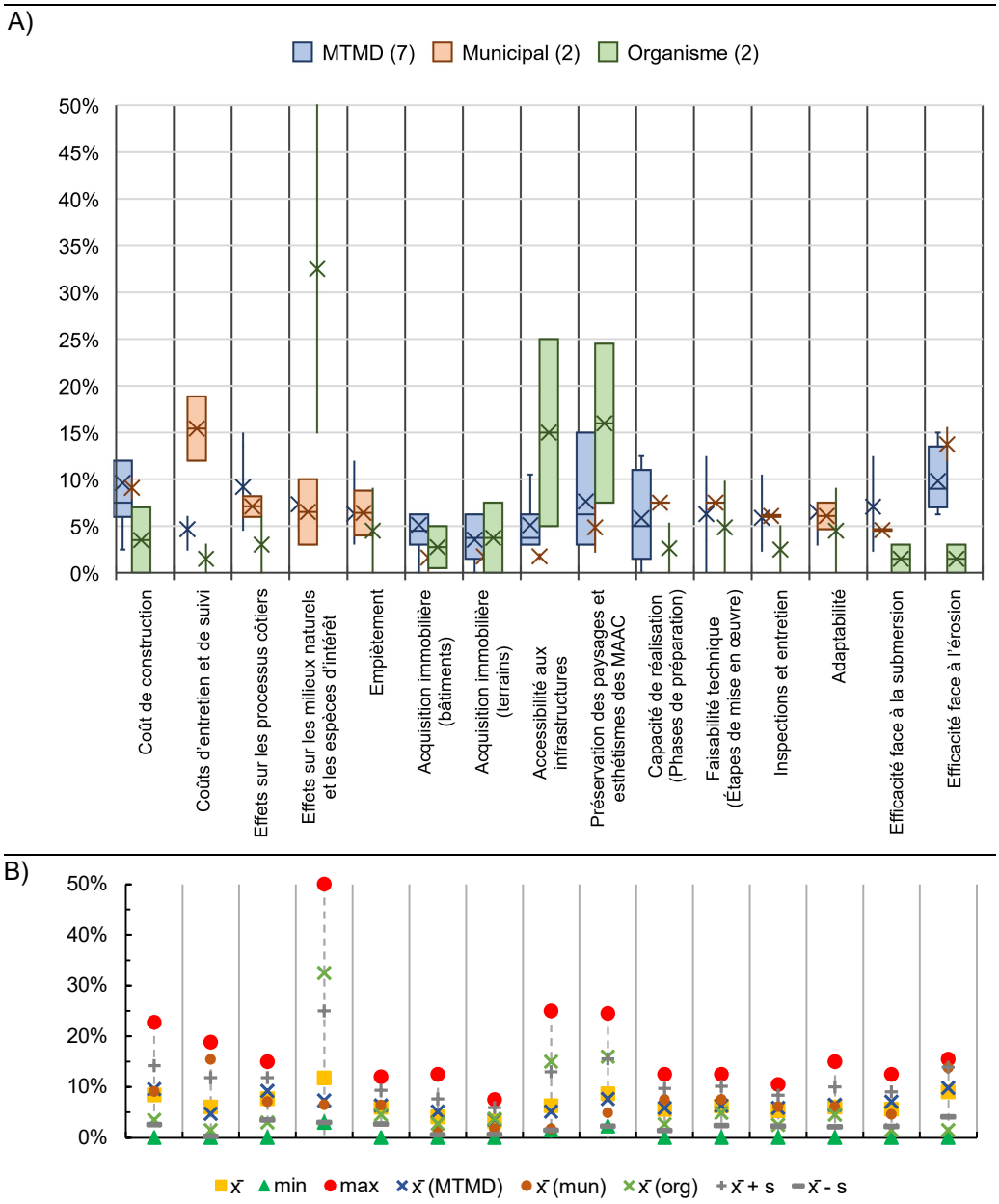

Figure 18. A) Distribution du poids attribué par les répondants aux critères (version 1) par les répondants pour chacun des types d'organisation au regard des caractéristiques du site de Saint-Ulric (D0202). Le nombre de répondants par organisme est inscrit entre parenthèses. B) Comparaison de la moyenne générale des répondants (carré jaune) et des moyennes spécifiques à chacun des types d'organisation (x bleu (MTMD), orange (municipalité et MRC) et vert (autre organisme)). Le cercle rouge et le triangle vert représentent le poids le plus élevé et le plus faible attribué au critère en considérant l'ensemble des répondants. Les signes plus et moins représentent respectivement l'addition et la soustraction de l'écart-type à la moyenne générale.

5.3.4.2 Étape 2 – Notation des MAAC au regard de chacun des critères de sélection

Les MAAC ont été notées au regard de chacun des critères de sélection (version 2) et des caractéristiques du SSEC du site de Saint-Ulric (tableau 35). Une échelle qualitative de 9 échelons (1 = très mauvais; 9 = très bon) a été utilisée pour la notation.

Tableau 35. Notation des MAAC au regard de chacun des critères de sélection pour le site de Saint-Ulric (D0202)

	Critères de sélection	Déplacement de route	Recharge de plage	Enrochement
	Contexte environnemental			
1	Effets sur les processus côtiers	9	7	3
2	Effets sur les milieux naturels et les espèces d'intérêts	7	5	3
3	Empiètement	8	6	3
	Qualité de vie et récréotourisme			
4	Accessibilité aux infrastructures et activités récréotouristiques	7	9	1
5	Préservation des paysages et esthétismes des mesures d'adaptation	5	7	1
	Expertise			
6	Expertise pour la phase de préparation	2	5	7
7	Expertise pour la phase de construction	3	7	5
8	Expertise pour les suivis et inspections	8	2	5
	Caractéristiques techniques des mesures d'adaptation			
9	Adaptabilité	8	5	3
10	Certitude de l'efficacité face aux aléas côtiers	9	5	7
	Coûts du projet			
11	Coût de construction	3	4	5
12	Coût d'entretien et de suivi	9	3	6

5.3.4.3 Étape 3 – Hiérarchisation des MAAC

La hiérarchisation des MAAC a été réalisée avec la méthode PROMETHEE en fonction de la pondération des critères de sélection (étape 1) et de la notation des MAAC au regard de chacun des critères de sélection (étape 2). La hiérarchisation des MAAC est présentée pour quatre profils d'acteur (figure 19). Ces scénarios varient selon la moyenne des poids attribuée aux critères par les différents groupes de répondants.

L'ordre de hiérarchisation des MAAC est le même dans les quatre scénarios : (1) déplacement de route, (2) recharge de plage et (3) enrochement. Pour les scénarios qui impliquent tous les répondants et les répondants du MTMD, le surpassement est pratiquement équivalent entre la position 1 et 2, puis la position 2 et 3. Pour le scénario impliquant les répondants à l'échelle municipale, le déplacement de route surpasse largement les deux autres scénarios. La recharge de plage surpasse légèrement l'enrochement. Pour le scénario impliquant les répondants de la catégorie « organisme », le déplacement de route surpasse légèrement la recharge de plage. L'enrochement est largement surpassé par les deux autres scénarios. Globalement, la distinction entre la hiérarchisation des différents profils d'acteur est la variation du flux net de la recharge de plage.

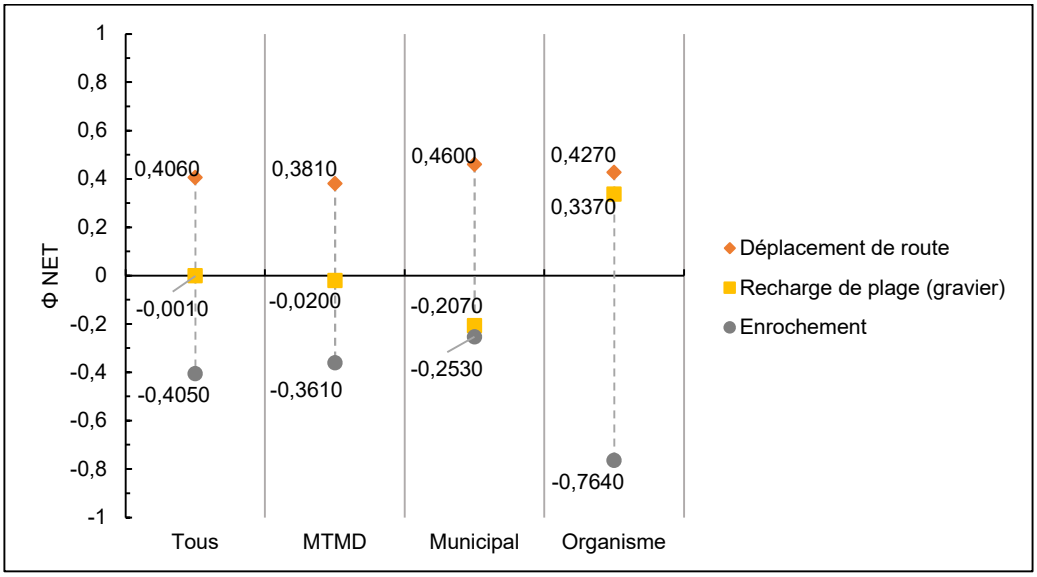

Figure 19. Quatre scénarios de hiérarchisation des MAAC pour le site de Saint-Ulric en fonction de la pondération moyenne des critères de sélection (étape 1) de différents groupes de répondants.

5.4 Îles-de-la-Madeleine – La Martinique (F0103)

Les résultats du secteur routier à l'étude de La Martinique (F0103) sont présentés dans les sous-sections suivantes.

5.4.1 Description du site d'étude

Le secteur routier est situé au nord-ouest de la baie de Plaisance. Il a une longueur d'environ 3,5 km (figure 20). Le secteur est situé dans la cellule hydrosédimentaire de la Baie de Plaisance. La dérive littorale principale est

dirigée vers le sud et la dérive littorale secondaire est dirigée vers le nord. Le secteur routier est situé sur un tombolo dunifié. En général, le bas estran est sableux et non végétalisé, alors que la zone infralittorale est meuble. Il y a présence de cordons sableux de bas estran et de barres d'avant-côte. La plage sableuse est utilisée comme lieu de loisir et la planche à voile est pratiquée au large. Le site présente également un intérêt écologique en raison de la présence d'espèces floristiques menacées et d'un secteur coquillier.

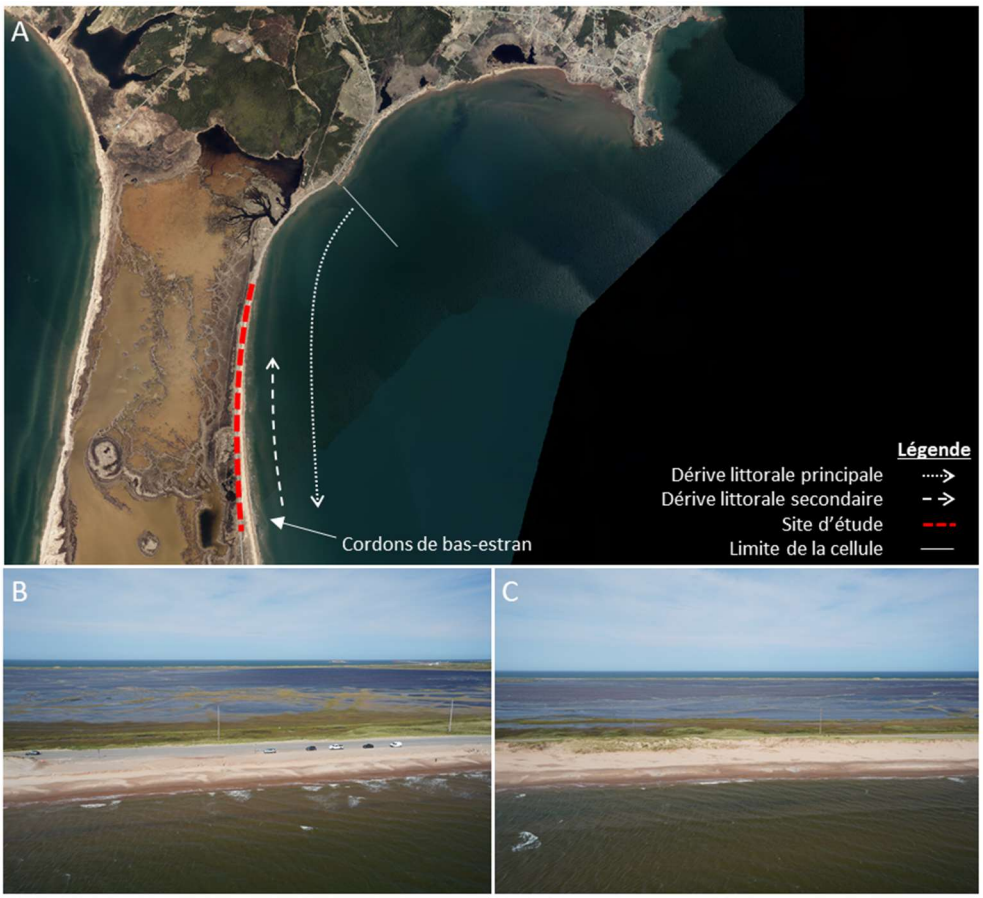

Figure 20. Site d'étude de La Martinique (Îles-de-la-Madeleine - F0103)). (A) Imagerie aérienne du site d'étude situé sur un tombolo dunifié. Représentation de la dérive littorale, du courant de marée et des cordons sableux de bas estran. (B) Vue du site non dunifié. (C) Vue du site dunifié.

5.4.2 Résultats de l'évaluation des effets géomorphologiques, écosystémiques et culturels des OPC (algorithme)

Les résultats des effets géomorphologiques, écosystémiques et culturels des OPC dans le contexte des quatre caractéristiques environnementales du site d'étude de La Martinique (dunaire, sable, microtidal et énergie des vagues

élevée) sont présentés respectivement au tableau 36, tableau 37 et tableau 38. Un total de 14 OPC a un nombre d'effets observés suffisant afin d'être évalué avec l'algorithme.

Pour les résultats géomorphologiques, deux OPC sur 17 ont un indice de correspondance (IC) très élevé (0,922), six ont un IC moyen (0,697), et neuf ont un IC très faible (0,375). Ce constat est dû au faible nombre de sites d'étude sur les effets des OPC dans un contexte dunaire, ce qui engendre un élargissement des caractéristiques environnementales initiales pour intégrer l'ensemble des sites d'étude réalisés dans un contexte de côte basse meuble. Alors que l'IC est généralement faible à moyen, le nombre d'effets observés (N) est généralement bon. Huit OPC sur 17 ont un N supérieur à 30, quatre ont un N entre 10 et 30 et cinq ont un N inférieur à 10.

Généralement, l'ensemble des techniques souples obtiennent des résultats positifs. Également, les résultats démontrent clairement les effets géomorphologiques négatifs des structures réflectives (enrochement et mur de protection) dans un contexte de côte meuble. Plus spécifiquement, la végétalisation terrestre et aquatique présente de bons résultats en termes de performance (% seuil et moy). Cependant, l'incertitude de la végétalisation aquatique est très élevée (IC de 0,375 et N de 1). Les trois types de recharge sédimentaire (méga-recharge, recharge de plage, recharge de dune et recharge d'avant-plage) présentent une bonne performance, tout en présentant une excellente correspondance pour la méga-recharge et la recharge d'avant-plage et moyenne pour la recharge de plage (N de 65) et la recharge de dune (N de 3). Les ganivelles et les capteurs de sable présentent une bonne performance. Cependant, les ganivelles ont un IC très faible et le capteur de sable un N de 2. L'épi perméable obtient une bonne performance dans un contexte toutefois incertain dû à un IC très faible, mais un N élevé. Les autres structures rigides obtiennent un indice de performance négatif et une correspondance généralement très faible, voire moyenne dans certains cas.

Pour les résultats d'ordre écosystémique et culturel (tableau 37 et tableau 38), la végétalisation terrestre et aquatique, la méga-recharge, les recharges d'avant-plage et de plage ainsi que l'épi perméable présentent des résultats positifs pour les deux indices de performance et un N élevé, voire très élevé (recharge d'avant-plage et de plage) à l'exception de la végétalisation aquatique (N de 1). L'ensemble des structures rigides, à l'exception de l'épi perméable, obtiennent des indices de performance négatifs quant à leurs effets écosystémiques.

Tableau 36. Résultats de l'effet géomorphologique dans le contexte du secteur d'étude de La Martinique (F0103 - dunaire, sable, microtidal et énergie des vagues élevée)

OPC	% seuil	Moy	IC	N	-5	-3	-1	0	1	3	5
Végétalisation terrestre	3	3,111	0,697	18	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	5,6%	**83,3%**	11,1%
Végétalisation aquatique	3	3,00	0,375	1	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	**100,0%**	0,0%
Méga-recharge	3	2,70	0,922	30	0,0%	6,7%	0,0%	10,0%	0,0%	**63,3%**	20,0%
Ganivelle	3	2,625	0,375	40	0,0%	5,0%	2,5%	2,5%	5,0%	**75,0%**	10,0%
Recharge de plage	3	1,969	0,697	65	0,0%	9,2%	1,5%	13,8%	13,8%	**47,7%**	13,8%
Recharge de dune	3	1,667	0,697	3	0,0%	33,3%	0,0%	0,0%	0,0%	**33,3%**	33,3%
Épi perméable	3	1,467	0,375	45	6,7%	13,3%	2,2%	11,1%	2,2%	**51,1%**	13,3%
Capteur de sable	1	2,00	0,697	2	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	**50,0%**	50,0%	0,0%
Recharge d'avant-plage	1	1,316	0,922	38	0,0%	21,1%	2,6%	5,3%	**15,8%**	47,4%	7,9%
Brise-lame émergé	-3	-0,222	0,697	18	5,6%	**50,0%**	0,0%	0,0%	0,0%	33,3%	11,1%
Brise-lame à crête basse	-3	-0,627	0,375	67	11,9%	**44,8%**	1,5%	1,5%	4,5%	25,4%	10,4%
Épi imperméable	-3	-0,739	0,697	23	4,3%	**47,8%**	8,7%	8,7%	0,0%	26,1%	4,3%
Brise-lame submergé	-3	-0,876	0,375	97	12,4%	**45,4%**	2,1%	2,1%	7,2%	24,7%	6,2%
Rip-rap	-3	-1,00	0,375	7	0,0%	**42,9%**	14,3%	28,6%	0,0%	14,3%	0,0%
Structure réflexive	-3	-2,00	0,375	3	0,0%	**66,7%**	0,0%	33,3%	0,0%	0,0%	0,0%
Mur de protection	-3	-2,584	0,375	89	16,9%	**59,6%**	7,9%	12,4%	0,0%	2,2%	1,1%
Enrochement	-3	-3,192	0,375	26	26,9%	**61,5%**	0,0%	11,5%	0,0%	0,0%	0,0%

Tableau 37. Résultats des effets sur les services écologiques d'ordre écosystémique dans le contexte du secteur d'étude de La Martinique (F0103 - dunaire, sable, microtidal et énergie des vagues élevée)

OPC	% seuil	Moy	N	-5	-3	-1	0	1	3	5
Végétalisation terrestre	3	3,125	40	0,0%	0,0%	0,0%	2,5%	2,5%	**82,5%**	12,5%
Végétalisation aquatique	3	3,000	1	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	**100,0%**	0,0%
Méga-recharge	3	2,700	30	0,0%	6,7%	0,0%	10,0%	0,0%	**63,3%**	20,0%
Ganivelle	3	2,625	40	0,0%	5,0%	2,5%	2,5%	5,0%	**75,0%**	10,0%
Épi perméable	3	1,220	50	6,0%	18,0%	4,0%	10,0%	2,0%	**46,0%**	14,0%
Capteur de sable	1	2,00	2	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	**50,0%**	50,0%	0,0%
Recharge d'avant-plage	1	1,536	110	1,8%	14,5%	0,9%	13,6%	**10,0%**	49,1%	10,0%
Recharge de plage	0	0,609	476	6,9%	17,4%	4,8%	**19,3%**	9,7%	33,0%	8,8%
Recharge de dune	0	0,500	12	8,3%	25,0%	0,0%	**16,7%**	0,0%	41,7%	8,3%
Brise-lame émergé	-3	-0,471	51	5,9%	**47,1%**	2,0%	5,9%	2,0%	31,4%	5,9%
Épi imperméable	-3	-0,482	83	4,8%	**44,6%**	6,0%	8,4%	2,4%	27,7%	6,0%
Brise-lame à crête basse	-3	-0,920	88	11,4%	**47,7%**	3,4%	3,4%	3,4%	22,7%	8,0%

Brise-lame submergé	-3	-0,925	106	11,3%	**46,2%**	2,8%	3,8%	6,6%	23,6%	5,7%
Rip-rap	-3	-1,000	7	0,0%	**42,9%**	14,3%	28,6%	0,0%	14,3%	0,0%
Structure réflexive	-3	-2,125	8	12,5%	**50,0%**	0,0%	37,5%	0,0%	0,0%	0,0%
Mur de protection	-3	-2,738	126	19,0%	**60,3%**	6,3%	11,9%	0,0%	1,6%	0,8%
Enrochement	-3	-3,364	66	34,8%	**54,5%**	3,0%	6,1%	0,0%	1,5%	0,0%

Tableau 38. Résultats des effets sur les services écologiques d'ordre culturel dans le contexte du secteur d'étude de La Martinique (F0103 - dunaire, sable, microtidal et énergie des vagues élevée)

OPC	% seuil	Moy	N	-5	-3	-1	0	1	3	5
Végétalisation terrestre	3	3,026	38	0,0%	0,0%	0,0%	2,6%	2,6%	**86,8%**	7,9%
Végétalisation aquatique	3	3,000	1	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	**100,0%**	0,0%
Méga-recharge	3	2,700	30	0,0%	6,7%	0,0%	10,0%	0,0%	**63,3%**	20,0%
Ganivelle	3	2,625	40	0,0%	5,0%	2,5%	2,5%	5,0%	**75,0%**	10,0%
Recharge de dune	3	2,000	7	0,0%	14,3%	0,0%	**14,3%**	0,0%	57,1%	14,3%
Recharge d'avant-plage	3	1,723	101	0,0%	12,9%	1,0%	14,9%	**10,9%**	50,5%	9,9%
Épi perméable	3	1,413	46	6,5%	13,0%	4,3%	10,9%	2,2%	**50,0%**	13,0%
Capteur de sable	1	2,000	2	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	**50,0%**	50,0%	0,0%
Recharge de plage	1	1,490	353	2,3%	9,9%	3,4%	**19,5%**	11,9%	41,6%	11,3%
Brise-lame émergé	-3	-0,196	46	6,5%	**41,3%**	2,2%	6,5%	2,2%	34,8%	6,5%
Épi imperméable	-3	-0,481	79	5,1%	**44,3%**	5,1%	8,9%	2,5%	29,1%	5,1%
Brise-lame à crête basse	-3	-0,718	71	11,3%	**46,5%**	1,4%	2,8%	4,2%	23,9%	9,9%
Brise-lame submergé	-3	-0,889	99	12,1%	**45,5%**	2,0%	3,0%	7,1%	24,2%	6,1%
Rip-rap	-3	-1,000	7	0,0%	**42,9%**	14,3%	28,6%	0,0%	14,3%	0,0%
Structure réflexive	-3	-1,500	4	0,0%	**50,0%**	0,0%	50,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Mur de protection	-3	-2,570	93	16,1%	**60,2%**	7,5%	12,9%	0,0%	2,2%	1,1%
Enrochement	-3	-3,179	28	25,0%	**64,3%**	0,0%	10,7%	0,0%	0,0%	0,0%

5.4.3 Mesures d'adaptation retenue pour le site

Quatre scénarios de MAAC ont été retenus pour l'évaluation avec la méthode d'analyse multicritère : recharge de plage, recharge de plage avec reconstruction dunaire et noyau rigide, brise-lame émergé et enrochement.

Le premier scénario est composé d'une recharge de plage. Ce scénario a été sélectionné en raison du type de côte du site : une côte dunaire. Une recharge de plage convient généralement à l'évolution dynamique de ce type de côte. Le second scénario est composé d'une recharge de plage avec reconstruction dunaire et noyau rigide. L'objectif de la reconstruction dunaire est de rétablir la dynamique dunaire naturelle et d'assurer la protection de l'infrastructure routière lors d'une tempête par l'aménagement d'un noyau rigide. Ainsi, la structure

rigide et réflective est seulement exposée aux éléments hydrodynamiques en cas de défaillance de la recharge de plage dans des conditions météorologiques extrêmes. Le brise-lame émergé a été retenu afin d'intégrer dans l'évaluation une structure rigide aménagée au large de manière à réduire l'effet des vagues sur la côte. L'enrochement a été retenu, par défaut, pour l'ensemble des sites, car cet OPC sert de point de référence pour le MTMD.

Au regard des résultats de l'algorithme, la végétalisation terrestre et aquatique ainsi que les ganivelles n'ont pas été retenues comme OPC principal en raison de la faible certitude d'efficacité face aux aléas côtiers. Les épis perméables n'ont également pas été retenus en raison du besoin de protection immédiat des infrastructures routières. Ces quatre OPC pourraient toutefois être ajoutés comme OPC complémentaire dans la définition des scénarios à l'étape de l'avant-projet préliminaire.

Tableau 39. MAAC retenus pour l'évaluation avec la méthode d'analyse multicritère au site de La Martinique

Mesures d'adaptation aux aléas côtiers	Description
Recharge de plage	Aménagement d'une recharge de plage avec des sédiments d'emprunt dont la taille granulométrique est comparable aux sédiments présents naturellement.
Recharge de plage avec reconstruction dunaire avec noyau rigide	Aménagement d'une recharge de plage avec des sédiments d'emprunt dont la taille granulométrique est comparable aux sédiments présents naturellement en combinaison avec une reconstruction dunaire impliquant un noyau rigide en géotextile ou en enrochement.
Brise-lame émergé	Aménagement d'un brise-lame émergé au large du site
Enrochement	Aménagement d'un enrochement en haut de plage.

5.4.4 Résultats de l'analyse multicritère

5.4.4.1 Étape 1 – Pondération des critères de sélection

Les critères de sélection de MAAC ont été pondérés par les répondants (tableau 20) du questionnaire au regard des caractéristiques du site de La Martinique. Les critères pondérés correspondent à la version 1 de la liste de critère. Le poids attribué à chacun des critères varie selon l'organisation (MTMD, municipal, organisme). La distribution des poids entre les critères pour chacune des organisations est présentée à la figure 21A. La comparaison des moyennes générales et spécifiques à chaque organisation est présentée à la figure 21B. Pour chacun des critères, l'écart-type a été calculé en fonction du poids attribué par l'ensemble des participants. Il a été additionné et soustrait à la moyenne générale afin d'établir une plage d'analyse des moyennes spécifiques à chaque type d'organisation. Sur la figure 21

figure 21B, les signes plus et moins représentent respectivement l'addition et la soustraction de l'écart-type à la moyenne générale.

Le poids moyen des critères « effets sur les processus côtiers », « efficacité face à la submersion » « coûts de construction », « effets sur les milieux naturels et les espèces d'intérêt » et « coûts d'entretien et de suivi » sont les plus élevés (respectivement 9,6 %, 9,1 %, 9,0 %, 9,0 % et 8,7 %) (figure 21B). Le poids moyen des critères « Acquisition immobilière (bâtiments) » et « Acquisition immobilière (terrains) » sont les plus faibles (respectivement 2,8 % et 1,6 %) (figure 21B). La distribution des poids du critère « coûts de construction » varie entre 0,0 % et 24,0 %, ce qui en fait le critère avec la plus grande variabilité (figure 21A). Deux moyennes spécifiques à de la catégorie « organisme » sont supérieures à la plage d'analyse : « effets sur les processus côtiers » et « effets sur les milieux naturels et les espèces d'intérêt ».

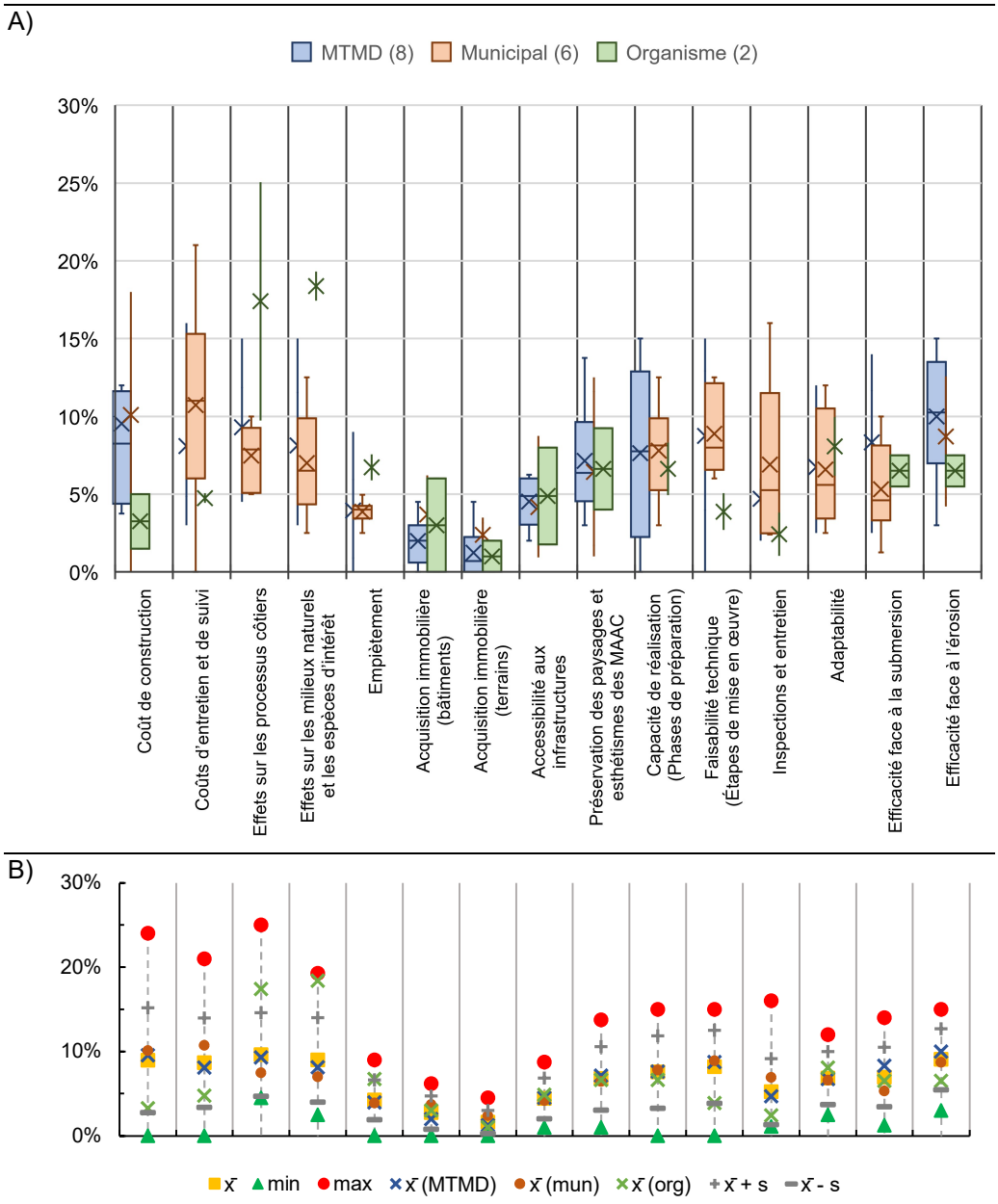

Figure 21. A) Distribution du poids attribué aux critères (version 1) par les répondants pour chacun des types d'organisation au regard des caractéristiques du site de La Martinique (Îles-de-la-Madeleine – F0103). Le nombre de répondants par organisme est inscrit entre parenthèses. B) Comparaison de la moyenne générale des répondants (carré jaune) et des moyennes spécifiques à chacun des types d'organisation (x bleu (MTMD), orange (municipalité et MRC) et vert (autre organisme)). Le cercle rouge et le triangle vert représentent le poids le plus élevé et le plus faible attribué au critère en considérant l'ensemble des répondants. Les

signes plus et moins représentent respectivement l'addition et la soustraction de l'écart-type à la moyenne générale.

5.4.4.2 Étape 2 – Notation des MAAC au regard de chacun des critères de sélection

Les MAAC ont été notées au regard de chacun des critères de sélection (version 2) et des caractéristiques du SSEC du site de La Martinique (tableau 30). Une échelle qualitative de 5 échelons (1 = très mauvais; 5 = très bon) a été utilisée pour la notation à l'exception du critère « Certitude de l'efficacité face aux aléas côtiers » où une échelle qualitative de 9 échelons a été utilisée (1 = très mauvais; 9 = très bon). Une échelle de 5 échelons était initialement prévue pour l'ensemble des critères et sur l'ensemble des sites.

Tableau 40. Notation des MAAC au regard de chacun des critères de sélection pour le site de La Martinique (Îles-de-la-Madeleine - F0103)

	Critère de sélection	Recharge de plage	Recharge de plage avec reconstruction dunaire avec noyau rigide	Brise-lame émergé	Enrochement
	Contexte environnemental				
1	Effets sur les processus côtiers	5	4	3	1
2	Effets sur les milieux naturels et les espèces d'intérêts	3	4	5	1
3	Empiètement	5	4	1	2
	Qualité de vie et récréotourisme				
6	Accessibilité aux infrastructures et activités récréotouristiques	5	5	3	1
7	Préservation des paysages et esthétismes des mesures d'adaptation	5	5	3	1
	Expertise				
8	Expertise pour la phase de préparation	2	2	1	5
9	Expertise pour la phase de construction	4	3	1	5
10	Expertise pour les suivis et inspections	1	2	3	5
	Caractéristiques techniques des mesures d'adaptation				
11	Adaptabilité	5	4	1	2
12	Certitude de l'efficacité face aux aléas côtiers	6	8	5	6
	Coûts du projet				
14	Coût de construction	3	2	2	2
15	Coût d'entretien et de suivi	1	2	3	5

5.4.4.3 Étape 3 – Hiérarchisation des MAAC

La hiérarchisation des MAAC a été réalisée avec la méthode PROMETHEE en fonction de la pondération des critères de sélection (étape 1) et de la notation des MAAC au regard de chacun des critères de sélection (étape 2). La hiérarchisation des MAAC est présentée pour quatre profils d'acteur (figure 22). Ces scénarios varient selon la moyenne des poids attribuée aux critères par les différents groupes de répondants.

L'ordre de hiérarchisation des MAAC est le même dans les quatre scénarios : (1) recharge de plage avec reconstruction dunaire et noyau rigide, (2) recharge de plage, (3) enrochement et (4) brise-lame émergé. Dans les quatre scénarios, la position 1 surpasse très légèrement la position 2. Dans les scénarios impliquant tous les répondants, les répondants du MTMD et les répondants à l'échelle municipale, le surpassement est pratiquement équivalent entre la position 2 et 3, puis la position 3 et 4. Finalement, dans le scénario impliquant les répondants de la catégorie « organisme », la position 3 surpasse légèrement la position 4.

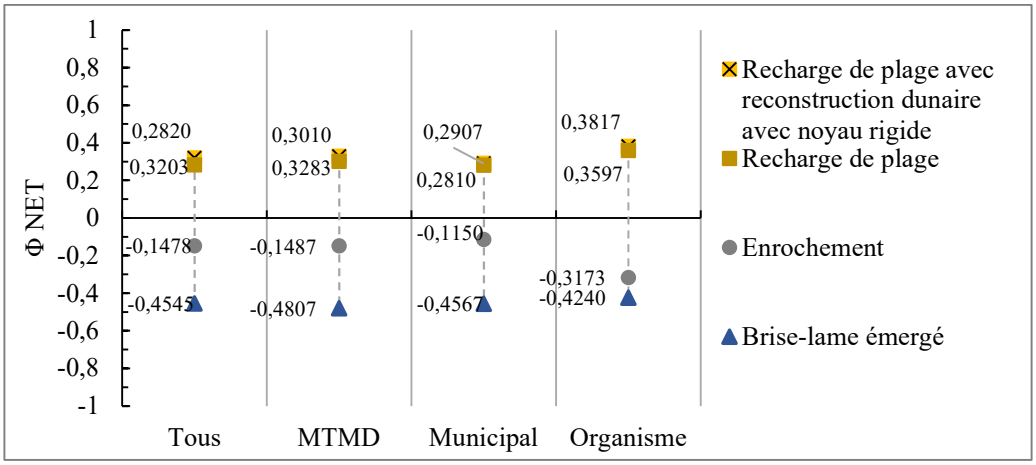

Figure 22. Quatre scénarios de hiérarchisation des MAAC pour le site de La Martinique (Îles-de-la-Madeleine - F0103) en fonction de la pondération moyenne des critères de sélection (étape 1) de différents groupes de répondants.

5.5 Rivière-du-Loup (G0201)

Les résultats du secteur routier à l'étude de Rivière-du-Loup (G0201) sont présentés dans les sous-sections suivantes.

5.5.1 Description du site d'étude

Le secteur routier longe l'estuaire moyen du Saint-Laurent sur une longueur d'environ 2,9 km au sud de l'estuaire de la rivière du Loup (figure 23). Ce secteur

est situé en bordure d'un marais maritime à substrat silteux (0,004 – 0,063 mm). On y retrouve un brise-lame aménagé en 2010 d'une longueur d'environ 350 m avec au centre un épi rocheux et un rip-rap de petits calibres en bordure du schorre supérieur. L'étagement de l'écosystème est composé d'un marais de plantes vasculaires mixtes dans la partie supérieure et de spartine alterniflore dans la partie inférieure, puis, d'une large batture vaseuse (slikke) et d'un infralittoral à macroalgues. Le segment routier est situé dans la cellule hydrosédimentaire de Saint-Patrice. La dérive littorale principale est dirigée vers le sud-ouest. Un courant estuarien est présent à l'exutoire de la rivière du Loup. Le marnage est macrotidal et l'énergie des vagues est faible.

Le site présente un intérêt écologique avec une aire de concentration d'oiseaux aquatiques, un secteur coquillier. L'anguille y est pêchée commercialement. Le côté terrestre du secteur routier est occupé par des parcelles agricoles cultivables ainsi que des infrastructures de purifications des eaux usées (étangs aérés, rejet d'égouts, régulateurs, etc.). Le quai et la marina de Rivière-du-Loup sont présents sur la rive nord de la rivière du Loup. Plusieurs activités sont situées à proximité : pêche récréative, observation de la faune et de la flore, aire de pique-nique, planche à voile, plage, facilités pour petites embarcations, restauration, etc.

Figure 23. Site d'étude de Rivière-du-Loup (G0201). (A) Imagerie aérienne du site d'étude situé en bordure d'un marais maritime. Représentation du courant estuarien. (B) Vue du site vers l'ouest. (C) Vue du site vers l'est avec le brise-lame.

5.5.2 Résultats de l'évaluation des effets géomorphologiques, écosystémiques et culturels des OPC (algorithme)

Les résultats des effets géomorphologiques, écosystémiques et culturels des OPC dans le contexte des quatre caractéristiques environnementales du site d'étude de Rivière-du-Loup (marais maritime, vase, microtidal et énergie des vagues faible) sont présentés respectivement au tableau 41, tableau 42 et tableau 43. Un total de 5 OPC a un nombre d'effets observés suffisant afin d'être évalué avec l'algorithme.

Pour les résultats géomorphologiques, le brise-lame émergé, la végétalisation aquatique et terrestre et le mur de protection présentent un indice de correspondance (IC) moyen (0,560). L'enrochement présente un IC élevé (0,922). Alors que l'IC est généralement moyen, le nombre d'effets observés (N) est très faible pour l'ensemble des OPC (inférieur à 5). Le faible nombre d'OPC

évalués et les résultats faibles dans les indices de précision est dû au faible nombre de sites d'étude sur les effets des OPC dans un contexte de marais maritime. Également, les marais maritimes présentent une évolution qui se distingue par rapport aux autres types de côte. Ainsi, aucun élargissement des caractéristiques environnementales initiales associé au type de côte n'a été intégré à l'algorithme dans un contexte de marais maritime.

Tableau 41. Résultats de l'effet géomorphologique dans le contexte du secteur d'étude de Rivière-du-Loup (G0201)

OPC	% seuil	Moy	IC	N	-5	-3	-1	0	1	3	5
Brise-lame émergé	5	5,000	0,560	1	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	**100,0%**
Végétalisation aquatique	3	2,000	0,560	3	0,0%	0,0%	0,0%	33,3%	0,0%	**66,7%**	0,0%
Végétalisation terrestre	1	1,000	0,560	1	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	**100,0%**	0,0%	0,0%
Mur de protection	-3	-2,250	0,560	4	0,0%	**75,0%**	0,0%	25,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Enrochement	-3	-3,000	0,922	1	0,0%	**100,0%**	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Pour les résultats d'ordre écosystémique et culturel (tableau 42 et tableau 43), la végétalisation terrestre présente un résultat positif pour les deux indices de performance. Ce résultat est toutefois basé sur un effet observé (N de 1). Le brise-lame émergé et la végétalisation aquatique présentent une atteinte du pourcentage seuil neutre et une moyenne positive. Le résultat du brise-lame est basé sur quatre effets observés (N = 4) et le résultat de la végétalisation aquatique sur un N élevé (21). Le mur de protection et l'enrochement présentent des résultats négatifs, voire très négatifs sur les indices de performance, avec un niveau de précision de ces résultats moyen à élevé.

Tableau 42. Résultats des effets sur les services écologiques d'ordre écosystémique dans le contexte du secteur d'étude de Rivière-du-Loup (G0201)

OPC	% seuil	Moy	N	-5	-3	-1	0	1	3	5
Végétalisation terrestre	1	1	1	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	**100,0%**	0,0%	0,0%
Brise-lame émergé	0	1,75	4	0,0%	25,0%	0,0%	**25,0%**	0,0%	0,0%	50,0%
Végétalisation aquatique	0	0,238	21	9,5%	19,0%	9,5%	**9,5%**	9,5%	42,9%	0,0%
Mur de protection	-3	-2,613	31	22,6%	**54,8%**	3,2%	12,9%	0,0%	6,5%	0,0%
Enrochement	-5	-3,588	17	**47,1%**	47,1%	0,0%	0,0%	0,0%	5,9%	0,0%

Tableau 43. Résultats des effets sur les services écologiques d'ordre culturel dans le contexte du secteur d'étude de Rivière-du-Loup (G0201)

OPC	% seuil	Moy	N	-5	-3	-1	0	1	3	5

Végétalisation terrestre	1	1	1	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	**100,0%**	0,0%	0,0%
Brise-lame émergé	0	1,75	4	0,0%	25,0%	0,0%	**25,0%**	0,0%	0,0%	50,0%
Végétalisation aquatique	0	0,238	21	9,5%	19,0%	9,5%	**9,5%**	9,5%	42,9%	0,0%
Mur de protection	-3	-2,613	31	22,6%	**54,8%**	3,2%	12,9%	0,0%	6,5%	0,0%
Enrochement	-5	-3,588	17	**47,1%**	47,1%	0,0%	0,0%	0,0%	5,9%	0,0%

5.5.3 Mesures d'adaptation retenue pour le site

Quatre scénarios de MAAC ont été retenus pour l'évaluation avec la méthode d'analyse multicritère : Brise-lame, restauration du marais, enrochement, brise-lame avec restauration du marais (tableau 44).

Dans le contexte du site de Rivière-du-Loup, peu d'information est tirée de l'algorithme en raison du très faible nombre d'effets observés dans le contexte de marais maritime. Ainsi, le premier scénario est l'aménagement d'un brise-lame. Ce scénario a été retenu en raison de la présence d'un tel brise-lame sur le site et d'un projet de recherche actuellement réalisé sur cette structure. Le second scénario est une restauration et la végétalisation du marais par l'utilisation des sédiments de dragage de la marina et du port de Rivière-du-Loup. Le troisième scénario est l'enrochement enfoui sous le marais maritime le long de l'emprise de l'autoroute 20. Ce scénario vise à laisser le marais évoluer naturellement et à assurer la protection de l'infrastructure routière si le marais est entièrement érodé durant un épisode de tempête. Le quatrième scénario est la combinaison d'un brise-lame et de la restauration et la végétalisation du marais derrière le brise-lame.

Tableau 44. MAAC retenus pour l'évaluation avec la méthode d'analyse multicritère au site de Rivière-du-Loup (G0201)

Mesures d'adaptation aux aléas côtiers	Description
Brise-lame	Aménagement de brise-lames dont le dimensionnement est similaire au brise-lame actuellement présent
Restauration de marais	Valorisation des sédiments de dragage de la marina et du port de Rivière-du-Loup afin de recharger le schorre inférieur du marais. Cet ouvrage inclut également la végétalisation de la recharge.
Enrochement	Aménagement d'un enrochement enfoui sous le marais le long de l'emprise actuelle de l'autoroute 20.
Brise-lame et restauration de marais	Aménagement de brise-lames dont le dimensionnement est similaire au brise-lame actuellement présent et valorisation des sédiments de dragage de la marina et du port de Rivière-du-Loup afin de recharger le schorre inférieur du marais derrière le brise-lame. Cet ouvrage inclut également la végétalisation de la recharge.

5.5.4 Résultats de l'analyse multicritère

5.5.4.1 Étape 1 – Pondération des critères de sélection

Les critères de sélection de MAAC ont été pondérés par les répondants (tableau 20) du questionnaire au regard des caractéristiques du site de Rivière-du-Loup. Les critères pondérés correspondent à la version 1 de la liste de critère. Le poids attribué à chacun des critères varie selon l'organisation (MTMD, municipal, organisme). La distribution des poids entre les critères pour chacune des organisations est présentée à la figure 24A. La comparaison des moyennes générales et spécifiques à chaque organisation est présentée à la figure 24B. Pour chacun des critères, l'écart-type a été calculé en fonction du poids attribué par l'ensemble des participants. Il a été additionné et soustrait à la moyenne générale afin d'établir une plage d'analyse des moyennes spécifiques à chaque type d'organisation. Sur la figure 24B, les signes plus et moins représentent respectivement l'addition et la soustraction de l'écart-type à la moyenne générale.

Les poids moyens des critères « coûts de construction » et « efficacité face à la submersion » sont les plus élevés (respectivement 12,1 % et 10,8 %) (figure 24B). La distribution des poids du critère « coûts de construction » varie entre 1,3 % et 42,5 %, ce qui en fait le critère avec la plus grande variabilité (figure 24A). À noter que le poids de 50,0 % a été attribué par un répondant du MTMD. Également, pour ce critère, la moyenne spécifique de la catégorie « organisme » est largement supérieure à la plage d'analyse des écarts-types. Les poids moyens des critères « accessibilité aux infrastructures et activités récréotouristiques » et « acquisition immobilière (terrains) » sont les plus faibles (respectivement 3,6 % et 2,4 %) (figure 24B). Deux moyennes spécifiques sont à l'extérieur de la plage d'analyse cadrée par l'écart-type, soit celles de la catégorie « organisme » pour les critères « effets sur les milieux naturels et les espèces d'intérêt » et « empiètement » qui sont légèrement supérieures (figure 24B).

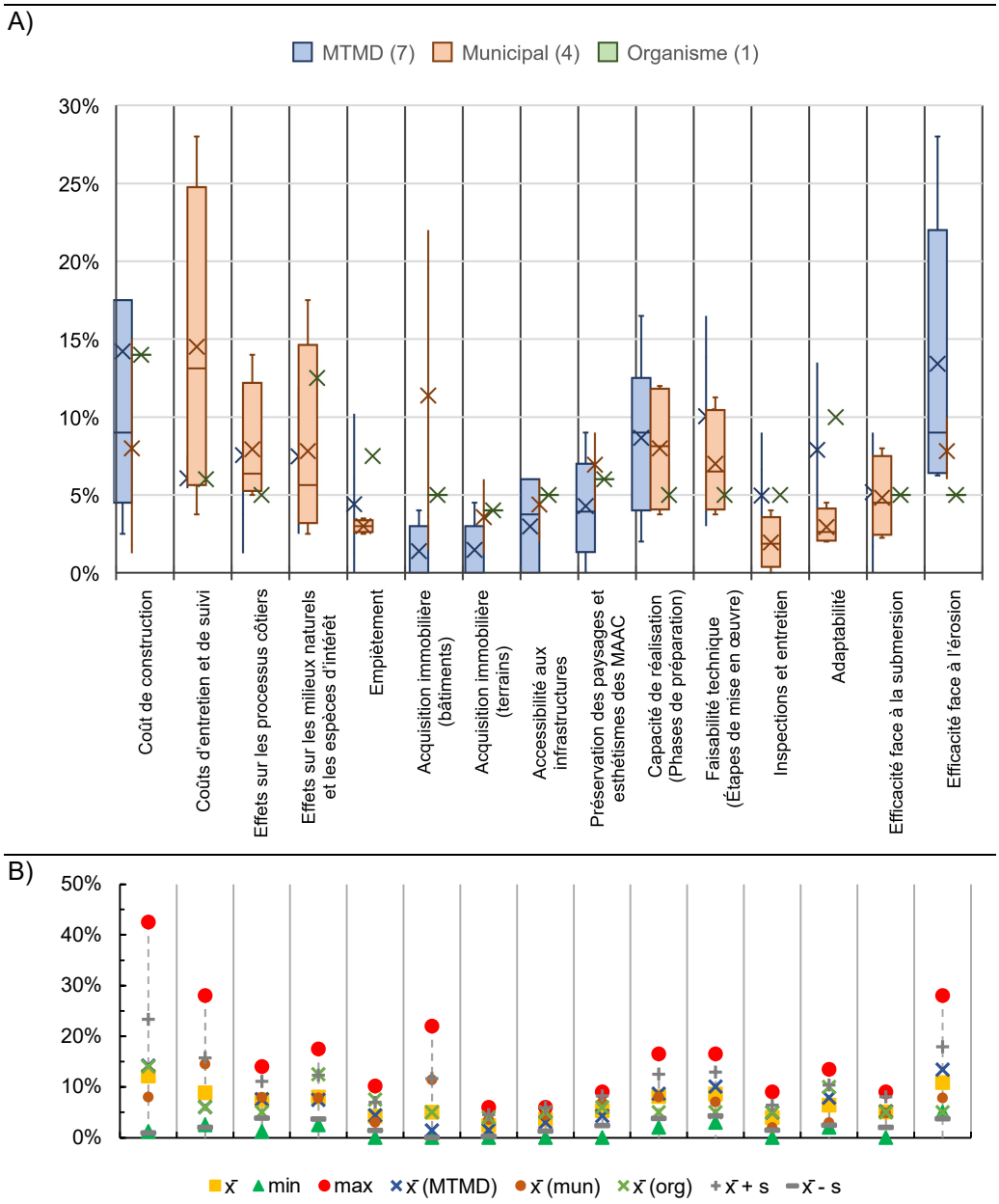

Figure 24. A) Distribution du poids attribué par les répondants aux critères (version 1) par les répondants pour chacun des types d'organisation au regard des caractéristiques du site de Rivière-du-Loup (G0201). Le nombre de répondants par organisme est inscrit entre parenthèses. B) Comparaison de la moyenne générale des répondants (carré jaune) et des moyennes spécifiques à chacun des types d'organisation (x bleu (MTMD), orange (municipalité et MRC) et vert (autre organisme)). Le cercle rouge et le triangle vert représentent le poids le plus élevé et le plus faible attribué au critère en considérant l'ensemble des répondants. Les signes plus et moins représentent respectivement l'addition et la soustraction de l'écart-type à la moyenne générale.

5.5.4.2 Étape 2 – Notation des MAAC au regard de chacun des critères de sélection

Les MAAC ont été notées au regard de chacun des critères de sélection (version 2) et des caractéristiques du SSEC du site de Rivière-du-Loup (tableau 45). Une échelle qualitative de 9 échelons (1 = très mauvais; 9 = très bon) a été utilisée pour la notation.

Tableau 45. Notation des MAAC au regard de chacun des critères de sélection pour le site de Rivière-du-Loup (G0201)

	Critères de sélection	Brise-lame	Restauration du marais et végétalisation	Enrochement (enfoui à l'intérieur de l'emprise)	Brise-lame avec restauration de marais et végétalisation
	Contexte environnemental				
1	Effets sur les processus côtiers	6	9	3	7
2	Effets sur les milieux naturels et les espèces d'intérêts	6	4	3	8
3	Empiètement	4	9	8	6
	Qualité de vie et récréotourisme				
4	Accessibilité aux infrastructures et activités récréotouristiques	-	-	-	-
5	Préservation des paysages et esthétismes des mesures d'adaptation	5	9	8	7
	Expertise				
6	Expertise pour la phase de préparation	5	1	9	2
7	Expertise pour la phase de construction	7	3	9	2
8	Expertise pour les suivis et inspections	5	4	8	5
	Caractéristiques techniques des mesures d'adaptation				
9	Adaptabilité	4	8	6	5
10	Certitude de l'efficacité face aux aléas côtiers	8	4	6	8
	Coûts du projet				
11	Coût de construction	8	6	9	5
12	Coût d'entretien et de suivi	6	1	9	5

5.5.4.3 Étape 3 – Hiérarchisation des MAAC

La hiérarchisation des MAAC a été réalisée avec la méthode PROMETHEE en fonction de la pondération des critères de sélection (étape 1) et de la notation des MAAC au regard de chacun des critères de sélection (étape 2). La hiérarchisation des MAAC est présentée pour quatre profils d'acteur (figure 25).

Ces scénarios varient selon la moyenne des poids attribuée aux critères par les différents groupes de répondants.

L'ordre de hiérarchisation des MAAC est le même dans les quatre scénarios : (1) enrochement, (2) brise-lame, (3) brise-lame avec restauration du marais et (4) restauration et végétalisation du marais. Dans les quatre scénarios, la position 1 surpasse largement la position 2 et la position 2 surpasse largement la position 3. Dans les scénarios qui impliquent tous les répondants et les répondants à l'échelle municipale, les positions 3 et 4 sont pratiquement à égalité.

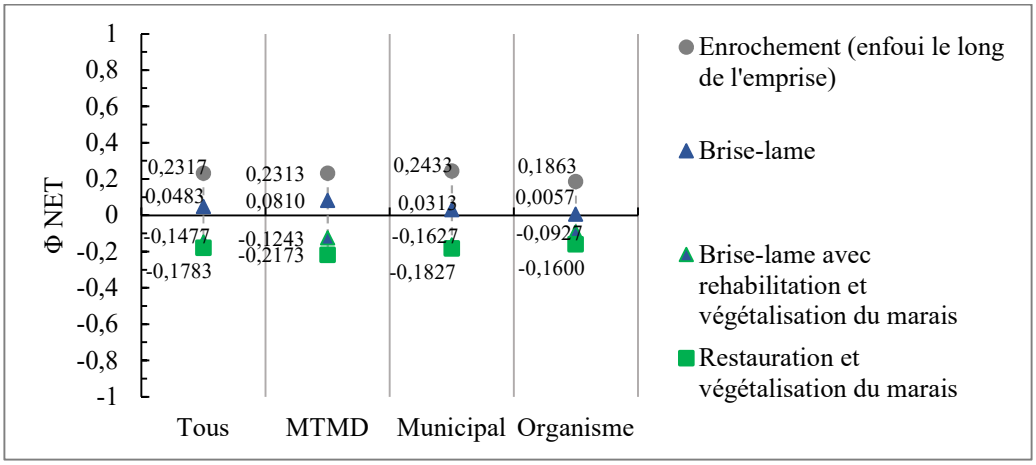

Figure 25. Quatre scénarios de hiérarchisation des MAAC pour le site de Rivière-du-Loup (G0201) en fonction de la pondération moyenne des critères de sélection (étape 1) de différents groupes de répondants.

6 DISCUSSION

La dynamique des SSEC est complexe et leur évolution est incertaine en raison des effets des changements climatiques. Dans ce contexte, une intervention en milieu côtier visant à résoudre une problématique d'aléas côtiers doit être encadrée par un processus d'évaluation comptant plusieurs phases afin d'analyser une variété de scénarios (USACE, 2006a) de manière à permettre aux décideurs d'en tenir compte lors de la planification et de l'évaluation des MAAC (Baquerizo et Losada, 2008 ; Polasky *et al.*, 2011).

L'approche d'aide à la décision proposée a été élaborée sur une structuration cohérente de l'information qui permet de considérer les données, tant géomorphologiques et hydrodynamiques, qu'écologiques et socio-économiques, nécessaire à l'identification des meilleures solutions en termes de MAAC. Ainsi, elle contribue à baser la sélection des MAAC sur une analyse holistique du SSEC et à obtenir un portrait global de l'effet potentiel des MAAC sur ses composantes. Premièrement, l'évaluation effectuée avec l'algorithme d'évaluation est réalisée à une échelle spatiale fine, soit un segment géomorphologique, en fonction d'un ensemble de quatre variables environnementales qui correspondent aux caractéristiques géomorphologiques et hydrodynamiques. L'interprétation des résultats détaillés permet d'analyser les effets géomorphologiques, écosystémiques et culturels des OPC à l'échelle de la cellule hydrosédimentaire. Deuxièmement, l'évaluation effectuée avec l'analyse multicritère et le processus participatif permet de tenir compte de la dynamique multiacteurs, ce qui complète l'analyse holistique du SSEC. Ultimement, l'approche forme un outil d'aide à la prise de décision qui permet de classer, structurer et hiérarchiser l'information afin qu'elle soit présentée de manière à éclairer la sélection et la conception des MAAC, par les ingénieurs, les professionnels et les décideurs.

6.1 Algorithme d'évaluation des effets géomorphologiques, écosystémiques et culturels des OPC

La hiérarchisation de l'information permet de détailler les résultats selon plusieurs paliers d'agrégation. Les données brutes, soit les caractéristiques du secteur d'étude et les effets observés des OPC, ont été traitées de manière à fournir de l'information pertinente pour le processus décisionnel. L'idée est d'éviter de perdre de la sensibilité ou de déformer les données brutes par la présentation d'un résultat global basé sur une homogénéisation totale des effets observés des OPC.

La finalité d'une intervention avec un OPC est certainement anthropocentrique en raison d'un besoin de protection ou d'adaptation d'un milieu de vie humain.

Dans ce contexte, l'évaluation des énoncés est réalisée avec une vision anthropocentrique. Toutefois, même avec une telle finalité, la méthode d'évaluation a été développée dans une optique de gestion à long terme du territoire côtier par l'intégration de l'ensemble des effets potentiels des OPC sur le SSEC.

6.1.1 Incertitude associée à l'algorithme d'évaluation des effets des OPC

Chaque OPC a un nombre total d'effets observés. Le paramètre nombre minimal d'effets observés [nb.EO.min] permet d'établir un seuil afin de baser l'analyse sur un nombre représentatif d'effets observés supérieur ou égal à ce paramètre. En considérant seulement l'indicateur du nombre d'effets observés [nb.EO], une augmentation de cet indicateur est associée à une baisse de l'incertitude des résultats. Ainsi, cette source d'incertitude est exogène à l'algorithme, car elle dépend du nombre d'effets observés total présents dans la littérature scientifique. Toutefois, [nb.EO] est associé au paramètre [nb.EO.min], soit une équation mathématique impliquant [nb.EO]. Ce paramètre est une source d'incertitude endogène à l'algorithme, car la variation de cette équation mathématique peut avoir un effet sur les résultats finaux. Une analyse de sensibilité a donc été réalisée sur ce paramètre.

Un effet observé est associé à des caractéristiques d'un environnement côtier (TC, TS, TM et TV). Ainsi, l'indice de correspondance [IC] a été intégré dans l'algorithme afin d'élargir les critères initiaux en fonction des degrés d'élargissement des caractéristiques environnementales initiales [e] lorsque [nb.EO.min] n'est pas atteint. Une diminution de cet indicateur représente une augmentation de l'incertitude des résultats. Cette source d'incertitude est également exogène à l'algorithme, car elle dépend du nombre d'effets observés par ensemble de caractéristiques environnementales.

L'analyse de [IC] et de [nb.EO] ne peut être réalisé individuellement, car il y a une relation de dépendance entre les deux indicateurs : une diminution de l'[IC] est associée à une augmentation de [nb.EO] dans l'analyse. Cette relation amène donc, instantanément, une diminution (due à l'augmentation de nb.EO) et une augmentation (due à la diminution de l'IC) de l'incertitude exogène. Or, ces deux indicateurs sont associés à un paramètre commun : le degré d'élargissement des caractéristiques environnementales initiales [e]. L'ordre des degrés d'élargissement des caractéristiques environnementales initiales [e] est une source d'incertitude endogène à l'algorithme.

6.1.2 Degré d'élargissement

Le degré d'élargissement des caractéristiques environnementales initiales [e] engendre un phénomène d'uniformisation des requêtes par rapport aux critères initiaux (OPC, TC, TS, TM, TV), tel qu'illustré à la figure 26 dans le contexte des

critères initiaux suivants : (A) brise-lames émergé, terrasse de plage, sable, mesotidal, vagues modérées; (B) brise-lames submergé, flèches littorales, galet, microtidal, vagues élevées. L'analyse de [e] à l'échelle de l'évaluation d'un regroupement permet de constater que ce paramètre engendre une augmentation de l'incertitude comme démontré dans la section ci-haut. L'analyse de [e] à l'échelle de plusieurs regroupements permet de constater que l'augmentation de [e] engendre une uniformisation de l'évaluation d'un OPC. Ainsi, l'évaluation de deux OPC du même type dans la même sous-catégorie de côte aura une évaluation identique pour [e = 12]. De même, le seul point distinctif pour [e = 11] est le type d'OPC.

Également, un OPC peut présenter un indice de correspondance [IC] relativement élevé, tout en ayant un nombre d'effets observés très faible. Cette situation est expliquée par la méthode de calcul du nombre d'effets observés minimal qui permet d'intégrer dans l'analyse des OPC peu étudiés, mais qui engendre des évaluations globales basées sur un nombre très faible d'effets observés.

	Élargissement (e)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Indice de correspondance (IC)	1,000	0,900	0,810	0,729	0,656	0,590	0,531	0,478	0,430	0,387	0,349	0,314
Cause à effet	1	AB	AB	AB	AB	AB	AB	AB	AB	AB	AB	AB	AB
	2		AB	AB	AB	AB	AB	AB	AB	AB	AB	AB	AB
	3			AB	AB	AB	AB	AB	AB	AB	AB	AB	AB
Marnage	Sans marée				B	B	B	B	AB	AB	AB	AB	AB
	Microtidal	B	B	B	AB	AB	AB	AB	AB	AB	AB	AB	AB
	Mesotidal	**A**	**A**	**A**	AB	AB	AB	AB	AB	AB	AB	AB	AB
	Macrotidal				**A**	**A**	**A**	**A**	AB	AB	AB	AB	AB
	Mégatidal								AB	AB	AB	AB	AB
	NA								AB	AB	AB	AB	AB
	NSP								AB	AB	AB	AB	AB
Type de vague	Faible					**A**	**A**	**A**	**A**	AB	AB	AB	AB
	Modérée	**A**	**A**	**A**	**A**	AB	AB	AB	AB	AB	AB	AB	AB
	Élevée	B	B	B	B	AB	AB	AB	AB	AB	AB	AB	AB
	NA					B	B	B	B	AB	AB	AB	AB
	NSP									AB	AB	AB	AB
Type de substrat	Argile										AB	AB	AB
	Silt						**A**	**A**	**A**	**A**	AB	AB	AB
	Sable	**A**	**A**	**A**	**A**	**A**	**A**	**A**	**A**	**A**	AB	AB	AB
	Gravier						AB	AB	AB	AB	AB	AB	AB
	Galet	B	B	B	B	B	B	B	B	B	AB	AB	AB
	Bloc						B	B	B	B	AB	AB	AB
	NA										AB	AB	AB
	NSP										AB	AB	AB
Type de côte	Cordon littoral							AB	AB	AB	AB	AB	AB
	Flèche littorale	B	B	B	B	B	B	AB	AB	AB	AB	AB	AB
	Île barrière							AB	AB	AB	AB	AB	AB
	Terrasse de plage	**A**	**A**	**A**	**A**	**A**	**A**	AB	AB	AB	AB	AB	AB
	Côte dunaire											AB	AB
	Falaise meuble											AB	AB
	Marais maritime											AB	AB
OPC	**Brise-lame émergé**	**A**	**A**	**A**	**A**	**A**	**A**	**A**	**A**	**A**	**A**	**A**	AB
	Brise-lame à crête basse												AB
	Brise-lame submergé	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	AB
	Seuil submergé												AB

Figure 26. Illustration du phénomène d'uniformisation des requêtes engendré par le processus d'élargissement des caractéristiques environnementales initiales (critères initiaux du scénario A, critères initiaux du scénario B)

6.1.3 Nombre d'effets observés minimal

Une balance entre la correspondance des effets observés avec les caractéristiques du secteur d'étude et une précision dans les effets observés.

Ainsi, plus le nombre d'effets minimal observé est élevé, plus la correspondance est élevée, mais moins les résultats sont basés sur un nombre d'effets observés élevé. Ainsi, étant donné que le nombre de publications par type d'environnement côtier est faible, il est préférable d'orienter le nombre d'effets minimal afin de conserver tout de même une correspondance élevée avec les caractéristiques du milieu. Ainsi, les résultats seront plus variables en fonction des types d'environnements côtiers.

6.1.4 Limite de la méthode

L'algorithme d'évaluation présente des résultats pour les OPC et les environnements côtiers ayant fait l'objet d'une publication scientifique dont les résultats ont été incorporés dans la base de données décrite à la section 4.1.1.1. Ainsi, d'autres solutions techniques peuvent être applicables, bien qu'elles ne soient pas incluses dans l'algorithme.

L'algorithme d'évaluation proposé permet de réaliser une méta-analyse des études de cas portant sur les effets d'OPC. Or, les dimensions des OPC par rapport aux conditions environnementales sont rarement indiquées dans les études de cas. Ces paramètres ont toutefois une forte importance quant à l'effet d'un OPC sur le système côtier. Ainsi, l'algorithme ne peut tenir compte de ce manque d'information pour réaliser l'évaluation d'un OPC. La méthode mène donc à des résultats généraux qui représentent une synthèse de l'information présente dans la littérature scientifique.

Certains biais potentiels à la méthode d'évaluation sont engendrés par l'échelle de pondération des énoncés : adjectifs qualificatifs utilisés par les auteurs, subjectivité de l'évaluateur, inclusion de conflit d'intérêts potentiel. L'évaluation est basée sur la pondération des énoncés des auteurs en fonction des adjectifs qualificatifs utilisés. De cette manière, il est considéré que l'ensemble des auteurs ont une sensibilité comparable lors de la rédaction quant à la qualification de leurs résultats. Or, il y a certainement une variation non considérée par l'algorithme. Également, l'évaluation des énoncés est sujette à une certaine subjectivité de l'évaluateur. Malgré un protocole prévu pour limiter ce biais, il demeure que chaque énoncé contient des particularités qui doivent être intégrées dans un cadre d'analyse général. Ainsi, l'évaluateur peut être amené à noter un énoncé au meilleur de ses connaissances. Une hypothèse soulevée est que le nombre d'énoncés associés à un sous-type, un type ou une catégorie d'effet observé aient une influence sur ces deux biais. Ainsi, plus le nombre d'énoncés est élevé, moins le biais est important en raison de la dissolution du biais dans le volume d'énoncé.

En étant appuyée sur des énoncés tirés de publications scientifiques, la méthode de pondération ne peut tenir compte des conflits d'intérêts potentiels des auteurs. Elle est basée sur le fait que ces conflits d'intérêts soient traités dans le processus de publication de chaque journal.

La correspondance entre le site d'étude et la base de données est établie en fonction de quatre variables (type de côte, type de substrat, marnage, et énergie des vagues). Cette correspondance est une simplification de la dynamique locale qui est largement plus complexe. Ainsi, la sélection des MAAC, en vue d'autres étapes dans le cheminement de projet, doit considérer cette complexité locale afin de justifier la sélection des MAAC propices.

6.2 Analyse multicritère

Globalement, la méthode d'analyse multicritère proposée est un outil flexible, transparent et intégré qui peut contribuer à l'évaluation et la sélection des MAAC par sa capacité à structurer et analyser les multiples dimensions d'un problème complexe qui ne peuvent pas toujours être quantifiés. La méthode permet de comparer les scénarios en fonction de plusieurs critères de sélection (Choo *et al.*, 1999 ; Horstman *et al.*, 2009), tout en considérant leur importance relative, tel qu'évalués par les acteurs de plusieurs organisations. Elle permet ultimement d'améliorer les connaissances sur un contexte socioécologique spécifique en permettant de réduire l'incertitude quant au choix d'une solution adaptée. La méthode d'analyse multicritère est utile pour les décideurs afin de comprendre l'ensemble des aspects de la problématique et les conséquences potentielles associées au choix d'une mesure d'adaptation ainsi que de sélectionner la meilleure solution selon leurs priorités et leurs préférences. Spécifiquement, les trois étapes de l'analyse multicritère apportent de l'information pertinente à la prise de décision.

6.2.1 Identification et pondération des critères de sélection

L'identification et la définition des critères de sélection ont été réalisées par l'équipe du MTMD et de l'UQAR. Cette sous-étape est la base de l'évaluation effectuée avec la méthode d'analyse multicritère. Elle vise à former un ensemble de critères complets, opérationnels, indépendants mutuellement, sans doublon, et cohérents, avec les effets à différentes échelles temporelles (De Bruin *et al.*, 2009). La pondération des critères de sélection a été effectuée par des acteurs du MTMD et des acteurs du territoire côtier associés aux cinq secteurs d'étude. Cette sous-étape est idéale afin d'intégrer un groupe d'acteurs dans le processus décisionnel. La pondération des critères de sélection permet de définir les priorités de différentes organisations locales et ultimement de les comparer avec les priorités du MTMD de manière à identifier les concordances et les divergences potentielles entre les organisations selon chacun des critères de sélection. Les décideurs peuvent ainsi utiliser cette information afin de gérer les questions conflictuelles en amorçant des discussions approfondies et en proposant des compromis. Cela permet afin de parvenir à un résultat satisfaisant autour d'une solution adaptée aux réalités locales.

6.2.1.1 Identification des critères de sélection

L'identification des critères de sélection a été réalisée en plusieurs itérations, ce qui a mené à plusieurs versions de la liste (section 4.2.1.1). Dans le cadre du projet actuel, les versions 1 et 2 de la liste de critères de sélection ont été utilisées dans les étapes 1 et 2 de la méthode d'analyse multicritère (tableau 16). Une version finale de la liste de critères de sélection est présentée à l'annexe B.

La différence entre le contenu des versions 1 et 2 de la liste de critères est expliquée par le fait que l'étape 1 de l'analyse multicritère ait été réalisée avant l'étape 2. Dans le futur, la notation des MAAC au regard de chacun des critères de sélection (étape 2) devrait être réalisée préalablement à la pondération des critères de sélection (étape 1) afin d'éviter cette variation de la liste de critère. Ainsi, la liste de critère serait validée en fonction des caractéristiques de 5 sites d'étude et les modifications potentielles seraient intégrées à la liste de critère finale. Cette liste finale serait alors utilisée pour la pondération des critères de sélection.

Dans la version finale (annexe B), la pertinence du critère « empiètement » dans la catégorie de critère « contexte environnemental » a été revue. Ce critère réfère à la complexité ajoutée au projet si des mesures de compensation sont nécessaires due à la dénaturalisation du milieu d'intervention. Dans ce contexte, la notion d'empiètement a été ajoutée au critère « Expertise pour la phase de préparation » de la catégorie « Expertise », car cette notion vient ajouter un élément de complexité associé à la planification de la compensation dans le cadre du projet. Ainsi, la catégorie de critère « contexte environnemental » intègre deux critères : « Effets sur les processus côtiers » et « Effets sur les milieux naturels et les espèces d'intérêts ». Également, dans cette version, certains termes ont été adaptés afin d'assurer la cohérence du vocabulaire avec le cheminement ministériel de la réalisation de projets routiers au MTMD.

La version finale de la liste de critère de sélection contient 11 critères répartis en cinq catégories. Généralement, une liste contient entre 7 et 12 critères (Garmendia *et al.*, 2010), ce qui permet de demeurer dans les limites cognitives de l'esprit humain (Bouyssou, 1990).

6.2.1.2 Intégration des acteurs du territoire côtier

L'intégration des acteurs locaux dans le processus décisionnel est une tendance observée en gestion environnementale (Garmendia *et al.*, 2010 ; Jones *et al.*, 2014 ; Marttunen *et al.*, 2017 ; Reed, 2008). Les approches participatives ont été développées en réponse à l'approche *top-down* de manière à intégrer davantage les connaissances locales dans le processus décisionnel (Reed, 2008).

Dans le contexte du projet actuel, le processus d'identification des critères de sélection a été limité au personnel technique du MTMD et aux chercheurs de

l'UQAR. Si cette méthode limite la compréhension des acteurs du territoire des critères utilisés, elle permet de répondre directement aux besoins internes du MTMD. Il demeure que la version finale de la liste de critère a été développée sur la base de la liste de critère défini par un processus participatif réalisé dans le cadre du projet Résilience côtière. Il avait d'ailleurs été soulevé suite à cette démarche que l'utilisation d'un processus participatif afin d'identifier les critères de sélection avait menée à une surspécificité des critères et à des doublons dans les définitions (Sauvé *et al.*, 2022b).

La participation des acteurs du territoire a donc été limitée à l'étape de pondération des critères de sélection. La méthode utilisée dans le cadre du projet actuel est une consultation ciblée en fonction des caractéristiques de cinq secteurs d'étude au moyen d'un questionnaire en ligne. Cette consultation intégrait l'ensemble des critères de sélection identifiés.

Selon les résultats de l'étape 3 de la méthode d'analyse multicritère pour l'ensemble des secteurs d'étude, la hiérarchisation des MAAC n'est pas influencée par l'intégration des acteurs du territoire. L'isolation de la pondération moyenne des critères de sélection de différents groupes de répondants permet de constater un consensus dans l'ordre des MAAC pour l'ensemble des secteurs d'étude. Par les résultats des étapes 1 et 2, le fait de consulter les acteurs du territoire côtier locaux permet d'ajouter une dimension locale au processus décisionnel par l'amélioration de la compréhension des décideurs sur les interactions entre les MAAC et les conditions, les enjeux, les priorités et les intérêts locaux.

En considérant, les résultats probants obtenus par l'implication des acteurs locaux à l'étape 1 de l'analyse multicritère, au moyen d'un questionnaire en ligne, il est recommandé d'intégrer une étape au processus de consultation publique du MTMD afin de faciliter les échanges entre les représentants du MTMD et les acteurs locaux. Les caractéristiques du secteur visé, les critères de sélection et les scénarios de MAAC envisagés pourraient être détaillés. De cette manière, les représentants du MTMD pourraient être assurés d'une compréhension commune du projet. Toutefois, à moyen terme, la lassitude et le cynisme des acteurs locaux à l'égard de la consultation publique sont des risques à considérer. Ils peuvent entrainer une baisse de l'engagement et mettre en péril la crédibilité de la consultation. Les acteurs locaux doivent sentir que leur implication est importante et qu'ils ont la capacité d'influencer les décisions qui les concernent (Gamper et Turcanu, 2007 ; Reed, 2008).

6.2.2 Notation des MAAC au regard des critères de sélection

La notation des MAAC, au regard des critères de sélection, a été effectuée par l'équipe multidisciplinaire de MTMD et de l'UQAR. Lors de ce processus, l'importance d'avoir minimalement deux professionnels d'une même discipline a été notée afin d'argumenter sur la notation des MAAC au regard d'un critère.

La méthode PROMETHEE permet d'adapter l'unité d'évaluation à la nature de chacun des critères et de varier le type d'évaluation selon la disponibilité des données. Le MTMD peut utiliser le jugement d'expert et une échelle qualitative lorsque les données ne sont pas disponibles. Dans ce cas, un certain niveau de subjectivité et d'incertitude doit être considéré dans l'interprétation des résultats. Lorsque les données sont disponibles, elles peuvent être utilisées directement dans l'évaluation afin d'obtenir une évaluation objective et diminuer le niveau d'incertitude des résultats. Lorsqu'une échelle qualitative est utilisée, sur la base de l'exercice de notation des MAAC au regard de chacun des critères du site de La Martinique (5 échelons) et des autres sites (9 échelons), il est recommandé d'utiliser une échelle à 9 points d'évaluation (1 = le moins bon; 9 = le meilleur) afin d'augmenter la finesse de la discrimination et d'exprimer une plus grande sensibilité dans la notation relative des scénarios. Selon la nature de chacun des critères, deux types d'échelle devraient être utilisés. Pour les critères 1, 2 et 3, une échelle basée sur les qualificatifs très négatif (1) à très positif (9). Pour les critères 4 à 11, une échelle basée sur les qualificatifs très faible (1) à très élevé (9) (tableau 46).

Tableau 46. Type d'échelle qualitative en fonction des critères

Score	Critères	
	1, 2 et 3	4 à 11
1	Très négatif	Très faible
2	TN à N	TF à F
3	Négatif	Faible
4	N à N	F à M
5	Neutre	Moyenne
6	N à P	M à É
7	Positif	Élevée
8	P à TP	É à TÉ
9	Très positif	Très élevée

Finalement, la notation des MAAC au regard de chacun des critères de sélection peut être utilisée dans la phase de conception afin d'identifier des synergies entre les MAAC de manière à développer des scénarios combinant différentes MAAC. Elle peut également être utilisée lors de la consultation publique à l'étape de l'avant-projet préliminaire (tableau 5) afin de sensibiliser les différentes parties prenantes sur les effets des MAAC sur le SSEC.

6.2.3 Hiérarchisation des MAAC

La hiérarchisation des MAAC (étape 3) est structurée de manière à interpréter les écarts totaux entre les MAAC, ce qui facilite l'évaluation des différentes

MAAC adaptées au contexte local. Cette structuration permet également de comparer les écarts dans les rangs des MAAC en fonction des moyennes pondérées des différentes organisations.

6.3 Processus décisionnel

6.3.1 Pérennisation de l'information par une structure cohérente des connaissances

L'approche proposée permet la structuration cohérente et pérenne des connaissances scientifiques, puis des priorités des acteurs du territoire afin de faciliter l'utilisation de ces connaissances dans les processus de planification et de conception des OPC.

D'abord, une base de données a été développée afin de répertorier les énoncés sur les effets (tels qu'observés par les auteurs) engendrés par les OPC sur les aspects géomorphologiques, hydrodynamiques, écosystémiques et sociaux des zones côtières. Ces énoncés sont associés aux caractéristiques environnementales propres aux sites dans lesquels les effets ont été observés lors de l'intégration dans la base de données. La base de données a été développée de manière à pouvoir être mise à jour par l'intégration de nouvelles études de cas. Ainsi, les mises à jour permettent d'assurer la pérennité de l'information qui en est extraite. La première version de la base de données comprend un total de 411 publications scientifiques desquelles ont été extraits 1709 énoncés d'effet (Sauvé *et al.*, 2022a). Une bonification de la base de données serait suggérée, afin d'ajouter les textes scientifiques qui ont été publiés depuis 2020 et de la littérature grise, provenant des études de suivi des OPC du MTMD.

Ensuite, la structure en trois étapes de la méthode d'analyse multicritère permet d'évaluer et de hiérarchiser les OPC au regard des priorités des professionnels du MTMD et des acteurs locaux ainsi que des connaissances disponibles sur l'effet des OPC sur le système côtier selon chaque critère utilisé dans l'analyse. Cette structure permet d'assurer une mise à jour efficace de l'information en cas de réévaluation et d'ainsi évaluer les effets des changements d'information sur la hiérarchisation des OPC.

Globalement, la structuration de l'information permet d'établir une base commune de comparaison des OPC qui a priori présentent des effets distincts sur le SSEC. Elle permet également de définir une normalisation de la sélection des scénarios d'OPC basée sur les avancées scientifiques. De cette manière, l'approche permet de réduire la subjectivité et l'incertitude associée à des approches de sélection basées uniquement sur les connaissances d'experts (Brugnach *et al.*, 2008) et aider les décideurs responsables à prendre de bonnes décisions.

6.3.2 Diminution de l'incertitude dans un processus d'aide à la prise de décision

L'acquisition de connaissances est un aspect clé pour réduire l'incertitude associée au processus décisionnel (Polasky *et al.*, 2011) et pour augmenter globalement la résilience des communautés côtières (Lebel *et al.*, 2006 ; Pahl-Wostl, 2009). L'approche proposée contribue à l'acquisition de deux types de connaissances : (1) connaissances scientifiques sur les OPC et leurs effets et (2) connaissances sur le contexte local d'un site d'intervention.

Premièrement, l'algorithme d'évaluation des effets des OPC contribue à intégrer les connaissances scientifiques sur les effets des OPC dans le processus décisionnel. La base de données sur les effets des OPC offre un portrait des connaissances scientifiques à l'échelle internationale. La recherche effectuée dans cette base de données facilite l'identification d'études sur un OPC et un contexte environnemental spécifique. L'algorithme permet d'évaluer et de hiérarchiser les OPC dans un contexte environnemental spécifique en donnant de l'information sur le degré de correspondance entre les contextes environnementaux initial et utilisé dans l'analyse. Ainsi, cette méthode permet de définir l'incertitude quant aux connaissances scientifiques disponibles pour un contexte environnemental spécifique afin d'anticiper les effets potentiels d'un OPC sur le système côtier.

Deuxièmement, l'approche d'analyse multicritère contribue à l'utilisation des connaissances locales dans le processus décisionnel par l'intégration des acteurs locaux au processus d'identification et de pondération des critères de sélection d'un OPC permettant de sélectionner et de concevoir des OPC qui sont mieux adaptés aux conditions environnementales et socioculturelles locales. De plus, l'utilisation de processus participatifs et collaboratifs permet le transfert de connaissances bidirectionnel : les acteurs du territoire amènent des connaissances sur le contexte local aux professionnels et les professionnels amènent des connaissances scientifiques aux acteurs du territoire. Le partage des connaissances permet d'augmenter la résilience et l'adaptation des communautés côtières (Chaffin *et al.*, 2014 ; Khunwishit *et al.*, 2018 ; Lebel *et al.*, 2006). Finalement, l'approche proposée se présente également comme une plateforme d'arrimage des connaissances multiacteurs où les connaissances scientifiques et les connaissances locales sont répertoriées, structurées et analysées de manière à hiérarchiser les OPC au regard de l'ensemble des connaissances disponibles pour un site d'intervention.

6.3.3 Intégration au cheminement de projet du MTMD

L'approche d'aide à la prise de décision proposée dans ce document est composée de deux outils d'aide à la décision : l'algorithme d'évaluation des OPC et l'analyse multicritère. Ces deux outils ont été développés de manière à compléter l'évaluation des mesures d'adaptation aux aléas côtiers réalisée avec les méthodes d'analyse usuelles, tels que la modélisation numérique et la caractérisation environnementales. Ils peuvent être utilisés à différentes étapes du cheminement de projet du MTMD (tableau 5). L'utilisation recommandée des deux outils est présentée dans les prochaines sous-sections.

6.3.3.1 Algorithme d'évaluation

L'algorithme d'évaluation des effets des OPC a été développé dans l'objectif de répondre à un besoin d'intégration des connaissances scientifiques spécifiques à un site dans le processus décisionnel et le dimensionnement des OPC. La structuration à plusieurs niveaux d'agrégation permet d'exploiter les résultats à l'étape de l'étude des solutions (1.1.2, tableau 5, p. 17) et à l'étape d'avant-projet préliminaire (1.2, tableau 5).

À l'étape d'étude des solutions (1.1.2, tableau 5), la synthèse des résultats, soit le niveau d'agrégation le plus élevé, présente une évaluation globale des OPC. Il permet à un utilisateur de former une variété de scénarios à considérer et de justifier la sélection d'OPC sur la base des indicateurs de performance et de précision des modules géomorphologique et services écologiques de l'algorithme d'évaluation.

À l'étape d'avant-projet préliminaire (1.2, tableau 5), les résultats désagrégés présentés dans la section des résultats détaillés permettent de consulter l'évaluation des OPC à l'échelle des types d'effet observé. Ils permettent d'analyser les avantages et les inconvénients des OPC et de la possibilité de combiner différents OPC. Ainsi, cette étape contribue à obtenir une analyse complète à l'échelle du SSEC. Également, les résultats de l'algorithme permettent lors de l'avant-projet préliminaire (1.2.1, tableau 5), d'appuyer, sur une base scientifique, les scénarios de MAAC retenues auprès du milieu et du ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs.

6.3.3.2 Analyse multicritère

La méthode d'analyse multicritère peut être utilisée aux étapes de l'étude des solutions (1.1.2, tableau 5) et de l'avant-projet préliminaire (1.2.1, tableau 5). Une différence importante entre ces deux étapes est la quantité de données disponibles pour l'analyse.

Généralement, à l'étape de l'étude des solutions (1.1.2, tableau 5), l'incertitude est relativement élevée en raison d'une quantité de données plus faible. Ainsi, la définition des scénarios de MAAC considérée est peu précise et ne comporte pas de combinaison. La notation des scénarios au regard de chacun des critères

est basée sur des hypothèses ou des extrapolations de résultats d'études antécédentes ou réalisées à proximité. À cette étape, une rencontre avec la municipalité et d'autres parties prenantes est prévue selon les besoins. La pondération des critères par les acteurs locaux pourrait être réalisée lors de cette rencontre. Cette notation des critères pourrait être réalisée en fonction d'une échelle qualitative de 9 points. Ensuite, les résultats de la hiérarchisation des critères doivent être interprétés en considérant l'incertitude due à la définition sommaire des MAAC en raison du manque de données pour la notation des MAAC, au regard de chaque critère.

À l'étape de l'avant-projet préliminaire (1.2.1, tableau 5), plusieurs études sont réalisées afin d'augmenter la quantité de données et d'ainsi diminuer l'incertitude. Également, à la lumière des résultats de l'étude des solutions, une présélection des scénarios est effectuée. À cette étape, les scénarios de MAAC sont mieux définis et des combinaisons peuvent être envisagées. Ainsi, l'analyse multicritère pourrait être réappliquée à cette étape en modifiant la notation des scénarios de MAAC au regard des nouvelles définitions et des données du site. Les unités d'évaluation pourraient être adaptées à la nature des critères en fonction des données disponibles.

7 CONCLUSION

Une approche intégrée d'évaluation et de hiérarchisation de mesures d'adaptation aux aléas côtiers (MAAC) adaptées aux conditions spécifiques d'un système socioécologique côtier (SSEC) a été développée. Cette approche comprend un algorithme d'évaluation des OPC et une méthode d'analyse multicritère qui offrent une structuration cohérente de l'information, tout en permettant de prendre en considération les données, tant géomorphologiques et hydrodynamiques, qu'écologiques et socio-économiques nécessaires, à l'identification des meilleures solutions en matière de MAAC. Ainsi, elle contribue à diminuer l'incertitude dans le processus d'aide à la décision de MAAC, en basant la sélection des MAAC sur une analyse holistique du SSEC, pour obtenir un portrait global de l'effet potentiel des MAAC sur ses composantes.

L'évaluation effectuée avec l'algorithme d'évaluation est réalisée à une échelle spatiale fine en fonction d'un ensemble de quatre variables environnementales qui correspondent aux caractéristiques géomorphologiques et hydrodynamiques d'un segment de côte. Il permet d'intégrer les connaissances scientifiques sur les effets des OPC dans le processus décisionnel par la hiérarchisation de l'information et de détailler les résultats selon plusieurs paliers d'agrégation. La méthode d'analyse multicritère est utile pour les décideurs afin de comprendre l'ensemble des aspects de la problématique et les conséquences potentielles associées au choix d'une mesure d'adaptation ainsi que de sélectionner la meilleure solution selon leurs priorités et leurs préférences.

Ultimement, cette approche pourra être utilisée, en totalité ou en partie, dans le cadre d'une étude d'impact mené par le ministère des Transports et de la Mobilité durable (MTMD) qui vise à mettre en place un programme décennal d'interventions en milieu côtier à l'échelle régionale. Elle pourra également être intégrée dans le cheminement de projets du MTMD en complément des méthodes d'évaluation des MAAC utilisées actuellement.

8 RÉFÉRENCES

Amadio, M., Essenfelder, A. H., Bagli, S., Marzi, S., Mazzoli, P., Mysiak, J. et Roberts, S. (2022). Cost-benefit analysis of coastal flood defence measures in the North Adriatic Sea. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *22*(1), 265-286. https://doi.org/10.5194/nhess-22-265-2022

Ananda, J. et Herath, G. (2009). A critical review of multi-criteria decision making methods with special reference to forest management and planning. *Ecological Economics*, *68*(10), 2535-2548. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.05.010

André, C., Boulet, D., Rey-Valette, H. et Rulleau, B. (2016). Protection by hard defence structures or relocation of assets exposed to coastal risks: Contributions and drawbacks of cost-benefit analysis for long-term adaptation choices to climate change. *Ocean and Coastal Management*, *134*, 173-182. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2016.10.003

André, P., Delisle, C. E. et Revéret, J.-P. (2010). *L'évaluation des impacts sur l'environnement: processus, acteurs et pratique pour un développement durable* (3e éd.). Montréal, QC, Canada.

Antunes, P., Karadzic, V., Santos, R., Beça, P. et Osann, A. (2011). Participatory multi-criteria analysis of irrigation management alternatives: The case of the Caia irrigation district, Portugal. *International Journal of Agricultural Sustainability*, *9*(2), 334-349. https://doi.org/10.1080/14735903.2011.582358

Arlington Group Planning and Architecture. (2012). *Sea level rise adaptation primer : a toolkit to build adaptive capacity on Canada's south coasts*.

Bagheri, M., Sulaiman, W. N. A. et Vaghefi, N. (2013). Application of geographic information system technique and analytical hierarchy process model for land-use suitability analysis on coastal area. *Journal of Coastal Conservation*. https://doi.org/10.1007/s11852-012-0213-4

Baquerizo, A. et Losada, M. A. (2008). Human interaction with large scale coastal morphological evolution. An assessment of the uncertainty. *Coastal Engineering*, *55*(7-8), 569-580. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2007.10.004

Barnhart, K. R., Overeem, I. et Anderson, R. S. (2014). The effect of changing sea ice on the physical vulnerability of Arctic coasts. *Cryosphere*, *8*(5), 1777-1799. https://doi.org/10.5194/tc-8-1777-2014

Beaumont, N., Austen, M. C., Atkins, J. P., Burdon, D., Degraer, S., Dentinho, T. P., Derous, S., Holm, P., Horton, T., van Ierland, E., Marboe, A. H., Starkey, D. J., Townsend, M. et Zarzycki, T. (2007). Identification, definition and quantification of goods and services provided by marine biodiversity: Implications for the ecosystem approach. *Marine Pollution Bulletin*, *54*(3),

253-265. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2006.12.003

Behzadian, M., Kazemzadeh, R. B., Albadvi, A. et Aghdasi, M. (2010). PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. *European Journal of Operational Research*, *200*(1), 198-215. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.01.021

Berkes, F. (2007). Understanding uncertainty and reducing vulnerability: Lessons from resilience thinking. *Natural Hazards*, *41*(2), 283-295. https://doi.org/10.1007/s11069-006-9036-7

Bernatchez, P., Boucher-Brossard, G. et Sigouin-Cantin, M. (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*.

Bernatchez, P., Fraser, C., Lefaivre, D. et Dugas, S. (2011). Integrating anthropogenic factors, geomorphological indicators and local knowledge in the analysis of coastal flooding and erosion hazards. *Ocean and Coastal Management*, *54*(8), 621-632. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2011.06.001

Bernatchez, P., Toubal, T., Van-Wierts, S., Drejza, S. et Friesinger, S. (2010). *Caractérisation sédimentologique et géomorphologique des unités hydrosédimentaires de Pointe-aux-Loups et de la baie de Plaisance, route 199, Îles-de-la-Madeleine*.

Bilkovic, D. M., Mitchell, M. M., La Peyre, M. K. et Toft, J. D. (2017). *Living Shorelines: The Science and Management of Nature-Based Coastal Protection*. Boca Raton. https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9781315151465

Bird, E. (2008). *Coastal Geomorphology: An Introduction* (Second edi). https://doi.org/10.1029/01eo00219

Bouyssou, D. (1990). Building criteria: a prerequisite for MCDA. Dans B. e C. CA (dir.), *Readings in multiple criteria decision aid* (p. 58-80). Berlin, Heidelberg, New York.

Boyer-Villemaire, U., Circé, M., Da Silva, L., Desjarlais, C. et Morneau, F. (2016). *Analyses coûts-avantages des options d'Adaptation en zone côtière au Québec et dans les provinces atlantiques*.

Brans, J. P. (1982). L'ingéniérie de la décision; Élaboration d'instruments d'aide à la décision. La méthode PROMETHEE. Dans R. Nadeau et M. Landry (dir.), *L'aide à la décision: Nature, Instruments et Perspectives d'Avenir* (p. 183-213). Presse de l'Université Laval.

Brans, J. P., Vincke, P. et Mareschal, B. (1986). How to select and how to rank projects : The PROMETHEE method. *European Journal of Operational*

Research, *24*, 228-238.

Brugnach, M., Dewulf, A., Pahl-Wostl, C. et Taillieu, T. (2008). Toward a relational concept of uncertainty: About knowing too little, knowing too differently, and accepting not to know. *Ecology and Society*, *13*(2). https://doi.org/10.5751/ES-02616-130230

Bryce, R., Irvine, K. N., Church, A., Fish, R., Ranger, S. et Kenter, J. O. (2016). Subjective well-being indicators for large-scale assessment of cultural ecosystem services. *Ecosystem Services*, *21*(July), 258-269. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2016.07.015

Caillet, R. (2003). *Analyse multicritère : Étude et comparaison des méthodes existantes en vue d'une application en analyse de cycle de vie*.

Chaffin, B. C., Gosnell, H. et Cosens, B. A. (2014). A decade of adaptive governance scholarship: Synthesis and future directions. *Ecology and Society*, *19*(3). https://doi.org/10.5751/ES-06824-190356

Chan, K. M. A., Satterfield, T. et Goldstein, J. (2012). Rethinking ecosystem services to better address and navigate cultural values. *Ecological Economics*, *74*, 8-18. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2011.11.011

Chang, H.-K., Liou, J.-C. et Chen, W.-W. (2012). Protection Priority in the Coastal Environment Using a Hybrid AHP-TOPSIS Method on the Miaoli Coast, Taiwan. *Journal of Coastal Research*, *28*(2), 369-374. https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-10-00092.1

Choo, E. U., Schoner, B. et Wedley, W. C. (1999). Interpretation of criteria weights in multicriteria decision making. *Computers and Industrial Engineering*, *37*(3), 527-541. https://doi.org/10.1016/S0360-8352(00)00019-X

Church, J. A. et White, N. J. (2011). Sea-Level Rise from the Late 19th to the Early 21st Century. *Surveys in Geophysics*, *32*(4-5), 585-602. https://doi.org/10.1007/s10712-011-9119-1

Cinelli, M., Coles, S. R. et Kirwan, K. (2014). Analysis of the potentials of multi criteria decision analysis methods to conduct sustainability assessment. *Ecological Indicators*, *46*, 138-148. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.06.011

Circé, M., Da Silva, L., Boyer-Villemaire, U., Duff, G., Desjarlais, C. et Morneau, F. (2016a). *Analyse coûts-avantages des options d'adaptation en zone côtière au Québec - Rapport synthèse*. Montréal.

Circé, M., Da Silva, L., Duff, G., Boyer-Villemaire, U., Corbeil, S., Desjarlais, C. et Morneau, F. (2016b). *Analyse coûts-avantages des options d'adaptation en zone côtière aux Îles-de-la-Madeleine*. Montréal.

Circé, M., Da Silva, L., Mercier, X., Boyer-Villemaire, U., Desjarlais, C. et Morneau, F. (2016c). *Analyse coûts-avantages des options d'adaptation en*

zone côtière à Percé. Montréal.

Circé, M., Da Silva, L., Mercier, X., Boyer-Villemaire, U. et Morneau, F. (2016d). *Analyse coûts-avantages des options d'adaptation en zone côtière à Maria*. Montréal.

Circé, M., Da Silva, L., Mercier, X., Duff, G., Boyer-Villemaire, U., Corbeil, S., Desjarlais, C. et Morneau, F. (2016e). *Analyse coûts-avantages des options d'adaptation en zone côtière à Carleton-sur-Mer*. Montréal.

Corriveau, M., Bernatchez, P., Arsenault, E. et Bandet, M. (2019a). *Analyse de la dynamique des foyers d'érosion en bordure de la route 138 sur la Côte-Nord afin d'identifier des solutions d'adaptation pour la route 138*. Rimouski, QC, Canada.

Corriveau, M., Bernatchez, P., Belzile, M. et Senneville, S. (2019b). *Influence de la réduction du couvert de glace sur l'Érosion côtière en bordure des infrastructures routières de l'est du Québec dans un contexte de changements climatiques (CC04.1) : Rapport final*. Rimouski, QC, Canada.

Corriveau, M., Bernatchez, P. et Dugas, S. (2019c). *Mise à jour de la cartographie des marges de sécurité en érosion côtière pour le secteur de Gallix, municipalité de Sept-Îles : analyse de l'évolution côtière et de la dynamique*. Rimouski, QC, Canada.

Corriveau, M., Fraser, C., Caron, T., Bernatchez, P., Buffin-Bélanger, T. et Van-Wierts, S. (2016). *Étude de la dynamique morphosédimentaire des côtes basses sablonneuses en bordure de la route 138 sur la côte-nord du saint-laurent en contexte de changements climatiques : Rapport final. Projet X016.1*. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis au ministère des Transports du Québec, Mars 2016, 421 p. + annexes.

Costanza, R., de Groot, R., Sutton, P., van der Ploeg, S., Anderson, S. J., Kubiszewski, I., Farber, S. et Turner, R. K. (2014). Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, *26*(1), 152-158. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.04.002

De Bruin, K., Dellink, R. B., Ruijs, A., Bolwidt, L., van Buuren, A., Graveland, J., de Groot, R. S., Kuikman, P. J., Reinhard, S., Roetter, R. P., Tassone, V. C., Verhagen, A. et Van Ierland, E. C. (2009). Adapting to climate change in the Netherlands: An inventory of climate adaptation options and ranking of alternatives. *Climatic Change*, *95*, 23-45. https://doi.org/10.1007/s10584-009-9576-4

De Groot, R. S., Fisher, B. et Christie, M. (2010). Integrating the ecological and economic dimensions in biodiversity and ecosystem service valuation. Dans P. Kumar (dir.), *The Economics of Ecosystems and Biodiversity. Ecological and economic foundations* (chap. 1, p. 10-40). London and Washington. https://doi.org/10.1017/s1355770x11000088

Degbe, C. G. E. (2009). *Geomorphology and coastal erosion in Guinée gulf* [Université d'Abomey-Calavi].

Didier, D., Bernatchez, P., Boucher-Brossard, G., Lambert, A., Fraser, C., Barnett, R. et Van-Wierts, S. (2015). Coastal Flood Assessment Based on Field Debris Measurements and Wave Runup Empirical Model. *Journal of Marine Science and Engineering*, *3*(3), 560-590. https://doi.org/10.3390/jmse3030560

Drejza, S., Bernatchez, P., Marie, G. et Friesinger, S. (2019). Quantifying road vulnerability to coastal hazards: Development of a synthetic index. *Ocean and Coastal Management*, *181*(April), 104894. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.104894

Drejza, S., Friesinger, S. et Bernatchez, P. (2014). *Vulnérabilité des infrastructures routières de l'Est du Québec à l'érosion et à la submersion côtière dans un contexte de changements climatiques : Caractérisation des côtes, dynamique hydrosédimentaire et exposition des infrastructures routières à l'éros*.

Drejza, S., Friesinger, S., Bernatchez, P. et Marie, G. (2015). *Vulnérabilité des infrastructures routières de l'Est du Québec à l'érosion et à la submersion côtière dans un contexte de changements climatiques : Développement d'une approche et d'un indice pour quantifier la vulnérabilité des infrastructures routières*. 2014 Transportation Association of Canada Conference and Exhibition: Past, Present, Future, ATC 2014.

Drejza, S., Paul-Hus, C. et Bernatchez, P. (2022). *Identification et évaluation des stratégies et des mesures d'adaptation non structurelles pour les infrastructures de transport : Rapport final, projet CC28.1*.

Dugan, J. E., Airoldi, L., Chapman, M. G., Walker, S. J. et Schlacher, T. A. (2011). Estuarine and Coastal Structures: Environmental Effects, A Focus on Shore and Nearshore Structures. Dans E. Wolanski et D. S. McLusky (dir.), *Treatise on Estuarine and Coastal Science* (vol. 8, p. 17-41). https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374711-2.00802-0

Félix, A., Baquerizo, A., Santiago, J. M. et Losada, M. A. (2012). Coastal zone management with stochastic multi-criteria analysis. *Journal of Environmental Management*, *112*, 252-266. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.05.033

Folke, C. (2006). Resilience: The emergence of a perspective for social-ecological systems analyses. *Global Environmental Change*, *16*(3), 253-267. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.04.002

Folke, C. (2016). Resilience (Republished). *Ecology and Society*, *21*(4), 30. https://doi.org/10.5751/ES-09088-210444

Friesinger, S., Sauvé, P., Bernatchez, P., Bandet, M., Caulet, C., Glaus, M. et Cusson, M. (2021). *Identification de solutions d'adaptation aux aléas*

côtiers pour augmenter la résilience des communautés des Premières Nations dans un contexte de changements climatiques.

Gallopín, G. C. (2006). Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity. *Global Environmental Change*, *16*(3), 293-303. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.02.004

Gamper, C. D. et Turcanu, C. (2007). On the governmental use of multi-criteria analysis. *Ecological Economics*, *62*(2), 298-307.

Garmendia, E. et Gamboa, G. (2012). Weighting social preferences in participatory multi-criteria evaluations: A case study on sustainable natural resource management. *Ecological Economics*, *84*, 110-120. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2012.09.004

Garmendia, E., Gamboa, G., Franco, J., Garmendia, J. M., Liria, P. et Olazabal, M. (2010). Social multi-criteria evaluation as a decision support tool for integrated coastal zone management. *Ocean and Coastal Management*, *53*(7), 385-403. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2010.05.001

Garschagen, M. (2013). Resilience and organisational institutionalism from a cross-cultural perspective: An exploration based on urban climate change adaptation in Vietnam. *Natural Hazards*, *67*(1), 25-46. https://doi.org/10.1007/s11069-011-9753-4

GIEC. (2014). Annexe II: Glossaire. Dans *Changements climatiques 2014: Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat* (chap. Annexe II, p. 131-145). Genève, Suisse.

GIEC. (2018). Annexe I: Glossaire. Dans J. B. R. Matthews (dir.), *Réchauffement planétaire de 1,5 °C, Rapport spécial du GIEC sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels et les trajectoires associées d'émissions mondiales de gaz à effet de serre, dans le contexte d*.

Gittman, R. K., Fodrie, F. J., Popowich, A. M., Keller, D. A., Bruno, J. F., Currin, C. A., Peterson, C. H. et Piehler, M. F. (2015). Engineering away our natural defenses: An analysis of shoreline hardening in the US. *Frontiers in Ecology and the Environment*, *13*(6), 301-307. https://doi.org/10.1890/150065

Goussard, J. J. (2014). Stakes and challenges of vigilance facing coastal risks in a fast development context; presentation of the coastal risk regional prevention plan of Western Africa and the West African Coastal Observation Mission. Dans *Connaissance et Compréhension des Risques Côtiers : Aléas, Enjeux, Représentations, Gestion*.

Granek, E. F., Polasky, S., Kappel, C. V., Reed, D. J., Stoms, D. M., Koch, E. W., Kennedy, C. J., Cramer, L. A., Hacker, S. D., Barbier, E. B., Aswani, S., Ruckelshaus, M., Perillo, G. M. E., Silliman, B. R., Muthiga, N., Bael, D.

et Wolanski, E. (2009). Ecosystem services as a common language for coastal ecosystem-based management. *Conservation biology*, *24*(1), 207-216. https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2009.01355.x

Ha, S., Tatano, H., Mori, N., Fujimi, T. et Jiang, X. (2021). Cost–benefit analysis of adaptation to storm surge due to climate change in Osaka Bay, Japan. *Climatic Change*, *169*(3-4), 1-20. https://doi.org/10.1007/s10584-021-03282-y

Haines-Young, R. et Potschin, M. (2010). The links between biodiversity, ecosystem services and human well-being. Dans *Ecosystems ecology: a new synthesis* (p. 110–139). Cambridge. https://doi.org/10.1017/CBO9780511750458

Hallegatte, S. (2009). Strategies to adapt to an uncertain climate change. *Global Environmental Change*, *19*(2), 240-247. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.12.003

Herva, M. et Roca, E. (2013). Review of combined approaches and multi-criteria analysis for corporate environmental evaluation. *Journal of Cleaner Production*, *39*, 355-371. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.07.058

Horstman, E. M., Wijnberg, K. M., Smale, A. J. et Hulscher, S. J. M. H. (2009). On the consequences of a long-term perspective for coastal management. *Ocean and Coastal Management*. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2009.08.009

Huang, I. B., Keisler, J. et Linkov, I. (2011). Multi-criteria decision analysis in environmental sciences: Ten years of applications and trends. *Science of the Total Environment*, *409*(19), 3578-3594. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.06.022

Johnston, A., Slovinsky, P. et Yates, K. L. (2014). Assessing the vulnerability of coastal infrastructure to sea level rise using multi-criteria analysis in Scarborough, Maine (USA). *Ocean and Coastal Management*. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2014.04.016

Jones, R. N., Patwardhan, A., Cohen, S. J., Kumar, P., Barros, R., Dokken, D. J., Mach, K. J., Bilir, T., Chatterjee, M., Ebi, K. L., Estrada, Y., Genova, R. C., Girma, B., Kissel, E., Levy, A. et MacCracken, S. (2014). Foundations for Decision Making. Dans C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea et L. L. White (dir.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (chap. 2, p. 195-228). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Jouzel, J., Planton, S., Le Cozannet, G., Cazenave, A., Costa, S., Douez, O., Gaufrès, P., Hissel, F., Idier, D., Laborie, V., Petit, V. et Sergent, P. (2015).

Le climat de la France au XXIe siècles, Volume 5, Changement climatique et niveau de la mer : de la planète aux côtes françaises.

Juhola, S., Glaas, E., Linnér, B. O. et Neset, T. S. (2016). Redefining maladaptation. *Environmental Science and Policy*, *55*, 135-140. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.09.014

Khunwishit, S., Choosuk, C. et Webb, G. (2018). Flood Resilience Building in Thailand: Assessing Progress and the Effect of Leadership. *International Journal of Disaster Risk Science*, *9*(1), 44-54. https://doi.org/10.1007/s13753-018-0162-0

Kitsiou, D., Coccossis, H. et Karydis, M. (2002). Multi-dimensional evaluation and ranking of coastal areas using GIS and multiple criteria choice methods. *Science of the Total Environment*. https://doi.org/10.1016/S0048-9697(01)00851-8

Klein, R. J. T., Nicholls, R. J. et Thomalla, F. (2003). Resilience to natural hazards: How useful is this concept? *Environmental Hazards*, *5*(1), 35-45. https://doi.org/10.1016/j.hazards.2004.02.001

Koontz, T. M., Gupta, D., Mudliar, P. et Ranjan, P. (2015). Adaptive institutions in social-ecological systems governance: A synthesis framework. *Environmental Science and Policy*, *53*, 139-151. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.01.003

Kopp, R. E., Kemp, A. C., Bitterman, K., Horton, B. P., Donnelly, J. P., Gehrels, W. R., Hay, C. C., Mitrovica, J. X., Morrow, E. D. et Rahmstorf, S. (2016). Temperature-driven global sea-level variability in the Common Era. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *113*(38), 1434-1441.

Le Cozannet, G., Garcin, M., Bulteau, T., Mirgon, C., Yates, M. L., Méndez, M., Baills, A., Idier, D. et Oliveros, C. (2013). An AHP-derived method for mapping the physical vulnerability of coastal areas at regional scales. *Natural Hazards and Earth System Science*. https://doi.org/10.5194/nhess-13-1209-2013

Lebel, L., Anderies, J. M., Campbell, B., Folke, C., Hatfield-Dodds, S., Hugues, T. P. et Wilson, J. (2006). Governance and the Capacity to Manage Resilience in Regional Social-Ecological Systems. *Ecology and Society*, *11*(1), 1-19. https://doi.org/10.5751/ES-01606-110119

Leclerc, M. et Dupuis, P. (2008). *Recherche d'une solution économique et durable à la problématique d'érosion littorale à Pointe-aux-Outardes Document principal*.

Liquete, C., Zulian, G., Delgado, I., Stips, A. et Maes, J. (2013). Assessment of coastal protection as an ecosystem service in Europe. *Ecological Indicators*, *30*, 205-217. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.02.013

Magnan, A. K., Schipper, E. L. F., Burkett, M., Bharwani, S., Burton, I., Eriksen,

S., Gemenne, F., Schaar, J. et Ziervogel, G. (2016). Addressing the risk of maladaptation to climate change. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, *7*(5), 646-665. https://doi.org/10.1002/wcc.409

Marchand, M. (2010). *Concepts and science for coastal erosion management. Concise report for policy makers*. Delft.

Mareschal, B. (2013). *PROMETHEE & GAIA Software*. http://www.promethee-gaia.net/vpa.html

Marttunen, M., Lienert, J. et Belton, V. (2017). Structuring problems for Multi-Criteria Decision Analysis in practice: A literature review of method combinations. *European Journal of Operational Research*, *263*(1), 1-17. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.04.041

Maystre, L. Y., Pictet, J. et Simos, J. (1994). *Méthodes multicritères ELECTRE: description, conseils pratiques et cas d'application à la gestion environnementale*.

McCauley, D. J. (2006). Selling out on nature. *Nature*, *443*(7107), 27-28. https://doi.org/10.1038/443027a

Monterroso, I., Binimelis, R. et Rodríguez-Labajos, B. (2011). New methods for the analysis of invasion processes: Multi-criteria evaluation of the invasion of Hydrilla verticillata in Guatemala. *Journal of Environmental Management*, *92*(3), 494-507. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.09.017

National Research Council. (2009). *Informing Decisions in a Changing Climate*. Washington, DC. https://doi.org/10.17226/12626

Nicholls, R. J. et Cazenave, A. (2010). Sea-Level Rise and Its Impact on Coastal Zones. *Science*, *328*, 1517-1520.

Nicholls, R. J. et Tol, R. S. J. (2006). Impacts and responses to sea-level rise: a global analysis of the SRES scenarios over the twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. https://doi.org/10.1098/rsta.2006.1754

Oppenheimer, M., Glavovic, B. C., Hinkel, J., van de Wal, R., Magnan, A. K., Abd-Elgawad, A., Cai, R., Cifuentes-Jara, M., DeConto, R. M., Ghosh, T., Hay, J., Isla, F., Marzeion, B., Meyssignac, B. et Sebesvari, Z. (2019). Sea Level Rise and Implications for Low-Lying Islands, Coasts and Communities. Dans *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* (chap. 4, p. 321-445). https://doi.org/10.1126/science.aam6284

Pahl-Wostl, C. (2009). A conceptual framework for analysing adaptive capacity and multi-level learning processes in resource governance regimes. *Global Environmental Change*, *19*(3), 354-365. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2009.06.001

Paul-Hus, C., Drouet, M., Desormeaux, A., Drejza, S., Fraser, C., Marie, G. et Bernatchez, P. (2021). *Cartographie des usages et des sites d'intérêt côtiers du Québec maritime – Rapport méthodologique et guide de l'utilisateur des données*.

Platt, S., Brown, D. et Hughes, M. (2016). Measuring resilience and recovery. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, *19*(January), 447-460. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2016.05.006

Pohekar, S. D. et Ramachandran, M. (2004). Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *8*(4), 365-381. https://doi.org/10.1016/j.rser.2003.12.007

Polasky, S., Carpenter, S. R., Folke, C. et Keeler, B. (2011). Decision-making under great uncertainty: Environmental management in an era of global change. *Trends in Ecology and Evolution*, *26*(8), 398-404. https://doi.org/10.1016/j.tree.2011.04.007

Polomé, P., Marzetti, S. et van der Veen, A. (2005). Economic and social demands for coastal protection. *Coastal Engineering*, *52*(10-11), 819-840. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.09.009

Potschin, M. et Haines-Young, R. (2016). Defining and measuring ecosystem services. Dans M. Potschin, R. Haines-Young, R. Fish et R. K. Turner (dir.), *Routledge Handbook of Ecosystem Services* (vol. 1, p. 25-42). New York, NY. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004

Pranzini, E., Wetzel, L. et Williams, A. T. (2015). Aspects of coastal erosion and protection in Europe. *Journal of Coastal Conservation*, *19*(4), 445-459. https://doi.org/10.1007/s11852-015-0399-3

Quintin, C., Bernatchez, P. et Jolivet, Y. (2013). *Impacts de la tempête du 6 décembre 2010 sur les côtes du Bas-Saint-Laurent et de la baie des Chaleurs*.

Reed, M. S. (2008). Stakeholder participation for environmental management: A literature review. *Biological Conservation*, *141*(10), 2417-2431. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2008.07.014

Sauvé, P., Bernatchez, P. et Glaus, M. (2020). The role of the decision-making process on shoreline armoring: A case study in Quebec, Canada. *Ocean and Coastal Management*, *198*, 13. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105358

Sauvé, P., Bernatchez, P. et Glaus, M. (2022a). *Identification of Coastal Defence Measures Best Adapted to Mitigate Hazards in Specific Coastal Systems: Development of a Dynamic Literature Meta-Analysis Methodology*. *Journal of Marine Science and Engineering* , *10*(3). https://doi.org/10.3390/jmse10030394

Sauvé, P., Bernatchez, P. et Glaus, M. (2022b). *Multicriteria Decision Analysis to Assist in the Selection of Coastal Defence Measures: Involving Coastal Managers and Professionals in the Identification and Weighting of Criteria . Frontiers in Marine Science , 9*. https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fmars.2022.845348

Sauvé, P., Bernatchez, P., Moisset, S., Glaus, M. et Goudreault, M.-O. (2023a). A need to better monitor the effects of coastal defence measures on coastal socio-ecological systems to improve future adaptation solutions. *Ocean & Coastal Management*, 19.

Sauvé, P., Moisset, S., Goudreault, M.-O. et Bernatchez, P. (2023b). *Caractérisation et effets des ouvrages de protection côtière sur les systèmes côtiers : Synthèse descriptive en vue d'une intervention sur le littoral*.

Scott, J. A., Ho, W. et Dey, P. K. (2012). A review of multi-criteria decision-making methods for bioenergy systems. *Energy*, *42*(1), 146-156. https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.03.074

Senneville, S., St-Onge Drouin, G., Dumont, D., Bihan-Poudec, A.-C., Belemaalem, Z., Corriveau, M., Bernatchez, P., Bélanger, S., Tolszczuk-Leclerc, S. et Villeneuve, R. (2014). *Rapport final: Modélisation des glaces dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent dans la perspective des changements climatiques*, 384.

Siders, A. R. et Keenan, J. M. (2020). Variables shaping coastal adaptation decisions to armor, nourish, and retreat in North Carolina. *Ocean and Coastal Management*, *183*(October 2019), 105023. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.105023

Silva, R., Martínez, M. L., Hesp, P. A., Catalan, P., Osorio, A. F., Martell, R., Fossati, M., Miot da Silva, G., Mariño-Tapia, I., Pereira, P., Cienguegos, R., Klein, A. et Govaere, G. (2014). Present and Future Challenges of Coastal Erosion in Latin America. *Journal of Coastal Research*, *71*, 1-16. https://doi.org/10.2112/si71-001.1

Smit, B., Burton, I., Klein, R. J. T. et Wandel, J. (2000). An anatomy of adaptation to climate change and variability. *Climati*, *45*, 223-251.

Smit, B. et Wandel, J. (2006). Adaptation, adaptive capacity and vulnerability. *Global Environmental Change*. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.03.008

Stagl, S. (2006). Multicriteria evaluation and public participation: The case of UK energy policy. *Land Use Policy*, *23*(1), 53-62. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2004.08.007

Tribbia, J. et Moser, S. C. (2008). More than information: what coastal managers need to plan for climate change. *Environmental Science and Policy*. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2008.01.003

Trutnevyte, E., Stauffacher, M. et Scholz, R. W. (2011). Supporting energy initiatives in small communities by linking visions with energy scenarios and multi-criteria assessment. *Energy Policy*, *39*(12), 7884-7895. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.09.038

Trutnevyte, E., Stauffacher, M. et Scholz, R. W. (2012). Linking stakeholder visions with resource allocation scenarios and multi-criteria assessment. *European Journal of Operational Research*, *219*(3), 762-772. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.01.009

Tudela, A., Akiki, N. et Cisternas, R. (2006). Comparing the output of cost benefit and multi-criteria analysis: An application to urban transport investment. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. https://doi.org/10.1016/j.tra.2005.08.002

UNISDR. (2015). *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015 - 2030*. Third World Conference on Disaster Risk Reduction, Sendai, Japan, 14-18 March 2015. https://doi.org/A/CONF.224/CRP.1

USACE. (2006a). *Coastal Engineering Manual*.

USACE. (2006b). Planning and design process. Dans *Coastal Engineering Manual* (p. 17).

Van Oudenhoven, A. P. E., Petz, K., Alkemade, R., Hein, L. et De Groot, R. S. (2012). Framework for systematic indicator selection to assess effects of land management on ecosystem services. *Ecological Indicators*, *21*, 110-122. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.01.012

Viavattene, C., Jiménez, J. A., Ferreira, O., Priest, S., Owen, D. et McCall, R. (2018). Selecting coastal hotspots to storm impacts at the regional scale: a Coastal Risk Assessment Framework. *Coastal Engineering*, *134*(September 2017), 33-47. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.09.002

Wahl, T., Haigh, I. D., Nicholls, R. J., Arns, A., Dangendorf, S., Hinkel, J. et Slangen, A. B. A. (2017). Understanding extreme sea levels for broad-scale coastal impact and adaptation analysis. *Nature Communications*, *8*(May), 1-12. https://doi.org/10.1038/ncomms16075

Wang, J. J., Jing, Y. Y., Zhang, C. F. et Zhao, J. H. (2009). Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *13*(9), 2263-2278. https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.06.021

Westmacott, S. (2001). Developing decision support systems for integrated coastal management in the tropics: Is the ICM decision-making environment too complex for the development of a useable and useful DSS? *Journal of Environmental Management*, *62*(1), 55-74. http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479701904207

ANNEXE A
PROTOCOLE DU QUESTIONNAIRE EN LIGNE

1. Introduction

Ce document consiste à présenter aux responsables du ministère des Transports et de la Mobilité durable du Québec (MTQMD) les différentes étapes de la démarche de consultation prévue dans le cadre du projet mentionné en titre. Le document contient :

- Le courriel d'invitation qui sera envoyé aux intervenants sélectionnés
- Le contenu de la consultation en ligne
    - Contexte du projet et de la consultation
    - Déroulement de la consultation
    - Description des secteurs routiers à l'étude
    - Questionnaire
        - Les informations sur les participants
        - Les questions sur les critères de sélection
        - Les questions sur les catégories de critères
- La liste des professionnels et gestionnaires invités à répondre au questionnaire

2. Courriel d'invitation

Le texte qui suit est le courriel-type qui sera envoyé aux intervenants ciblés pour participer à la consultation.

Bonjour,

Vous recevez ce courriel, car le rôle que vous jouez au sein de votre organisation a été jugé pertinent pour une analyse réalisée dans le cadre d'un projet de recherche mené à l'Université du Québec à Rimouski (UQAR). Permettez-moi de vous expliquer le contexte de cette invitation.

Mon nom est Philippe Sauvé, professionnel de recherche au Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières (LDGIZC) de l'UQAR. Je coordonne le projet de recherche « *Développement d'un outil d'identification de mesures d'adaptation pour protéger les infrastructures de transport des aléas côtiers dans un contexte de changements climatiques* (CC28.1) », dirigé par le professeur-chercheur Pascal Bernatchez de l'UQAR. Ce projet de recherche financé par le ministère des Transports et de la Mobilité durable (MTMD) consiste à développer un processus décisionnel permettant d'identifier les mesures d'adaptation aux aléas côtiers les plus adéquates pour un site donné, selon divers critères.

Parmi les nombreuses méthodes utilisées, une analyse multicritère nous permet **d'intégrer les priorités des acteurs locaux** dans l'évaluation et la sélection des mesures d'adaptation aux aléas côtiers. Cette approche aide à déterminer quelle serait la ou les solutions adéquates, parmi un ensemble de mesures d'adaptation aux aléas côtiers, sur la base d'un ensemble de

critères de sélection reflétant les multiples dimensions du milieu d'intervention et de ses enjeux. La pondération intégrée à cette analyse permet de mesurer l'importance relative de chacun des critères de sélection, au regard des enjeux et des besoins propres à un site d'intervention donné.

Aux fins du projet de recherche, quelques sites ont été sélectionnés pour valider cette approche. Plus précisément, un questionnaire qui porte sur les critères de sélection de mesures d'adaptation aux aléas côtiers pour **un secteur routier situé sur votre territoire a été développé**.

C'est pourquoi nous espérons vivement que vous accepterez de répondre à ce questionnaire, qui vous prendra **environ 15 minutes** à compléter.

Voici le lien : [hyperlien spécifique à un des cinq sites]

Une fois que vous aurez répondu au questionnaire, si vous jugez pertinent que d'autres personnes de votre organisation y répondent, nous vous invitons à nous en faire mention pour que nous puissions faire suivre le questionnaire. Je demeure disponible pour fournir des précisions additionnelles au besoin.

Merci de votre précieuse collaboration!

Philippe Sauvé, CPI, Ph. D., professionnel de recherche

3. Contenu de la consultation en ligne

Une consultation des acteurs municipaux et régionaux impliqués dans la gestion du territoire incluant les sites d'étude sera réalisée par le biais d'un questionnaire en ligne. Chacune des sous-sections suivantes représentent une page distincte de ce questionnaire.

3.1. Contexte du projet et de la consultation

Le Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières (LDGIZC) de l'Université du Québec à Rimouski (UQAR) vous invite par la présente à répondre à un questionnaire en ligne, dans le cadre du projet de recherche « *Développement d'un outil d'identification de mesures d'adaptation pour protéger les infrastructures de transport des aléas côtiers dans un contexte de changements climatiques* (CC28.1) », dirigé par le professeur-chercheur Pascal Bernatchez de l'UQAR. Ce projet est financé par le ministère des Transports et de la Mobilité durable du Québec (MTMD).

Les changements climatiques ajoutent de la pression sur les milieux côtiers. La hausse du niveau marin et la diminution du nombre de jours avec un couvert de glace côtière entraîne une augmentation de l'impact des tempêtes et, par le fait

même, les problèmes associés à l'érosion et à la submersion côtières. Plusieurs mesures d'adaptation existent afin de faire face aux enjeux associés à ces changements. Les mesures d'adaptation aux aléas côtiers incluent les ouvrages de protection côtière (enrochement, mur de protection, brise-lame, épi maritime, recharge sédimentaire, végétalisation, génie végétal, etc.) ainsi que d'autres solutions techniques, comme le rehaussement ou la relocalisation des infrastructures routières. Le défi consiste alors à identifier quelle mesure d'adaptation conviendra le mieux au site affecté par de l'érosion ou de la submersion côtières.

L'objectif principal de ce projet consiste à développer un processus décisionnel permettant d'identifier les mesures d'adaptation aux aléas côtiers les plus adéquates pour un site donné, par l'intégration et la priorisation de plusieurs types d'informations. Pour ce faire, le LDGIZC combine différentes méthodes, incluant une analyse multicritère qui permet d'intégrer les priorités des acteurs locaux dans l'évaluation et la sélection des mesures d'adaptation aux aléas côtiers.

Les analyses multicritères sont des méthodes généralement utilisées en contexte de gestion environnementale, afin d'identifier la ou les meilleures solutions parmi un ensemble de scénarios applicables. L'évaluation se base alors sur la comparaison et la pondération de « critères de sélection », un ensemble de paramètres qui reflètent les multiples dimensions du milieu d'intervention et de ses enjeux. La pondération des critères permet de mesurer l'importance de chaque critère de sélection au regard des enjeux et des besoins d'un site d'intervention donné. L'ensemble de l'analyse permet ensuite d'évaluer comment chaque scénario contribue à la réalisation des objectifs d'un projet.

Les critères de sélection inclus dans ce questionnaire ont été identifiés par les participants aux ateliers du Projet Résilience côtière tenus en 2019 (https://ldgizc.uqar.ca/Web/projets/projet-resilience-cotiere) et adaptés en fonction des besoins du MTMD associés aux projets en adaptation du réseau routier.

Votre contribution à l'élaboration de ce processus décisionnel consiste à participer à la pondération des critères visant à sélectionner de mesures d'adaptation aux aléas côtiers pour un secteur routier présent sur votre territoire. Le site d'étude qui vous sera présenté rassemble suffisamment de caractéristiques pour nous permettre de valider l'approche dans son ensemble.

Ces critères de sélection ont été classés en cinq catégories : (i) coûts du projet, (ii) contexte environnemental, (iii) Qualité de vie des résidents et récréotourisme, (iv) critères associés à la gestion de projet et (v) critères associés aux caractéristiques techniques des mesures d'adaptation aux aléas côtiers. Chaque catégorie comprend entre deux et quatre critères de sélection, pour un total de 15.

Prenez note qu'il vous faudra environ 10 minutes pour répondre à l'ensemble du questionnaire et que les réponses seront traitées globalement et ne seront pas associées aux répondants.

3.2. Déroulement de la consultation

Le questionnaire comporte 4 étapes.

1. Identification de votre organisation et de votre fonction au sein de cette organisation.
2. Description du site présent sur votre territoire faisant l'objet de l'étude.
3. Pondération des critères de sélection selon les priorités de votre organisation, dans le contexte des caractéristiques du site d'étude, pour chacune des cinq catégories. La priorisation sera effectuée au moyen de 100 jetons virtuels que vous aurez à distribuer entre les critères de chaque catégorie. Une définition des critères vous sera présentée à cette étape.
4. Priorisation des cinq catégories de critères selon les priorités de votre organisation (coûts du projet, contexte environnemental, qualité de vie et récréotourisme, critères associés à la gestion de projet et critères associés aux caractéristiques techniques des mesures d'adaptation. La priorisation sera effectuée au moyen de 100 jetons virtuels que vous aurez à distribuer entre les catégories de critères.

3.3. Description des secteurs routiers à l'étude

Ce texte ne sera pas publié en ligne et sert seulement en complément d'information pour les personnes qui valident le questionnaire.

La consultation générale est réalisée sur cinq sites d'études, dont les caractéristiques distinctives permettent de représenter les différents types d'environnement côtier présents dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent.

Deux catégories d'acteur sont consultées pour la priorisation des critères : les acteurs internes et externes au MTMD. Les acteurs internes sont les professionnels du MTMD (ingénieurs, biologistes, géomorphologues, etc.). Les acteurs externes qui seront consultés sont les gestionnaires et professionnels du territoire côtier (municipalité, MRC, comités ZIP) des cinq sites.

La consultation générale est segmentée en cinq sous-consultations indépendantes pour chacun des sites d'étude.

3.3.1. Port-Daniel (A0102)

Le secteur routier à l'étude a une longueur de 395 mètres. Il est situé sur une flèche littorale à l'embouchure de l'estuaire de la petite rivière Port-Daniel. Les sédiments sont majoritairement sableux (0,063-2 mm), le bas estran est

sableux, l'infralittoral est meuble et colonisé par un herbier de zostère semi-végétalisé et par d'autres types de végétation indifférenciée. Le site est identifié comme un site d'intérêt écologique. La baignade a été répertoriée comme activité pratiquée à proximité du site.

3.3.2. Cap-des-Rosiers (B0504)

Le secteur routier à l'étude a une longueur de 380 mètres. Il est situé au sommet d'une falaise rocheuse bordée par un estran de graviers et un infralittoral rocheux. Le bas-estran est colonisé par des algues (fucacées). Le site est principalement un secteur résidentiel dans lequel quelques infrastructures touristiques sont présentes. Les activités pratiquées sont de la relaxation et des rassemblements. Le site présente une biodiversité et une valeur socioculturelle élevée.

3.3.3. Saint-Ulric (D0202)

Le secteur routier a une longueur d'environ 2,1 km. Il est situé sur une terrasse de plage sableuse majoritairement naturelle. Trois résidences sont situées du côté mer du secteur routier. Ces résidences sont protégées par de courts enrochements ou blocs déversés. Le bas estran est principalement rocheux avec des placages de sédiments et des blocs épars colonisés par des algues (fucacées). Le côté terrestre du secteur routier est occupé par des parcelles cultivables ainsi que trois bâtiments patrimoniaux.

3.3.4. Îles-de-la-Madeleine – Baie-de-Plaisance (F0103)

Le secteur routier est situé au nord-ouest de la baie de Plaisance. Il a une longueur d'environ 4,4 km.

Au nord, le secteur routier est situé au sommet d'une falaise rocheuse de grès majoritairement artificialisée par un enrochement ou des blocs déversés. Le

haut estran alterne avec des secteurs rocheux et sableux. Des infrastructures d'hébergement touristiques sont présentes ainsi que plusieurs résidences.

Au sud, le secteur routier est situé sur un tombolo dunifié majoritairement naturel. Une portion de cette section sud est enrochée et une section est bordée par une recharge sédimentaire. En général, le bas estran est sableux et non-végétalisé, alors que l'infralittoral est meuble. La plage est utilisée comme lieu de loisir et la planche à voile est pratiquée au large. Le site présente également un intérêt écologique en raison de la présence d'espèces floristiques menacées et d'un secteur coquillier.

3.3.5. Rivière-du-Loup (G0201)

Le secteur routier longe l'estuaire du Saint-Laurent sur une longueur d'environ 2,9 km au sud de l'estuaire de la rivière du Loup. Ce secteur est situé sur un marais maritime à substrat silteux (0,004 – 0,063 mm). On y retrouve un brise-lame d'une longueur d'environ 380 m avec au centre un épi rocheux. L'étagement de l'écosystème est composé d'un marais de plantes vasculaires mixtes dans la partie supérieure et de spartine alterniflore dans la partie

inférieure, puis, d'une large batture sablo-vaseuse (slikke) et d'un infralittoral à macroalgues.

Le site présente un intérêt écologique avec une aire de concentration d'oiseaux aquatiques, un secteur coquillier. L'anguille y est pêchée commercialement. Le côté terrestre du secteur routier est occupé par des parcelles agricoles cultivables ainsi que des infrastructures de purifications des eaux usées (étangs aérés, rejet d'égouts, régulateurs, etc.). Le quai et la marina de Rivière-du-Loup sont présents sur la rive nord de la rivière du Loup. Plusieurs activités sont situées à proximité : pêche récréative, observation de la faune et de la flore, aire de pique-nique, planche à voile, plage, facilités pour petites embarcations, restauration, etc.

3.4. Consultation

3.4.1. Information sur les participants

Le questionnaire débute par deux questions qui visent à identifier l'organisation et la fonction du participant. Un choix de réponse ouvert est proposé au participant pour la fonction.

Tableau 47. Choix de réponse ouvert proposés aux participants pour identifier leur fonction exercer au sein de leur organisation

Administrateur.trice	Directeur.trice régional.e	Employé.e - Services incendies
Agent.e de développement	Directeur.trice adjoint.e	Employé.e - Travaux publics
Aménagiste	Directeur.trice - Aménagement/urbanisme	Géographe
Analyste en environnement	Directeur.trice - Environnement	Géomaticien.ne
Biologiste	Directeur.trice - Ingénierie	Géomorphologue
Coordonateur.trice - Environnement	Directeur.trice - Sécurité civile	Gestionnaire - Urbanisme
Chargé.e de projet	Directeur.trice - Services techniques	Ingénieur.e
Conseiller.ère	Directeur.trice - Travaux publics	Inspecteur.trice
Directeur.trice général.e	Directeur.trice - Urbanisme	Autre

3.4.2. Questions sur les critères de sélection

Pour la catégorie de critère « **Coûts du projet** », sur un total de 100 jetons virtuels à distribuer entre deux critères, combien de jetons accordez-vous à chaque critère à considérer afin de sélectionner une mesure d'adaptation aux aléas côtiers?

Coût de construction

Coût d'aménagement initial estimé de la mesure d'adaptation, normalisé par sa durée de vie estimée. L'évaluation de ce critère se base sur les points suivants :

- Coûts de planification et de conception;
- Coûts d'acquisition immobilière (terrains et bâtiments);
- Coûts de réaménagement de l'ensemble du site (démantèlement d'une structure existante, etc.);
- Coûts de construction (main-d'œuvre, matériaux, équipements, etc.);
- Coûts de compensation (étude, réalisation et suivi).

Coût d'entretien et de suivi

Coût d'entretien et de suivi estimé de la mesure d'adaptation. Ces coûts correspondent aux coûts nécessaires pour suivre l'état et maintenir un rendement optimal de la mesure d'adaptation. L'évaluation de ce critère se base sur les points suivants :

- Résistance de la mesure d'adaptation face à l'agressivité du site en lien avec les conditions météo-marine, en tenant compte du positionnement de la mesure d'adaptation sur le profil (haut de plage, estran, infralittoral, etc.);
- Coûts de la main-d'œuvre (personnel qualifié, étudiant, etc.);
- Coûts des matériaux;
- Coûts des équipements (machinerie, instruments de mesure, etc.).

Pour la catégorie de critère « **Contexte environnemental** », sur un total de 100 jetons virtuels à distribuer entre trois critères, combien de jetons accordez-vous à chaque critère à considérer afin de sélectionner une mesure d'adaptation aux aléas côtiers?

Effets sur les processus côtiers

Effets anticipés des mesures d'adaptation sur la dynamique géomorphologique, soit le déplacement de la côte en réponse aux apports sédimentaires et aux régimes de perturbation ainsi que sur l'hydrodynamisme, soit l'ensemble des événements impliqués dans le mouvement de l'eau (courants, vagues, eaux souterraines, marées). L'évaluation des effets anticipés est réalisée à l'échelle de la cellule hydrosédimentaire et des cellules adjacentes. L'évaluation de ce critère se base sur les points suivants :

- Effets géomorphologiques (bilan sédimentaire, déplacement du trait de côte, profil, transport sédimentaire, etc.)
- Effets hydrodynamiques (caractéristiques des vagues, des courants et des composantes du niveau d'eau)

Effets sur les milieux naturels et les espèces d'intérêt

Effets anticipés des mesures d'adaptation sur les milieux naturels d'intérêt, soit des milieux naturels reconnus pour leur rôle écologique majeur ou des milieux naturels concentrant une faune et flore d'importance ainsi que sur les espèces d'intérêt, soit les espèces jouant un rôle clé pour le fonctionnement de l'écosystème ou de l'économie. L'évaluation de ce critère se base sur les points suivants, afin de savoir si les travaux auront lieu à proximité ou impacteront des :

- Milieux humides, marais et zostérais;
- Aires protégées (fédérales, provinciales, municipales et aires protégées par une chartre d'organisme privé, par des institutions ou par des individus en vertu du statut de réserve naturelle reconnue en terres privées);
- Frayères;
- Espèces d'intérêt commercial ou à statut particulier;
- Espèces répertoriées dans le centre de données sur le patrimoine naturel du Québec (CDPNQ) faune et flore).

Empiétement

Surface d'empiétement de la mesure d'adaptation qui requière de la compensation. Ce critère permet de prendre en compte les effets directs de la mesure d'adaptation.

Pour la catégorie de critère « **Qualité de vie des citoyens et récréotourisme** », sur un total de 100 jetons virtuels à distribuer entre quatre critères, combien de jetons accordez-vous à chaque critère à considérer afin de sélectionner une mesure d'adaptation aux aléas côtiers?

Acquisition immobilière (terrains)
Nécessité d'acquérir des terrains privés n'entraînant pas de déplacements de personnes, afin de mettre en place la mesure d'adaptation.

Acquisition immobilière (bâtiments)
Nécessité d'acquérir des bâtiments privés entraînant des déplacements de personnes, afin de mettre en place la mesure d'adaptation.

Accessibilité aux infrastructures et activités récréotouristiques
Effets anticipés des mesures d'adaptation sur l'accessibilité aux infrastructures et les activités récréotouristiques. L'évaluation de ce critère se base sur les points suivants :

- Accès au littoral;
- Accès aux zones de pêche;
- Accès aux observatoires de la faune et de la flore;
- Accès aux activités nautiques;
- Accès aux sites historiques ou sites d'intérêt archéologique ou patrimonial.

Préservation des paysages et esthétismes des mesures d'adaptation
Effets anticipés des mesures d'adaptation sur le paysage en général. L'évaluation de ce critère se base sur les points suivants :

- Impacts visuels;
- Modifications de l'aspect de la plage ou du milieu côtier;
- Intégration de la mesure d'adaptation dans le milieu récepteur (agencement des matériaux avec les composantes de l'environnement naturel);
- Dans les cas où la mesure d'adaptation est un OPC, consulter également les résultats de l'algorithme.

Pour la catégorie de critère « **Gestion du projet** », sur un total de 100 jetons virtuels à distribuer entre deux critères, combien de jetons accordez-vous à chaque critère à considérer afin de sélectionner une mesure d'adaptation aux aléas côtiers?

Capacité de réalisation (Phases de préparation)
Complexité associée à la réalisation de la phase préparatoire (soit l'étude d'opportunité, la conception et les plans et devis) du projet d'implantation de la mesure d'adaptation. L'évaluation de ce critère se base sur les points suivants, à l'échelle provinciale :

- Délais de réalisation des études, de la conception et des plans et devis
- Disponibilité de l'expertise lors des différentes phases de préparation
- Disponibilité de la main-d'œuvre lors des différentes phases de préparation

Faisabilité technique (Étapes de mise en œuvre)

Complexité technique associée à la réalisation de la phase mise en œuvre (construction - travaux) de la mesure d'adaptation. Celle-ci est fonction des contraintes spécifiques de la mesure d'adaptation et des particularités du site d'implantation. L'évaluation de ce critère se base sur les points suivants :

- Accessibilité au site;
- Type de mesure d'adaptation retenue;
- Disponibilité de la main-d'œuvre (chantier, surveillance, etc.);
- Disponibilité des matériaux;
- Disponibilité des équipements (machinerie, instruments de mesure, etc.);
- Besoin de modifier ou déplacer des structures existantes.

Pour la catégorie de critère « **Caractéristiques techniques des mesures d'adaptation** », sur un total de 100 jetons virtuels à distribuer entre quatre critères, combien de jetons accordez-vous à chaque critère à considérer afin de sélectionner une mesure d'adaptation aux aléas côtiers?

Inspections et entretien

Fréquence des inspections et entretiens nécessaires afin de garantir l'intégrité structurelle et l'efficacité de la mesure d'adaptation.

Adaptabilité

Facilité à modifier la mesure d'adaptation en fonction de l'évolution des conditions environnementales, afin de garantir son efficacité dans un contexte de changements climatiques. L'évaluation de ce critère se base sur les points suivants :

- Nécessité d'intervenir pour adapter la mesure d'adaptation;
- Difficulté de l'intervention;
- Disponibilité des matériaux.

Efficacité face à l'érosion

Capacité de la mesure d'adaptation à être fiable dans un contexte d'érosion côtière. L'évaluation de ce critère se base sur les points suivants :

- Capacité de la mesure d'adaptation à arrêter le recul du trait de côte lorsque la marge de recul est encore suffisante;
- Capacité de la mesure d'adaptation à assurer le maintien d'un réseau routier fonctionnel ainsi que la sécurité des usagers lorsque la route est en première ligne.

Efficacité face à la submersion

Capacité de la mesure d'adaptation à être fiable dans un contexte de submersion marine. L'évaluation de ce critère se base sur les points suivants :

- Capacité de la mesure d'adaptation à permettre un maintien des temps de transport de la marchandise;
- Capacité de la mesure d'adaptation à permettre un maintien de l'accessibilité aux services d'urgences;
- Capacité de la mesure d'adaptation à éviter la fermeture temporaire de la route durant les épisodes de tempêtes.

3.4.3. Questions sur les catégories de critères

Après avoir attribué des points aux critères de sélection de chacune des 5 catégories, nous vous invitons maintenant à attribuer des jetons virtuels aux catégories elles-mêmes.
Sur un total de 100 jetons virtuel, combien de jetons accordez-vous à chaque catégorie de critère de sélection d'une mesure d'adaptation aux aléas côtiers?
Coûts du projet : Coût de construction, Coûts d'entretien et de suivi.
Contexte environnemental : Effets sur les processus côtiers, Effets sur les milieux naturels et les espèces d'intérêt, Empiétement.
Qualité de vie et récréotourisme : Acquisition immobilière (terrains), Acquisition immobilière (bâtiments), Accessibilité aux infrastructures et activités récréotouristiques, Préservation des paysages et esthétismes des mesures d'adaptation.
Gestion de projet : Capacité de réalisation (Phases de préparation), Faisabilité technique (Étapes de mise en œuvre).
Caractéristiques techniques des mesures d'adaptation : Inspections et entretien, Adaptabilité, Efficacité face à l'érosion, Efficacité face à la submersion.

ANNEXE B
Liste des critères de sélection (version finale proposée)

Tableau 48. Liste finale des critères de sélection incluant les catégories, les énoncés et les définitions).

Coûts du projet
1. Coûts de construction Coût d'aménagement initial estimé de la mesure d'adaptation, normalisé par sa durée de vie estimée. L'évaluation de ce critère est basée sur les points suivants : • Coûts de planification et de conception; • Coûts d'acquisition immobilière (terrains et bâtiments); • Coûts de réaménagement de l'ensemble du site (démantèlement d'une structure existante, etc.); • Coûts de construction (main-d'œuvre, matériaux, équipements, etc.); • Coûts de compensation (étude, réalisation et suivi).
2. Coûts d'entretien et de suivi Coût d'entretien et de suivi estimé de la mesure d'adaptation. Ces coûts correspondent aux coûts nécessaires pour suivre l'état et maintenir un rendement optimal de la mesure d'adaptation. L'évaluation de ce critère est basée sur les points suivants : • Résistance de la mesure d'adaptation face à l'agressivité du site en lien avec les conditions météo-marine, en tenant compte du positionnement de la mesure d'adaptation sur le profil (haut de plage, estran, infralittoral, etc.); • Coûts de la main-d'œuvre (personnel qualifié, étudiant, etc.); • Coûts des matériaux; • Coûts des équipements (machinerie, instruments de mesure, etc.).
Contexte environnemental
3. Effets sur les processus côtiers Effets anticipés des mesures d'adaptation sur la dynamique géomorphologique, soit le déplacement de la côte en réponse aux apports sédimentaires et aux régimes de perturbation ainsi que sur l'hydrodynamisme, soit l'ensemble des événements impliqués dans le mouvement de l'eau (courants, vagues, eaux souterraines, marées). L'évaluation des effets anticipés est réalisée à l'échelle de la cellule hydrosédimentaire et des cellules adjacentes. L'évaluation de ce critère est basée sur les points suivants : • Effets géomorphologiques (bilan sédimentaire, déplacement du trait de côte, profil côtier, transport sédimentaire, etc.) • Effets hydrodynamiques (caractéristiques des vagues et des courants ainsi que composantes locales du niveau d'eau total)
4. Effets sur les milieux naturels et les espèces d'intérêt Effets anticipés des mesures d'adaptation sur les milieux naturels d'intérêt, soit des milieux naturels reconnus pour leur rôle écologique majeur ou des milieux naturels concentrant une faune et flore d'importance ainsi que sur les espèces d'intérêt, soit les espèces jouant un rôle clé pour le fonctionnement de l'écosystème ou de l'économie. L'évaluation de ce critère est basée sur les points suivants, afin de savoir si les travaux auront lieu à proximité ou auront des :

- Effets sur les écosystèmes (milieux humides, marais et zostérais; aires protégées [fédérales, provinciales, municipales et aires protégées par une chartre d'organisme privé, par des institutions ou par des individus en vertu du statut de réserve naturelle reconnue en terres privées]; Frayères)
- Effets sur les espèces (espèces d'intérêt commercial ou à statut particulier; espèces répertoriées dans le centre de données sur le patrimoine naturel du Québec (CDPNQ) faune et flore).

Tableau 47 (suite). Liste finale des critères de sélection incluant les catégories, les énoncés et les définitions)

Qualité de vie des citoyens et récréotourisme

5. Effets sur les activités locales

Effets anticipés des mesures d'adaptation sur l'accessibilité aux infrastructures ainsi que sur les activités récréotouristiques et économiques. L'évaluation de ce critère est basée sur les points suivants :

- Effet sur l'accès au littoral, aux zones de pêche; aux observatoires de la faune et de la flore; aux activités nautiques; aux sites historiques ou sites d'intérêt archéologique ou patrimonial; etc.;
- Effets sur les activités récréotouristiques;
- Effets sur les activités économiques.

6. Préservation des paysages et esthétismes des mesures d'adaptation

Effets anticipés des mesures d'adaptation sur le paysage en général. L'évaluation de ce critère est basée sur les points suivants :

- Impacts visuels;
- Modifications de l'aspect de la plage ou du milieu côtier;
- Intégration de la mesure d'adaptation dans le milieu récepteur (agencement des matériaux avec les composantes de l'environnement naturel);

Expertise pour la réalisation des différentes étapes du projet

7. Expertise pour la préparation du projet

Complexité et temps nécessaire pour l'exécution des phases préparatoires du projet afin qu'il chemine jusqu'à l'étape de mise en œuvre de la mesure d'adaptation. Cela inclut, sans s'y limiter, les éléments de l'étude des besoins, de l'étude des solutions, de l'étude d'opportunité, de l'avant-projet préliminaire, de l'avant-projet définitif ainsi que les plans et devis préliminaires et définitifs. L'évaluation de ce critère est basée sur les points suivants, à l'échelle provinciale :

- Complexité et temps de réalisation des études, des rencontres publiques, des acquisitions immobilières (terrains et/ou bâtiments), de la conception, des plans et devis, de l'obtention des autorisations ministérielles, etc.;
- Disponibilité de l'expertise lors des différentes phases de préparation basée sur les expériences antérieures;
- Disponibilité de la main-d'œuvre lors des différentes phases de préparation.

8. Expertise pour la mise en œuvre du projet

Complexité technique associée à la réalisation de la phase de mise en œuvre de la mesure d'adaptation. Celle-ci est fonction des contraintes spécifiques de

la mesure d'adaptation et des particularités du site d'implantation. L'évaluation de ce critère est basée sur les points suivants :

- Accessibilité au site;
- Type de mesure d'adaptation retenue;
- Disponibilité de la main-d'œuvre (chantier, surveillance, etc.);
- Disponibilité des équipements (machinerie, instruments de mesure, etc.);
- Besoin de modifier ou déplacer des structures existantes.

Tableau 47 (suite). Liste finale des critères de sélection incluant les catégories, les énoncés et les définitions)

9. Expertise pour les suivis, les inspections et l'entretien Complexité et fréquence des entretiens et disponibilité de l'expertise pour la réalisation des étapes de suivi des effets, d'inspection et d'entretien de la mesure d'adaptation. L'évaluation de ce critère est basée sur les points suivants : • Fréquence des visites; • Niveau d'expertise nécessaire pour l'acquisition et le traitement des données; • Équipement nécessaire pour l'acquisition et le traitement des données.
Caractéristiques techniques des mesures d'adaptation
10. Adaptabilité Facilité à modifier la mesure d'adaptation en fonction de l'évolution des conditions environnementales, afin de garantir son efficacité dans un contexte de changements climatiques. L'évaluation de ce critère est basée sur les points suivants : • Nécessité d'intervenir pour adapter la mesure d'adaptation; • Difficulté de l'intervention; • Disponibilité des matériaux.
11. Certitude de l'efficacité face aux aléas côtiers Niveau de certitude de l'efficacité de la mesure d'adaptation face aux aléas côtiers. L'évaluation de ce critère est basée sur les points suivants : • Capacité de la mesure d'adaptation à être fiable dans un contexte de submersion marine (maintien des temps de transport de la marchandise, de l'accessibilité aux services d'urgences et à éviter la fermeture temporaire de la route durant les épisodes de tempêtes); • Capacité de la mesure d'adaptation à être fiable dans un contexte d'érosion côtière (arrêt du recul du trait de côte lorsque la marge de recul est encore suffisante, maintien d'un réseau routier fonctionnel et de la sécurité des usagers lorsque la route est en première ligne).

ANNEXE C
Tableaux de caractérisation des environnements côtiers

Tableau 49. Classification des côtes (Catégorie**, sous-catégorie, type, *sous-type*)**

Classes
1. Côte meuble
1.1. Côte basse meuble
1.1.1.Cordon littoral
1.1.1.1. Cordon littoral
1.1.1.2. Tombolo
1.1.1.3. Tombolo (base rocheuse)
1.1.1.4. Tombolo/cordon littoral
1.1.2.Flèche littorale
1.1.2.1. Flèche littorale
1.1.2.2. Flèche littorale (côté intérieur)
1.1.3.Île barrière
1.1.3.1. *Île barrière*
1.1.4.Terrasse de plage
1.1.4.1. Terrasse de plage
1.1.4.2. Terrasse de plage (base rocheuse)
1.1.4.3. Terrasse fluviale
1.1.4.4. Terrasse fluviale (base rocheuse)
1.2. Côte dunaire
1.2.1.Côte dunaire
1.2.1.1. *Dunaire*
1.3. Falaise meuble
1.3.1.Falaise meuble
1.3.1.1. Falaise meuble
1.3.1.2. Falaise meuble (base rocheuse)
1.3.1.3. Meuble sans falaise
1.3.1.4. Remblai
1.4. Marais maritime
1.4.1.Marais maritime
1.4.1.1. *Marais maritime*
2. Côte rocheuse
2.1. Côte rocheuse
2.1.1.Rocheuse sans falaise
2.1.1.1. *Rocheuse sans falaise*
2.1.2.Versant rocheux
2.1.2.1. *Versant rocheux*
2.2. Falaise rocheuse
2.2.1.Falaise rocheuse

2.2.1.1. Falaise rocheuse

2.2.1.2. Falaise rocheuse (sommet meuble)

3. Autre

3.1.1.1. Îlot

3.1.1.2. Exutoire d'un cours d'eau

3.1.1.3. Tourbière

3.1.1.4. Banc d'accumulation

3.1.1.5. Chenal de marée

3.1.1.6. Zone portuaire

3.1.1.7. NA

3.1.1.8. ND

Tableau 50. Classification des sédiments

Classes	Diamètre
Argile	0,001 - 0,004 mm
Silt	0,004 - 0,063 mm
Sable	0,063 - 2 mm
Gravier	2 - 64 mm
Galet	64 - 256 mm
Bloc	> 256 mm
NA	-
NSP	-

Tableau 51. Classification du marnage

Classes	Niveau d'eau
Sans marée	0 m
Microtidal	< 2 m
Mesotidal	2 - 4 m
Macrotidal	4 - 6 m
Mégatidal	> 6 m
NA	-
NSP	-

Tableau 52. Classification de l'énergie des vagues

Classes	Hauteur
Faible	Hs < 1,0 m
Modérée	1,0 < Hs < 2,0 m
Élevée	Hs > 2,0 m
NA	-
NSP	-

ANNEXE D
Liens entre les fonctions écologiques, les services écologiques et les types d'effet observé

			Superficie de côte	Dynamique des vagues	Caractéristiques des courants	Captation du carbone	Matière en suspension	circulation eau	Couverture végétale	Biocénose	Zone d'alimentation	Zone de repos	Zone de reproduction	Pouponnière
Services écologiques	Habitat et support	Zone de frai du capelan	x										x	
		Aire d'alimentation	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		Aire de nidification	x						x		x	x	x	x
		Aire de repos	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x
		Zone d'élevage	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x
		Espèces animales menacées	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x
		Espèces de plante menacées	x	x	x	x	x	x	x	x				
		Habitat	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		Héronière								x	x			
		Concentration d'oiseaux aquatiques		x	x		x	x	x	x	x	x	x	x
		Colonie d'oiseaux sur falaise							x	x	x	x	x	x
		Colonie d'oiseaux sur île							x	x	x	x	x	x
	Régulation et	Purification de l'eau				x	x	x	x	x				
		Régulation du climat				x			x	x				
		Protection côtière	x	x	x				x					
		Maintenance du cycle de vie	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Approvisionnement	Pêche au capelan (récréatif)	x						x				x	
		Pêche à la morue		x	x		x	x		x	x			
		Pêche à la truite de mer		x	x		x	x		x	x			
		Pêche à l'éperlan		x	x		x	x		x	x			x
		Pêche au maquereau		x	x		x	x		x	x			
		Pêche au saumon		x	x		x	x		x	x			
		Pêche au sébaste												
		Pêche aux moules					x		x	x	x			
		Pêche aux palourdes	x						x	x	x			
		Chasse (indéterminé)	x						x	x	x	x		
		Chasse récréative au phoque	x						x	x	x	x		
		Chasse à la bernache	x						x	x	x	x		
		Chasse au chevreuil	x						x	x				
		Chasse à la sauvagine (indéterminé)	x						x	x	x	x		
		Cueillette récréative de petits fruits	x						x	x				
		Cueillette récréative d'algues (indéterminé)		x	x	x			x	x				
		Pêche commerciale au buccin								x				
		Cueillette de plantes	x		x	x			x	x				
		Collecte de roches ou de pierres semi-précieuses	x	x	x									
		Collecte de coquillages	x	x	x									

Services écologiques	Culturel	Sports aquatiques	x	x	x		x	x						
		Baignade	x	x	x		x	x						
		Plongée sous-marine et plongée en apnée					x	x						
		Croisière ou excursion												
		Loisirs	x	x	x		x	x						
		Randonnée	x											
		Raquette	x											
		Escalade												
		Activité de plage	x	x	x		x	x						
		Vélo à pneus surdimensionnés	x											
		Ski de fond	x											
		Activité motorisée	x											
		Motoneige	x											
		Site à haute valeur socio-culturelle	x											
		Lieu de loisir	x											
		Feux de grève	x											
		Camping	x											
		Observation de la faune (indéterminé)	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x
		Observation d'oiseaux (indéterminé)	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x
		Observation de balbuzards	x				x	x	x	x	x			
		Observation de phoques	x	x	x					x	x	x		
		Observation de plante	x		x	x			x	x				
		Observation du panorama	x				x		x	x	x	x	x	x
		Observation d'épave	x							x	x	x	x	x
		Site archéologique	x											
		Recherche et éducation	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		Site patrimonial	x											
		Préparation de la banique	x											

Effets observés	Biocénose	Autres								x	x	x	x	x
		Biocénose qualitative							x	x	x	x	x	x
		Biocénose quantitative							x	x	x	x	x	x
	Biotope	Modification physico-chimique				x			x	x	x	x	x	x
		Modification structurelle				x			x	x	x	x	x	x
		Mouvement de la ressource							x	x	x	x	x	x
		Quantité et qualité de la ressource							x	x	x	x	x	x
	Processus biologiques	Fonction de croissance				x			x	x				x
		Fonction de locomotion							x	x	x	x	x	x
		Fonction de nutrition								x	x			
		Fonction de reproduction								x		x		x
		Fonction de respiration								x		x		x
	Érosion/Accumulation	Accumulation sédimentaire	x			x			x	x	x		x	
		Affouillement	x				x							
		Bilan sédimentaire	x			x	x		x	x	x		x	
		Déplacement du trait de côte	x					x		x				
		Effet de bout	x				x			x				
		Érosion	x			x	x		x	x	x		x	
		Hauteur de plage	x			x	x		x	x	x		x	
		Largeur de plage	x			x	x		x	x	x		x	
		Rétablissement géomorphologique	x							x				
		Rétention sédimentaire	x			x	x		x	x	x		x	
	Profil topobathymétriq	Profil de plage	x	x	x	x		x	x	x		x	x	
		Système de barres	x	x	x									
		Topographie	x	x				x						
		Variation bathymétrique généralisée	x	x	x	x			x	x		x	x	
		Variation bathymétrique localisée	x							x				
	Sédiments	Compaction sédimentaire				x			x	x	x		x	
		Mise en suspension				x	x			x	x	x	x	x
		Redistribution granulométrique				x			x	x	x		x	
		Taille granulométrique		x		x	x		x	x	x		x	
	Transport	Transport longitudinal	x			x	x		x	x	x		x	
		Transport sédimentaire général	x			x	x		x	x	x		x	
		Transport transversal	x			x	x		x	x	x		x	
	Vagues	Angle des vagues	x	x	x		x	x		x	x	x	x	x
		Régime de vagues	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x
	Courant	Circulation	x		x		x	x	x	x	x	x	x	x
		Courant d'arrachement	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		Courant de marée	x		x		x	x	x	x	x	x	x	x
		Courant transversaux	x		x		x	x		x	x	x	x	x
		Dérive littorale	x		x		x	x		x	x	x	x	x
	Eaux souterraine	Épaisseur de la zone non saturée	x				x							
		Infiltration/Percolation	x				x			x				
		Niveau de la nappe	x				x		x	x	x	x	x	x
		Zone de résurgences (seepage face)	x				x		x	x	x	x	x	x

Effets observés	Jet de rive	Backswash/Swash	x	x	x		x		x	x	x	x	x	x
		Franchissement	x	x	x		x		x	x	x	x	x	x
		Run-up	x	x	x		x		x	x	x	x	x	x
	Processus dissipation	Déferlement		x	x		x	x		x	x	x	x	x
		Diffraction		x	x		x	x						
		Énergie des vagues	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		Hauteur de vagues		x	x	x	x	x	x		x	x	x	
		Réflexion		x	x		x	x	x					
		Réfraction		x	x		x	x	x					
		Transmission		x			x	x						
	Pratiqu	Loisirs aquatiques côtiers					x		x	x	x	x	x	x
		Loisirs terrestres							x					
	Qualit	Esthétisme												
		Qualité de vie												