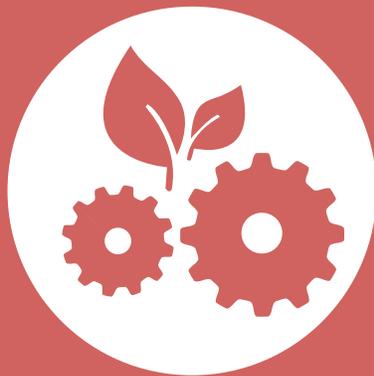


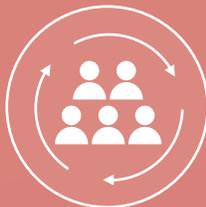


Solutions fondées sur la nature pour réduire les risques d'inondation côtière



Adaptation des infrastructures existantes

Série de documents d'orientation :



Avantages
connexes



Suivi
de l'efficacité



Suivi de l'efficacité :
méthodes et indicateurs
proposés

Citer comme suit :

CCE. 2025. *Adaptation des infrastructures existantes — Solutions fondées sur la nature pour réduire les risques d'inondation côtière*. Montréal, Canada. Commission de coopération environnementale. *Xi* + 96 pages.

La présente publication a été rédigée par DHI Water and Environment Inc. pour le Secrétariat de la Commission de coopération environnementale. La responsabilité de l'information que contient ce document incombe aux auteurs et cette information ne reflète pas nécessairement les vues des gouvernements du Canada, du Mexique ou des États-Unis.

Le présent document peut être reproduit en tout ou en partie sans le consentement préalable du Secrétariat de la CCE, à condition que ce soit à des fins éducatives et non lucratives et que la source soit mentionnée. La CCE souhaiterait néanmoins recevoir un exemplaire de toute publication ou de tout écrit dont le présent document a servi de source.

Sauf indication contraire, le contenu de cette publication est protégé en vertu d'une licence Creative Commons Paternité – Pas d'utilisation commerciale – Pas de modification.



© Commission de coopération environnementale, 2025

ISBN : 978-2-89700-364-7

Available in English – ISBN : 978-2-89700-363-0

Disponible en español – ISBN : 978-2-89700-365-4

Dépôt légal – *Bibliothèque et Archives nationales du Québec*, 2025

Dépôt légal – *Bibliothèque et Archives Canada*, 2025

Renseignements sur la publication

Type de publication : document de projet

Date de parution : juin 2025

Langue d'origine : anglais

Processus d'examen et d'assurance de la qualité :

Ultime examen par les Parties : mars 2025

AQ386

Projet : Plan opérationnel pour 2021/Solutions fondées sur la nature pour lutter contre les inondations dans les villes côtières

Renseignements complémentaires :

Commission de coopération environnementale

1001, boulevard Robert-Bourassa, bureau 1620

Montréal (Québec) H3B 4L4

Canada

Tél. : 514 350-4300 Téléc. : 438 701-1434

info@cec.org/www.cec.org

Table des matières

Résumé.....	vi
Sommaire.....	vi
Préface	x
Remerciements	xi
1 Introduction.....	1
1.1 Objectifs et portée.....	2
1.2 Valeur de l'adaptation.....	3
1.3 Adaptation : lacunes dans les données et obstacles.....	4
1.4 Lectures complémentaires	7
2 Options d'adaptation au moyen des SFN.....	8
2.1 Échelle des SFN.....	8
2.2 Stratégies de gestion des risques des aléas côtiers	8
2.3 Intention derrière l'adaptation	10
2.4 Aperçu des options d'adaptation.....	11
2.5 Plages et dunes.....	13
2.5.1 Recharge en sable	14
2.5.2 Dunes.....	18
2.6 Zones humides.....	20
2.6.1 Marais et estrans.....	21
2.6.2 Mangroves	23
2.7 Îles.....	25
2.8 Végétation terrestre	29
2.9 Éléments submergés.....	31
2.10 Éléments hybrides.....	35
2.11 Comparaison des coûts des éléments SFN	39
<i>Plages et dunes</i>	42
<i>Zones humides</i>	42
<i>Îles</i>	43
<i>Végétation terrestre</i>	43
<i>Éléments submergés</i>	43
<i>Éléments hybrides</i>	44
3 Adaptation : cadrage des possibilités et des options.....	46
3.1 Étapes d'un projet de mise en œuvre des SFN	46
3.2 Détermination des possibilités d'adaptation.....	47
3.2.1 <i>Étape 1.1 : Dresser l'inventaire des actifs de GRI existants</i>	47

3.2.2	<i>Étape 1.2 : Définir une stratégie de mobilisation</i>	48
3.2.3	<i>Étape 1.3 : Évaluer les besoins et la stratégie en matière de GRI</i>	48
3.2.4	<i>Étape 1.4 : Évaluer le caractère adéquat du site et des actifs pour les SFN.</i>	50
3.2.5	<i>Étape 1.5 : Prioriser les possibilités</i>	52
3.3	Évaluation des options d'adaptation	52
3.3.1	<i>Étape 2.1 Déterminer les options et avantages connexes en matière de GRI</i>	53
3.3.2	<i>Étape 2.2 Évaluer les avantages connexes</i>	54
3.3.3	<i>Étape 2.3 Comparer les avantages connexes des options de GRI</i>	54
4	Adaptation : considérations administratives	56
4.1	Cadrage	56
4.2	Rôles et responsabilités	56
4.3	Communications et mobilisation	60
4.4	Financement	61
4.5	Règlements	64
4.6	Moment d'exécution	65
5	Adaptation : considérations techniques	67
5.1	Considérations d'ingénierie	67
5.2	Considérations environnementales	68
5.3	Considérations sociales	70
5.4	Considérations économiques	72
5.5	Considérations relatives au suivi et à la gestion adaptative	74
6	Incitations à l'adaptation au moyen des SFN	77
6.1	Incitations inhérentes	77
6.2	Incitations gouvernementales	77
6.2.1	<i>Incitations réglementaires</i>	78
6.2.2	<i>Incitations financières</i>	78
6.3	Incitations d'ONG et d'organisations communautaires	79
6.4	Incitations du secteur privé	79
7	Possibilités et orientations futures	81
8	Conclusions	84
	Bibliographie	85

Liste des figures

Figure 1. Stratégies de gestion côtière (protection et retrait) sur l'ensemble du spectre des SFN	9
Figure 2. Résumé des avantages en matière de gestion des risques d'inondation de chaque option d'adaptation	12
Figure 3. Recharge d'une plage pour réduire l'érosion	15
Figure 4. Imagerie par satellite de la plage en 2009 avant la recharge (à gauche), et 10 ans plus tard en 2020 (à droite), après la fin des travaux de recharge	17
Figure 5. Établissement d'une dune pour mieux protéger contre les inondations.....	18
Figure 6. Projet de plage et de dune achevé à South Cape May Meadows.....	19
Figure 7. Marais restauré dans la baie de Tillamook.....	22
Figure 8. Restauration d'un marais pour mieux protéger contre les inondations.....	23
Figure 9. Plantation d'une mangrove pour mieux protéger contre les inondations.....	24
Figure 10. Chenal artificiel dans le système de mangrove restauré	25
Figure 11. Structure insulaire pour protéger contre les inondations et réduire l'érosion...26	
Figure 12. Site 1 du projet (cinq îles marécageuses) et site 2 (trois îles, dont deux sont touchées par l'érosion)	28
Figure 13. Recours à la végétation terrestre pour protéger contre les inondations et réduire l'érosion.....	30
Figure 14. Structure de récif corallien pour protéger contre les inondations et réduire l'érosion.....	31
Figure 15. Assemblages de coquilles d'huîtres du Pacifique dans la baie de San Francisco	34
Figure 16. Éléments hybrides, soit un marais aménagé devant un système de digue existant	35
Figure 17. L'estuaire nouvellement aménagé derrière la flèche littorale (été 2022).....	37
Figure 18. Photos du littoral après la tempête du 7 janvier 2022 : à gauche, le long de l'estuaire du ruisseau restauré; à droite, le long d'une partie adjacente du littoral, où le mur de protection a cédé	37
Figure 19. Coûts relatifs des étapes de mise en œuvre de projets selon différents types de SFN	41
Figure 20. Cadre conceptuel pour réaliser un projet axé sur les SFN	46
Figure 21. Cadre conceptuel pour déterminer les possibilités et options d'adaptation	47
Figure 22. Cadre conceptuel pour déterminer les possibilités d'adaptation au moyen des SFN	47
Figure 23. La vulnérabilité est une combinaison de l'exposition à un aléa côtier, de la capacité d'adaptation et de la sensibilité des zones protégées contre cet aléa ...	50
Figure 24. Cadre conceptuel pour évaluer les options de GRI.....	53
Figure 25. Illustration conceptuelle des conditions existantes (à gauche) et de la conception future (à droite) d'une digue vivante potentielle	59
Figure 26. Modèle conceptuel des données de suivi de l'élévation d'un marais qui éclairent la gestion adaptative.....	75

Résumé

L'Amérique du Nord compte un vaste portefeuille d'infrastructures côtières pour assurer la gestion des risques d'inondation (GRI). Or, une grande partie de ces infrastructures atteignent la fin de leur vie utile, ou l'a déjà dépassée. De plus, elles n'ont pas été conçues en fonction des effets des changements climatiques ni construites selon une compréhension globale de leurs incidences sociales, culturelles et environnementales plus larges. L'adaptation des infrastructures existantes au moyen de solutions fondées sur la nature (SFN) présente l'occasion d'améliorer la performance ou l'intégrité des systèmes de GRI tout en offrant de nombreux autres avantages connexes de nature sociale, économique et environnementale.

Le présent document soutient l'adoption des SFN dans les collectivités côtières du Canada, du Mexique et des États-Unis en fournissant aux personnes prenant des décisions de l'information pratique et des orientations relatives à l'adaptation des infrastructures GRI existantes au moyen des SFN. Différents types de SFN sont résumés et comparés afin de faciliter la consultation, quoique des conditions différentes dans les trois pays puissent déterminer la faisabilité de rénovations ou le type de SFN utilisé. L'étude brosse un cadre conceptuel pour le cadrage (c.-à-d. la détermination et l'évaluation) des possibilités et des options d'adaptation. Elle examine les considérations administratives (cadrage, rôles et responsabilités, communications et mobilisation, financement, réglementation et moment d'exécution) et techniques (environnementales, sociales et économiques; ingénierie, ainsi que le suivi et la gestion adaptative). Elle décrit les incitations à adapter, et comme point clé à retenir, dresse une liste de moyens possibles pour combler les lacunes et écarter les obstacles à l'adaptation. Enfin, des études de cas sont présentées tout au long du présent document en guise d'exemples concrets et pour mettre en évidence les concepts clés.

Sommaire

De nombreuses collectivités côtières au Canada, au Mexique et aux États-Unis comptent sur des structures de conception lourde, dites « grises » – les digues et levées, murs de protection et batardeaux, enrochements et brise-lames – pour assurer un certain degré de protection contre les risques d'inondation et d'érosion. Ces structures sont sujettes à des défaillances rapides et catastrophiques et interrompent souvent les processus dynamiques naturels. Cela entraîne des conséquences imprévues et une dégradation des systèmes naturels en plus de nuire au rétablissement après catastrophe et à la résilience des systèmes. Par exemple, les ouvrages conventionnels de protection des côtes, tels que les murs de protection, peuvent entraîner des conséquences néfastes pour la biodiversité côtière et intensifier l'érosion des rivages adjacents sans protection. Selon les projections, les risques d'inondation et d'érosion du littoral devraient empirer au cours du siècle à venir en raison des changements climatiques et de la croissance des populations dans les zones côtières. Les risques d'inondation projetés et les effets imprévus des infrastructures grises imposent la modernisation et l'adaptation des infrastructures grises afin d'améliorer la gestion des risques d'inondation (GRI). La majorité des infrastructures grises utilisées pour la GRI en Amérique du Nord a dépassé la durée de vie utile ou est sur le point de le faire. Cela crée une occasion d'envisager le rôle des solutions fondées sur la nature (SFN) en parallèle avec ces méthodes conventionnelles de protection côtière, ou à la place de celles-ci. Il est possible d'adapter les SFN en fonction des systèmes de GRI existants de manière à accroître la protection, à atténuer les dommages, à prolonger la durée de vie de structures GRI existantes et à augmenter la résilience climatique de ces structures et des collectivités. Le recours à des SFN pour adapter les structures côtières conventionnelles présente de nombreux avantages, entre autres :

- une meilleure protection des côtes et une longévité accrue des avantages de GRI;

- l'amélioration de l'environnement et de la biodiversité;
- des avantages à caractère social (loisirs, espaces verts et amélioration de la santé);
- des avantages économiques (emplois, tourisme).

L'adaptation au moyen des SFN présente de nombreux avantages, mais plusieurs obstacles entravent l'adoption plus fréquente de ces solutions pour la GRI. Ces obstacles s'inscrivent dans les grands groupes suivants :

- **obstacles sociaux/comportementaux** (p. ex. : la perception que les SFN n'offrent pas le même degré de protection et de performance que les infrastructures grises);
- **obstacles techniques** (p. ex. : le manque de guides techniques, de spécialistes formés ou de projets pilotes/de démonstration dans des contextes variés);
- **obstacles environnementaux** (p. ex. : la variabilité saisonnière et à long terme des systèmes naturels ainsi que la résilience face aux perturbations);
- **obstacles institutionnels** (p. ex. : le manque de financement, les enjeux liés à la réglementation);
- **manque de données** (p. ex. : par rapport à la performance des ouvrages et aux avantages connexes dans des régions variées, surtout en comparaison des infrastructures grises conventionnelles pour la GRI).

Le présent document fournit des orientations, des données probantes et des outils en vue de soutenir les personnes prenant les décisions dans la mise en œuvre élargie des SFN pour adapter les infrastructures grises existantes afin de lutter contre les risques d'inondation dans les collectivités côtières. Plus précisément, il vise à aider les personnes prenant les décisions à toutes les étapes d'un projet, depuis la conceptualisation et la conception jusqu'à l'exploitation. Il ne s'agit ni d'un guide technique détaillé ni d'un examen exhaustif d'une documentation de plus en plus abondante sur les SFN.

Options d'adaptation au moyen des SFN

L'adaptation consiste à remplacer, à modifier ou à améliorer une infrastructure existante par de nouvelles caractéristiques et de nouveaux systèmes. Les options en matière de SFN pour adapter les infrastructures de GRI se situent sur une échelle allant du gris au vert. Une adaptation au moyen des SFN devrait généralement déplacer l'infrastructure vers l'extrémité verte du spectre en améliorant sa contribution au fonctionnement des systèmes naturels ou en réduisant les effets négatifs sur ces systèmes.

Les options de SFN en matière d'adaptation s'inscrivent dans six grandes catégories :

- les plages et dunes;
- les zones humides (p. ex. : marais, estrans et mangroves);
- les îles;
- la végétation côtière terrestre (p. ex. : forêts côtières et zones boisées);
- les éléments submergés (p. ex. : récifs, forêts de varech et végétation submergée);
- les solutions hybrides (solutions qui combinent des caractéristiques naturelles ou fondées sur la nature avec des infrastructures grises).

Lorsque l'on adopte une optique systémique de la GRI (comme préconisé dans le présent document), la majorité des systèmes GRI seront par nature catégorisés comme des solutions hybrides, car ils comprendront des combinaisons de méthodes qui varient sur de nombreux segments différents du littoral. Diverses stratégies permettent d'obtenir des solutions hybrides. Elles consistent à modifier les infrastructures existantes pour y inclure des caractéristiques naturelles ou fondées sur la nature (p. ex. : l'ajout de tuiles de biodiversité à un mur de protection existant pour enrichir l'habitat), ou à remplacer complètement les infrastructures par de nouvelles solutions hybrides.

Le présent document de synthèse examine en détail ces six catégories d'adaptation au moyen des SFN. Chacune d'elles comporte des avantages et avantages connexes courants sur le plan de la GRI qui sont également décrits. Les coûts relatifs de chaque type d'adaptation au moyen des SFN sont indiqués pour les différentes phases du cycle de réalisation des SFN (planification et conception, construction, exploitation et entretien).

Détermination, priorisation et évaluation des possibilités d'adaptation

Durant la préparation du présent document, un cadre conceptuel simple, en deux étapes, a été créé pour aider les personnes prenant les décisions à déterminer, à prioriser et à évaluer les possibilités d'adaptation dans le cadre de processus plus vastes (systémiques) d'élaboration de stratégies de lutte contre les risques d'inondation. La première étape du cadre est la détermination, qui peut être divisée en cinq parties itératives :

Étape 1 : Déterminer les possibilités d'adaptation au moyen des SFN

- **Étape 1.1 Dresser l'inventaire des actifs de GRI existants**
Cette étape consiste à dresser un inventaire de tous les équipements de protection contre les inondations côtières qui font partie d'un système donné (p. ex. : murs de protection, digues et levées).
- **Étape 1.2 Définir une stratégie de mobilisation**
Une stratégie de mobilisation doit être élaborée et mise en œuvre à chacune des étapes ultérieures du processus. Cette étape est essentielle pour déterminer les parties prenantes et les titulaires de droits qui fourniront des renseignements sur les besoins, les priorités et les options en matière de protection côtière.
- **Étape 1.3 Évaluer les besoins et stratégies en matière de GRI**
À cette étape, il convient d'évaluer les besoins du littoral et du système concernés en matière de GRI. Il est recommandé de procéder à une évaluation des risques en vue de cerner et de prioriser les stratégies de GRI.
- **Étape 1.4 Évaluer le caractère adéquat du site et des actifs**
Cette étape comprend une évaluation de haut niveau de l'adéquation des actifs et du site en vue d'une adaptation au moyen des SFN. L'objectif est de déterminer s'il est faisable de remplacer les structures existantes par des SFN ou de les modifier avec des SFN.
- **Étape 1.5 Prioriser les possibilités**
Le résultat escompté de cette étape est de déterminer quels sites et quels actifs ciblés à l'étape 1.4 devraient être adaptés en priorité au moyen des SFN.

Étape 2. Évaluation des options d'adaptation

La deuxième étape du cadre conceptuel consiste à évaluer les options d'adaptation : les SFN, les options hybrides, les méthodes conventionnelles et l'inaction. Le cadre permettant de déterminer l'option d'adaptation la plus convenable pour le projet prévoit la comparaison des différentes options, par exemple au moyen d'une analyse multicritère. Il s'agit notamment d'évaluer les avantages et avantages connexes sur le plan de la GRI, de même que les besoins et les contraintes propres au projet. L'évaluation des avantages connexes suit un processus en trois étapes, brièvement abordé dans le présent document et décrit plus en détail dans le document d'orientation intitulé *Avantages connexes*. La deuxième phase vise donc à déterminer la meilleure option (au moyen d'une analyse multicritère) pour gérer les inondations côtières, et à maximiser les avantages connexes propres au projet.

Considérations administratives et techniques relatives à l'adaptation

Les personnes prenant les décisions doivent tenir compte de diverses considérations administratives et techniques au moment d'envisager une adaptation au moyen des SFN. Les considérations administratives abordées dans le présent document comprennent le cadrage, les rôles et responsabilités, les communications et la mobilisation, le financement, la réglementation et le moment d'exécution. Sur

le plan technique, il est question de considérations environnementales, sociales et économiques, d'ingénierie, de suivi et de gestion adaptative.

Incitation à l'adaptation au moyen des SFN

Il existe de nombreux types d'incitations à l'adaptation d'infrastructures grises au moyen des SFN, par opposition à un remplacement direct (à l'identique) ou à des améliorations purement structurales. Outre les effets positifs directs des avantages connexes, les incitations peuvent provenir de gouvernements, du secteur privé, d'organisations non gouvernementales (ONG) et d'organisations communautaires :

- Des incitations **inhérentes** découlent des nombreux avantages connexes que des infrastructures grises conventionnelles pourraient ne pas procurer. Le potentiel des SFN de s'adapter aux aléas côtiers changeants procure lui aussi des incitations, tout comme l'occasion que présentent les SFN de passer à une gestion adaptative. De plus, les infrastructures existantes qui doivent être réparées ou remplacées sont l'occasion d'apprendre des méthodes passées (y compris des échecs) et de mieux reconstruire après un événement dommageable.
- Les incitations **gouvernementales** comprennent généralement des incitations financières, stratégiques, programmatiques ou réglementaires, notamment celles qui découlent de l'adhésion des gouvernements à des accords internationaux.
- Les incitations d'**ONG ou d'organisations communautaires** proviennent généralement d'actions de plaidoyer et visent à renforcer la volonté politique et la motivation à l'égard des projets de SFN, le soutien technique ou le financement ou à délivrer des homologations.
- Les **organisations privées** offrent habituellement des incitations sous forme de financement ou de subventions pour la recherche afin de combler les écarts des savoirs.

Possibilités et futures orientations

Afin de combler les lacunes dans les données et d'écarter les obstacles connus, le présent document donne un aperçu des possibilités et de futures orientations dont les personnes prenant les décisions pourraient se prévaloir. Les principales possibilités sont résumées ci-dessous :

- Établir des flux de financement régionaux pour des projets pilotes d'adaptation au moyen des SFN et des projets présentant un degré élevé d'innovation;
- Établir une communauté de pratique des SFN avec des spécialistes couvrant de multiples disciplines et de multiples régions;
- Établir des flux de financement et des politiques en faveur de méthodes de gestion adaptative;
- Mettre en œuvre des projets pilotes d'adaptation au moyen des SFN et sur des SFN nouvelles, et publier les résultats de ces projets;
- Mettre en place des initiatives stratégiques et des incitations concernant l'adaptation au moyen de SFN;
- Encourager et mettre en évidence des études de cas qui comparent les SFN aux mesures structurales de protection du littoral;
- Encourager et mettre en évidence des études de cas qui présentent des résultats à long terme;
- Mettre en place plus de réseaux pour héberger et partager les données de suivi standardisées indispensables à la conception au moyen des SFN, et publier ces données;
- Établir des normes et certifications nationales ou internationales fondées sur des données probantes pour la conception au moyen des SFN, afin de renforcer la légitimité et fournir des orientations;
- Simplifier les procédures de délivrance de permis pour l'aménagement au moyen des SFN, le suivi et la gestion adaptative;
- Soutenir et publier des travaux de recherche sur l'adaptation au moyen des SFN, et sur de nouvelles SFN;
- Présenter des adaptations réussies de systèmes GRI habituels au moyen des SFN, ainsi que des enseignements tirés d'échecs, à titre d'exemple.

Préface

La Commission de coopération environnementale (CCE) est une organisation trilatérale qui facilite la coopération entre le Canada, Mexique et les États-Unis en vue de conserver, de protéger et d'améliorer l'environnement nord-américain. En 2021, la CCE a lancé un projet pour guider la mise en œuvre plus vaste des solutions fondées sur la nature (SFN) en vue de gérer les risques d'inondation (GRI) dans les collectivités côtières d'Amérique du Nord. Ce projet comprend les trois grandes étapes suivantes :

1. **Une série d'ateliers intersectoriels**, pour jeter les bases d'une communauté de pratique nord-américaine, réunir des spécialistes afin d'évaluer les besoins et possibilités, et cerner les obstacles à la mise en œuvre des SFN.
2. **Une série de documents d'orientation**, pour combler les écarts des savoirs et étoffer les possibilités relevées durant les ateliers, ainsi que guider les pratiques exemplaires de mise en œuvre des SFN.
3. **Des webinaires**, pour améliorer l'adoption et l'utilisation des documents d'orientation.

Durant la première étape du projet, DHI Water and Environment Inc. (DHI) avait pour mission de concevoir et d'animer la série d'ateliers. Celle-ci comprenait sept séances réparties sur cinq semaines en mai et juin 2022. Ces séances portaient sur les sujets suivants :

- 1A et 1B : avantages connexes des SFN;
- 2A et 2B : adaptation des infrastructures existantes au moyen des SFN;
- 3A et 3B : suivi de l'efficacité des SFN;
- 4 : résumé des ateliers.

La série d'ateliers a réuni 95 spécialistes, qui représentaient le milieu universitaire, le secteur privé, les gouvernements et les organisations non gouvernementales (ONG) de toute l'Amérique du Nord. Afin de susciter un sentiment de communauté, étoffer des idées, recueillir des commentaires et cerner les lacunes et les occasions, les ateliers comprenaient les activités de groupe suivantes : des discussions sur six études de cas, quatre ensembles d'activités collaboratives en ligne et deux séries de questions interactives. Le taux de participation et les idées présentées par des personnes aux expériences et profils divers ont permis de jeter de solides bases pour établir une communauté de pratique et élaborer des documents d'orientation consacrés aux SFN en Amérique du Nord.

La deuxième étape du projet consistait à combler les écarts des savoirs cernés durant les ateliers grâce à l'élaboration et à la publication d'une série de documents d'orientation sur les SFN dans un contexte de zones urbaines et périurbaines en Amérique du Nord. Le présent document fait partie de cette série, qui est à consulter dans son ensemble, et comprend les documents suivants :

- *Avantages connexes*
- *Adaptation des infrastructures existantes* (le présent document)
- *Suivi de l'efficacité*
- *Suivi de l'efficacité : Méthodes et indicateurs proposés*

Remerciements

Nous remercions toutes les personnes qui ont participé à divers titres à la série d'ateliers de la CCE consacrés aux solutions fondées sur la nature pour gérer les risques d'inondation côtière dans les collectivités d'Amérique du Nord.

Le présent rapport a été préparé par les personnes suivantes :

- Eleanor Simpson, principale scientifique de l'environnement, DHI
- Jessica Wilson, gestionnaire de projet et ingénieure des travaux maritimes, DHI
- Brianna Lunardi, scientifique de l'environnement, DHI
- Christian Appendini, conseiller externe, DHI et professeur à l'Université nationale autonome du Mexique (UNAM)
- Danker Kolijn, responsable des solutions marines et côtières (Amériques), DHI
- Tom Foster, vice-président, solutions marines et côtières (Amériques et Pacifique), DHI

Merci aux spécialistes de DHI qui ont participé, en octobre 2022, à un atelier interne sur la détermination et l'estimation des avantages connexes, et leurs obstacles et possibilités :

- Ben Tuckey, responsable des solutions marines et côtières (Nouvelle-Zélande), DHI
- Siti Maryam Yaakub, consultante principale en environnement (Singapour), DHI
- George Foulsham, directeur, environnement marin et côtier, DHI

Nous remercions tout spécialement le comité directeur de la CCE, qui a fourni de précieux conseils tout au long du projet :

- John Sommerville et Mary-Ann Wilson, Ressources naturelles Canada
- Laurence Forget-Dionne, Pierre Huns, Catherine Lafleur et Annette Morand, Infrastructure Canada
- Enda Murphy, Conseil national de recherches du Canada
- Gloria Cuevas Guillaumin et Martha Niño Sulkowska, *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales* (Semarnat, ministère de l'Environnement et des Ressources naturelles)
- Pedro Joaquín Gutiérrez et Maxime Le Bail, *Procuraduría Federal de Protección al Ambiente* (Profepa, Bureau du procureur fédéral de la protection de l'environnement)
- Leonel Álvarez Balderas, Isabel Selene Benítez Ávila et Juan Domingo Izabal Martínez, *Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático* (INECC, Institut national de l'écologie et des changements climatiques)
- Trisha Bergmann, *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA, Administration océanique et atmosphérique nationale)
- Julien Katchinoff, *US Department of State* (département d'État des États-Unis)

1 Introduction

Une grande partie de la population nord-américaine est concentrée dans des collectivités côtières qui sont exposées aux risques d'inondations côtières (DHI, 2022a). D'importantes infrastructures de gestion des risques d'inondation (GRI) existent déjà pour réduire l'exposition de ces zones aux dangers d'inondations côtières. Cependant, selon les projections, ces risques d'inondation devraient s'intensifier en raison de la densité démographique croissante dans les zones urbaines et des effets des changements climatiques (Diez et coll., 2011; Ford et coll., 2018; Ghanbari et coll., 2021; Kim et coll., 2021; OCDE, 2021). Il existe un besoin pressant et une occasion d'adapter de nombreuses infrastructures de GRI existantes et vieillissantes en Amérique du Nord au cours des prochaines décennies, afin de gérer ces risques croissants et d'exploiter en parallèle une série d'avantages connexes.

Les infrastructures de GRI existantes reposent en grande partie sur des méthodes structurelles conventionnelles, comme les digues et murs de protection. Ces méthodes conventionnelles sont en place depuis longtemps et sont bien documentées dans la littérature scientifique, les lignes directrices et les standards (p. ex., *Coastal Engineering Manual*, USACE, 2002). Étant donné leur utilisation bien établie et l'abondante documentation concernant leur conception et performance, on fait généralement confiance à ces techniques pour qu'elles fonctionnent comme prévu. Cependant, les systèmes structurels sont sujets à des défaillances catastrophiques, et leur conception prévoit peu de redondance, ce qui peut causer des inondations soudaines aux conséquences désastreuses (Bridges et coll., 2021, p. 180). De plus, ces systèmes ont souvent été conçus sans une compréhension globale des incidences sociales, culturelles et environnementales plus larges, des avantages connexes potentiels ou encore des risques croissants relatifs aux changements climatiques.

L'augmentation projetée des risques d'inondation, des infrastructures vieillissantes, une plus grande prise de conscience des effets imprévus des méthodes grises de GRI et la possibilité d'obtenir des avantages connexes offrent l'occasion d'adopter une perspective plus holistique de la GRI. Les solutions fondées sur la nature (SFN) reposent sur l'utilisation de matériaux et de processus naturels, ou fondés sur la nature, pour assurer la GRI tout en procurant des avantages connexes d'ordre social, économique et environnemental. Pourtant, l'utilisation de SFN dans le cadre de systèmes de GRI est moins bien établie dans la pratique et soulève parfois des doutes (p. ex., Anderson et coll., 2022; Raška et coll., 2022). Des guides et standards d'aménagement définitifs sont encore en voie d'élaboration pour les applications en Amérique du Nord, mais des progrès notables ont été réalisés récemment (p. ex., Bridges et coll., 2021; Doswald et coll., 2021; Vouk et coll., 2021). Malgré la perception selon laquelle les SFN sont plus récentes et moins bien comprises que les méthodes structurelles, les systèmes naturels, comme les plages et les dunes, les marais, les récifs et les îles, ont de tout temps assuré des services de GRI aux collectivités côtières. L'adaptation et l'imitation de ces caractéristiques naturelles, ou leur combinaison avec des structures existantes comportent un immense potentiel pour adapter les systèmes existants de protection du littoral et mieux gérer les risques associés aux dangers naturels, comme l'élévation du niveau de la mer et la fréquence croissante des tempêtes, tout en offrant d'importants avantages connexes.

L'adaptation des systèmes de GRI au moyen des SFN consiste à remplacer, à modifier ou à améliorer l'infrastructure grise existante (également connue sous le nom d'infrastructure conventionnelles ou structurelle) par des caractéristiques et des processus naturels ou fondés sur la nature. Tout au long du document, le terme « adaptation » sera utilisé dans le contexte d'amélioration de la performance et de diversification des avantages des systèmes de protection côtière au moyen des SFN.

Le présent document vise à soutenir l'adoption des SFN dans les zones urbaines côtières d'Amérique du Nord en fournissant aux personnes prenant des décisions de l'information pratique et des conseils concernant l'adaptation des systèmes d'infrastructure existants au moyen des SFN, et en abordant plusieurs lacunes dans les données et obstacles connus. Il fait partie d'une série de documents

préparée par DHI Water and Environment Inc. (DHI) pour la Commission de coopération environnementale (CCE). Cette série est à consulter dans son ensemble et comprend les documents suivants :

- *Avantages connexes;*
- *Adaptation des infrastructures existantes* (le présent document);
- *Suivi de l'efficacité;*
- *Suivi de l'efficacité : Méthodes et indicateurs proposés.*

1.1 Objectifs et portée

DHI a organisé une série d'ateliers intersectoriels au printemps de 2022, dans le cadre d'un projet de la CCE visant à soutenir la mise en œuvre à plus grande échelle des SFN pour la GRI dans les collectivités côtières nord-américaines (DHI, 2022b). Cette série d'ateliers comprenait sept séances qui ont réuni 95 spécialistes du Canada, du Mexique et des États-Unis. Deux de ces séances portaient précisément sur l'adaptation des systèmes d'infrastructures existants au moyen des SFN. Durant ces séances, les personnes participantes ont présenté des idées et cerné les lacunes dans les données, les possibilités et les obstacles liés à l'adaptation.

Le présent document aborde les écarts des savoirs relevés durant les ateliers, résume l'information existante, et fournit des conseils pratiques pour déterminer, planifier et mettre en œuvre des adaptations possibles au moyen des SFN en vue de réduire les risques d'inondation dans les collectivités côtières. Il fait partie d'un ensemble de documents d'orientation élaborés pour aider les personnes prenant les décisions (p. ex. : les leaders autochtones, planificateurs de l'utilisation des terres, représentants et représentantes du gouvernement et propriétaires ou gestionnaires d'infrastructures) à mettre en œuvre les SFN pour réduire les risques d'inondation côtière en Amérique du Nord.

Plus précisément, le document vise à :

- contextualiser les différences susceptibles d'influer les initiatives d'adaptation et de mettre en évidence les possibilités d'adaptation dans l'environnement nord-américain;
- fournir une feuille de route pour démontrer la proposition de valeur de l'adaptation;
- fournir un résumé complet des options possibles dans le cadre d'adaptations au moyen des SFN et, dans la mesure du possible, fournir des exemples de coûts et des comparaisons de coûts;
- élaborer des stratégies pour permettre aux personnes prenant les décisions de cerner les occasions d'adaptation et de déterminer les options et les coûts;
- résumer les principales considérations administratives relatives à l'adaptation, notamment les rôles et responsabilités, le financement et la réglementation;
- résumer les principales considérations techniques concernant l'adaptation;
- discuter des incitations à l'adaptation au moyen des SFN en remplacement des structures grises ou en combinaison avec celles-ci;
- présenter des études de cas relatives à l'adaptation au moyen des SFN;
- dans la mesure du possible, aborder les lacunes dans les données et obstacles soulevés durant les ateliers intersectoriels.

Le présent document vise à fournir des conseils, des données probantes et des outils pour soutenir les personnes prenant les décisions dans la mise en œuvre à plus grande échelle des SFN en vue de réduire les risques d'inondation dans les collectivités côtières en Amérique du Nord. Il offre des conseils pour aider à prendre des décisions à chacune des étapes du projet, de la conceptualisation à la conception et à l'exploitation. Le document ne se veut pas un guide technique détaillé et ne présente pas d'examen exhaustif d'une documentation de plus en plus abondante sur les SFN.

1.2 Valeur de l'adaptation

L'Amérique du Nord compte un vaste portefeuille d'infrastructures côtières. Or, une grande partie de ces infrastructures atteignent la fin de leur vie utile, ou l'a déjà dépassée. De plus, elles n'ont pas été conçues en fonction des effets des changements climatiques ni construites selon une compréhension globale de leurs incidences sociales, culturelles et environnementales plus larges. Les SFN présentent une excellente occasion d'apprendre des erreurs passées et de « faire et reconstruire mieux¹ » (Nations Unies, 2015). Elles peuvent améliorer la performance ou l'intégrité des systèmes de GRI en remplaçant, en adaptant ou en améliorant des infrastructures grises existantes. Elles offrent aussi de nombreux avantages connexes complémentaires pour relever de nombreux défis sociétaux, et permettent de restaurer des habitats dégradés. L'encadré 1 présente les avantages potentiels d'adapter les infrastructures de GRI existantes au moyen des SFN.

Encadré 1. Avantages d'adapter les infrastructures de GRI existantes au moyen des SFN

	Meilleure gestion des risques d'inondation ou d'érosion		Promotion et application de nouvelles connaissances (p. ex. : recherche et élaboration d'orientations)
	Renforcement ou réparation des infrastructures vieillissantes existantes		Plus grande adhésion du public
	Meilleure performance résiduelle (c.-à-d. résilience)		Avantages connexes environnementaux (p. ex. : restauration d'habitats)
	Meilleure adaptation aux changements climatiques		Avantages connexes sociaux (p. ex. : amélioration de l'accès aux espaces verts)
	Respect des exigences du projet (p. ex. : en matière de financement)		Avantages connexes économiques (p. ex. : diminution des coûts du cycle de vie)
	Possibilité de partenariats entre les populations autochtones et les collectivités		Solutions propres au lieu d'implantation

L'adaptation des infrastructures côtières existantes de GRI au moyen des SFN a pour principal avantage de fournir une fonction de gestion des risques d'inondation ou d'érosion, ou d'améliorer cette fonction. Cela peut se faire en remplaçant des infrastructures grises existantes, ou en renforçant ou en réparant des infrastructures grises existantes, mais vieillissantes ou peu performantes. Lorsqu'elles sont bien conçues et implantées dans des milieux appropriés, les SFN vont souvent mieux s'établir et devenir plus efficaces au fil du temps, et mieux gérer les risques d'inondation ou d'érosion pendant la durée de vie du projet (p. ex., Sutton-Grier et coll., 2015). En fin de compte, elles réduisent les risques pour les personnes, les biens, les moyens de subsistance, les terres culturellement ou socialement importantes et les zones écosensibles.

Par définition, les SFN sont évolutives, flexibles, adaptables et résilientes aux changements climatiques (Osborne, 2022). Comme elles peuvent souvent s'auto-adapter, elles se distinguent par

¹ « Faire et reconstruire mieux » fait partie des quatre priorités d'action du Cadre de Sendai.

une performance résiduelle (c.-à-d. une résilience) après une tempête et peuvent très bien s'adapter à un climat changeant. Dans les bonnes conditions, les SFN peuvent même croître de manière à suivre le rythme de l'élévation du niveau de la mer (Sutton-Grier et coll., 2015). Ces capacités constituent d'importants avantages pour les SFN par rapport aux infrastructures grises et statiques. Elles permettent de tirer des leçons des erreurs passées relatives aux infrastructures grises, tout en augmentant la résilience et en adoptant une approche de gestion adaptative.

En outre, les avantages connexes que procurent les SFN sont souvent sous-évalués par rapport aux approches grises conventionnelles (p. ex. : les approches conventionnelles portent généralement sur une fonction d'ingénierie et sur les coûts d'investissement et d'entretien du projet, et ne prennent pas en compte des avantages connexes, comme un meilleur accès aux aires d'alimentation, la séquestration du carbone, etc.). L'adaptation des systèmes d'infrastructures grises au moyen des SFN permet d'exploiter des avantages connexes sociaux, économiques et environnementaux qui sont d'une grande valeur pour les collectivités, les parties prenantes du projet et les titulaires de droits. En particulier, les SFN peuvent réduire les coûts du cycle de vie (un avantage connexe économique) du projet de GRI grâce à une gestion adaptative et à la capacité de certaines d'entre elles à croître au rythme de l'élévation du niveau de la mer. Le document d'accompagnement intitulé *Avantages connexes* décrit d'autres avantages connexes potentiels que procurent les SFN. Les promoteurs de projets d'adaptation au moyen des SFN peuvent aussi exploiter ces avantages connexes pour obtenir du financement et une plus grande adhésion du public aux projets.

Les initiatives d'adaptation peuvent se dérouler dans le cadre de projets ou de stratégies plus vastes de GRI afin de répondre à des exigences réglementaires ou financières, par exemple en créant des habitats supplémentaires ou en fournissant des services de nature sociale. De plus, la création d'habitats supplémentaires pourrait permettre d'éviter les mesures d'indemnisation qui visent les infrastructures grises.

1.3 Adaptation : lacunes dans les données et obstacles

La présente section résume les conclusions de la série d'ateliers de la CCE sur les SFN (DHI, 2022b) concernant les lacunes dans les données et les écarts des savoirs, et les obstacles existants à l'adaptation d'infrastructures au moyen des SFN. L'encadré 2 présente un résumé des obstacles soulevés durant la série d'ateliers de la CCE.

La confiance du public et des institutions envers les infrastructures existantes, et leur méfiance à l'égard des SFN semblent constituer un obstacle majeur à l'adaptation au moyen des SFN. Cette tendance à faire confiance à ce que l'on connaît et à l'accepter par défaut, de même qu'une incertitude par rapport à la capacité des solutions naturelles ou fondées sur la nature d'offrir le même degré de protection que les infrastructures grises, pourrait expliquer cette situation. Anderson et coll. (2022), Raška et coll. (2022) et Cado van der Lely (2021) ont constaté le même problème. Il y a aussi cette tendance à parler des SFN comme si toutes les techniques comportent les mêmes coûts et avantages; on pourrait en retenir que si une SFN est peu performante, toutes les autres SFN le seront également. L'adhésion et la compréhension du public pourraient être améliorées en communiquant les nuances et les avantages potentiels des SFN au moyen d'études de cas et en examinant chaque type de SFN individuellement.

Le document *International Guidelines on Natural and Nature-Based Features for Flood Risk Management* (Lignes directrices internationales sur les caractéristiques naturelles et fondées sur la nature pour gérer les risques d'inondation; Bridges et coll., 2021) présente un aperçu complet des options et considérations de conception en matière de SFN. Selon les spécialistes qui ont participé à l'atelier, il persiste un besoin pour des guides techniques précis et détaillés, fondés sur la recherche et couvrant un large éventail de SFN, de types d'aménagements (c.-à-d., adaptation ou nouvelle construction) et de régions. La nouveauté de certaines SFN et le fait que des recherches et des projets pilotes sont toujours en préparation pourraient expliquer ce besoin pour des guides techniques. En

outre, la conception et la mise en œuvre des SFN nécessitent un personnel compétent (couvrant de nombreuses disciplines), ce qui pose des difficultés logistiques et budgétaires, en particulier au cours des phases liminaires d'un projet (DHI, 2022a). Il faudra plus de formation, de guides techniques et d'études de cas actualisées (qui présentent des réussites et des échecs) pour soutenir le développement des connaissances chez le personnel. Pour une lecture plus approfondie, Vouk et coll. (2021) examinent bon nombre de ces besoins et obstacles dans un contexte canadien.

Les concepteurs de projet qui ont participé à la série d'ateliers ont fait remarquer que les SFN fonctionnent souvent mieux que bien des solutions grises conventionnelles, à plus grande échelle. Les SFN sont dynamiques et elles ont la capacité de s'adapter aux perturbations, et souvent de s'auto-réparer. Cependant, leur taille par rapport aux processus côtiers déterminera leur capacité à faire face aux aléas côtiers; par exemple, une forte tempête pourrait complètement abîmer un petit système de marais aménagé, alors qu'un marais plus grand pourrait mieux y résister et même s'auto-réparer (Wilson, 2021). Les SFN ne doivent pas pour autant être synonymes de grands projets hautement capitalistiques; des approches progressives sont possibles pour exploiter les avantages cumulatifs de multiples interventions plus modestes. En outre, certaines SFN pourraient ne pas convenir à des sites exposés à des vents élevés, à de forts courants ou à de puissantes vagues ou ondes de tempête. Voilà pourquoi il faut un cadre d'évaluation des options facile à utiliser pour soutenir la prise de décisions et équilibrer différents objectifs de conception (Osborne, 2022), avant de choisir définitivement une approche conceptuelle.

Les obstacles environnementaux comprennent la variabilité saisonnière et à long terme des systèmes naturels, et le temps de latence nécessaire à l'établissement d'une SFN – ce qui peut engendrer de l'incertitude et de l'hésitation au sein du public, des institutions et de l'équipe de projet. Sans compter une certaine incertitude quant aux effets des changements climatiques, en particulier les taux d'élévation du niveau de la mer à long terme et les effets sur l'intensité et la fréquence des tempêtes.

Encadré 2. Obstacles à l'adaptation au moyen des SFN

	Type d'obstacle	Objet du présent rapport
	Obstacles sociaux/comportementaux (liés aux attitudes)	
	• Confiance dans le connu et son acceptation par défaut	<input type="radio"/>
	• Perception selon laquelle les SFN offrent moins de protection que les méthodes conventionnelles	<input checked="" type="radio"/>
	• Perception selon laquelle toutes les options des SFN offrent des performances similaires	<input checked="" type="radio"/>
	• Méconnaissance des avantages connexes potentiels des projets d'adaptation	<input checked="" type="radio"/>
	Obstacles techniques	
	• Absence de guides techniques définitifs couvrant toutes les options possibles en matière de SFN	<input type="radio"/>
	• Participation nécessaire de spécialistes de nombreuses disciplines (p. ex. des spécialistes en sciences sociales)	<input type="radio"/>
	• Manque de spécialistes formés et compétents, en particulier à l'échelle locale	<input type="radio"/>
	• Manque de formation ou d'éducation sur la conception et la mise en œuvre des SFN	<input checked="" type="radio"/>
	• Manque d'études de cas et d'inventaires actualisés et utilisables (qui présentent autant des succès que des échecs)	<input checked="" type="radio"/>
	• Besoin d'un cadre d'évaluation des options	<input checked="" type="radio"/>
	• Difficulté d'appliquer la gestion adaptative à long terme	<input type="radio"/>
	• Contraintes de conception dues à des limites (espace physique/propriétés privées)	<input checked="" type="radio"/>
• Contraintes de conception liées aux processus et aux dangers côtiers	<input type="radio"/>	
	Obstacles environnementaux	
	• Variabilité saisonnière et à long terme des systèmes naturels	<input type="radio"/>
	• Incertitude quant aux effets des changements climatiques	<input type="radio"/>
	• Délai d'établissement des systèmes naturels	<input type="radio"/>
	Obstacles institutionnels	
	• Manque de financement pour les projets/adaptations au moyen des SFN	<input type="radio"/>
	• Manque d'incitations politiques ou d'obligations légales	<input type="radio"/>
	• Accent sur le court terme dans le cadre de programmes existants	<input type="radio"/>
	• Obstacles réglementaires limitant le type de solution et le calendrier de mise en œuvre	<input checked="" type="radio"/>
	• Conflits entre exigences de compétences et d'organismes gouvernementaux	<input type="radio"/>
	• Corruption	<input type="radio"/>
	• Manque de volonté politique	<input type="radio"/>
• Manque de planification stratégique/approche fragmentaire de la planification	<input checked="" type="radio"/>	
	• Manque de visibilité et de promotion des SFN dans les lois et les politiques	<input type="radio"/>
	• Manque de réglementations institutionnelles et d'instruments de marché	<input type="radio"/>

Source : adapté des obstacles relevés durant les ateliers intersectoriels sur les SFN organisés par DHI pour le compte de la CCE, au printemps de 2022.

Les spécialistes ont également indiqué que les obstacles institutionnels constituent un important défi pour l'adaptation des systèmes existants au moyen des SFN. Ces obstacles comprennent : le manque d'incitations politiques et d'obligations légales, le manque de volonté politique, la corruption, les conflits entre exigences juridictionnelles et d'organismes gouvernementaux, les obstacles réglementaires et l'accent sur le court terme. Bon nombre de ces obstacles ont entraîné un manque notable de planification stratégique et systémique, pour donner lieu à une vision fragmentaire et réactive de la protection contre les inondations. Un manque de financement pour soutenir les projets de SFN amplifie les obstacles institutionnels, en particulier les phases d'exploitation des projets, qui exigent un suivi à long terme et une gestion adaptative (DHI, 2022c). Les personnes prenant les décisions et bailleurs de fonds ignorent souvent les avantages potentiels des SFN ou accordent peu de valeur aux avantages de nature sociale et environnementale; par conséquent, ils hésitent à financer ces projets (Brill et coll., 2021).

Le présent rapport vise, dans la mesure du possible, à combler plusieurs de ces lacunes dans les données et à écarter ces obstacles (décrits dans l'Annexe 1). Les obstacles environnementaux comprennent la variabilité saisonnière et à long terme des systèmes naturels, et le temps de latence nécessaire à l'établissement d'une SFN – ce qui peut engendrer de l'incertitude et de l'hésitation au sein du public, des institutions et de l'équipe de projet. Sans compter une certaine incertitude quant aux effets des changements climatiques, en particulier les taux d'élévation du niveau de la mer à long terme et les effets sur l'intensité et la fréquence des tempêtes.

Encadré 2), ou du moins à déterminer des méthodes pour y arriver par d'autres moyens (voir le chapitre 7). Il traite d'obstacles de nature sociale/comportementale, technique et institutionnelle que la diffusion de données, de connaissances et de conseils supplémentaires permettrait (en partie) d'écarter. Il n'aborde pas les obstacles qui exigent une action supplémentaire de la part des personnes prenant les décisions (comme l'établissement de sources de financement).

Pour plus de détails sur des obstacles particuliers à la mise en œuvre des SFN, il est possible de consulter Vouk et coll. (2021) et Raška et coll. (2022). Les documents intitulés *Avantages connexes* et le *Suivi de l'efficacité*, qui accompagnent le présent rapport, décrivent d'autres lacunes dans les données et obstacles concernant les avantages connexes et le suivi des SFN.

1.4 Lectures complémentaires

De nombreuses publications ont été examinées et citées en référence afin de préparer le présent rapport. Ces documents, de même que la série d'ateliers de la CCE sur les SFN, ont été utilisés pour élaborer les considérations, les conseils et les processus et énoncés du rapport. Les principaux documents de référence, énumérés ci-dessous, peuvent être consultés pour avoir de plus amples renseignements et des conseils techniques complémentaires.

- *Nature-Based Solutions for Coastal Highway Resilience: An Implementation Guide*, US Department of Transportation Federal Highway Administration (US Federal Highway Administration, 2019) 
- *Practical Guide to Implementing Green-Gray Infrastructure*, Conservation International (Green-Gray Community of Practice, 2020) 
- *Increasing Infrastructure Resilience with Nature-Based Solutions: A 12-Step Technical Guidance Document for Project Developers*, Banque interaméricaine de développement (BID, 2020) 
- *International Guidelines on Natural and Nature-Based Features for Flood Risk Management*, United States Army Corps of Engineers (Bridges et coll., 2021) 
- *Nature-Based Solutions for Coastal and Riverine Flood and Erosion Risk Management*, Association canadienne de normalisation et Conseil national de recherches du Canada (Vouk et coll., 2021) 

2 Options d'adaptation au moyen des SFN

Le présent chapitre décrit le but de l'adaptation et caractérise brièvement la vaste gamme d'options en matière de solutions fondées sur la nature (SFN) qu'il est possible d'adopter pour répondre aux besoins et aux contraintes d'adaptation propres à un projet. Il comprend une comparaison générale des coûts pour chaque grande catégorie de SFN. Ce chapitre comporte également des études de cas pour illustrer des exemples concrets d'application des SFN.

2.1 Échelle des SFN

Dans le contexte de l'adaptation, il est utile de considérer toutes les infrastructures de protection côtière, ainsi que les possibilités d'adaptation, comme se situant sur une échelle allant du gris au vert, souvent appelé « spectre gris-vert » (figure 1). Les options « grises » de gestion des risques d'inondation (GRI) côtière comprennent les ouvrages en béton, tels que les murs de protection et les brise-lames. Les SFN peuvent se situer sur l'ensemble du spectre gris-vert. Les solutions plus naturelles (ou « vertes ») ne comportent pas d'éléments qui relèvent des infrastructures grises, sont généralement dynamiques et procurent de multiples avantages connexes. Ces solutions « vertes » peuvent reposer en partie sur des éléments naturels, comme les plages, les zones humides et les récifs d'huîtres, par exemple. Elles peuvent inclure des éléments gris afin de pallier diverses contraintes relatives à un projet ou à un site; ou encore, un projet d'adaptation pourrait exploiter certaines infrastructures grises existantes. De telles solutions hybrides (p. ex. : les systèmes de type plage-cap, ou marais avec seuils rocheux) se situent entre les deux extrémités du spectre.

Ainsi, les projets d'adaptation au moyen des SFN s'inscrivent dans les trois stratégies suivantes :

1. **Retour complet aux processus naturels** – mise hors service de l'infrastructure grise existante, qui est remplacée par une SFN (ne constituant pas une solution hybride).
2. **Retour partiel aux processus naturels au moyen de nouveaux éléments hybrides** – retrait ou modernisation de l'infrastructure existante, avec mise en œuvre simultanée de SFN nouvelles et hybrides.
3. **Retour partiel aux processus naturels menant à des éléments hybrides** – création d'une infrastructure hybride en appliquant une SFN à une infrastructure grise existante (qui reste en place), en l'installant devant cette dernière ou en la construisant en combinaison avec elle.

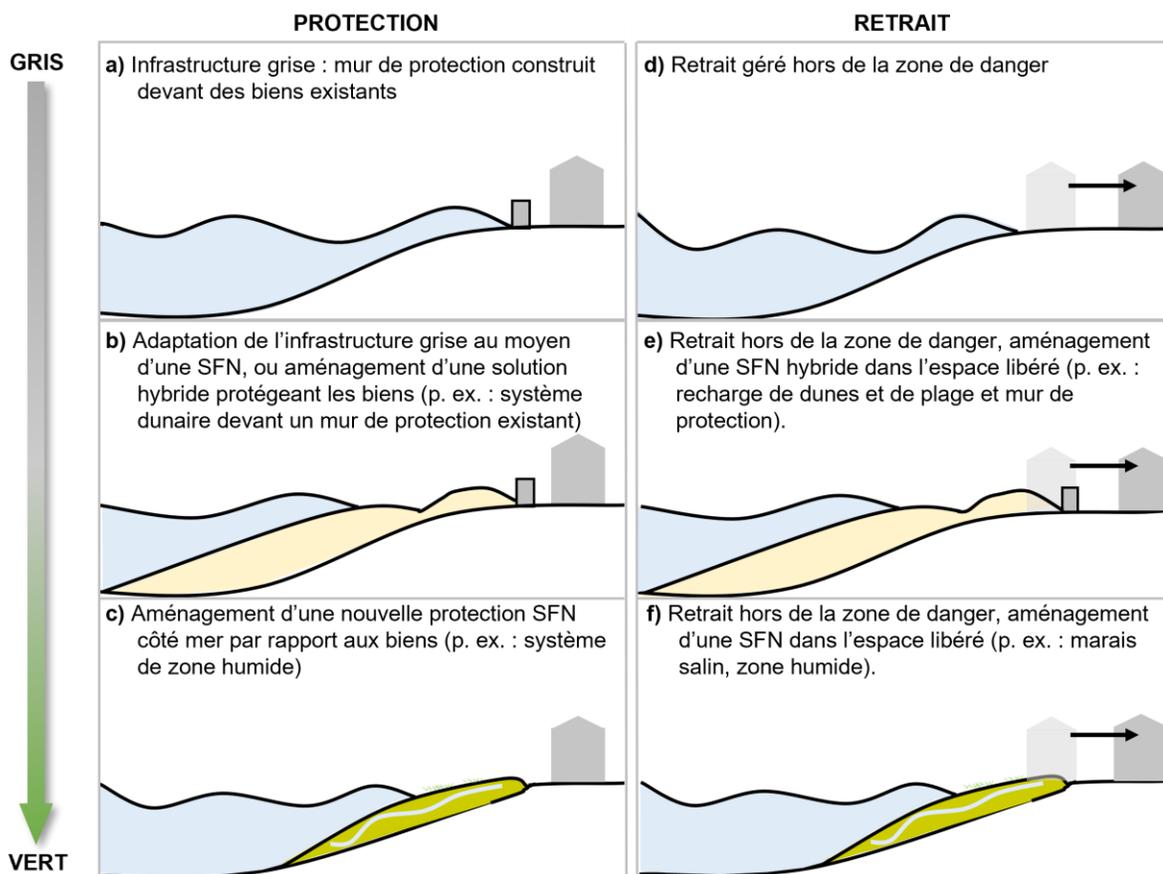
Dans les sections suivantes, les différentes options de SFN pour l'adaptation, qui peuvent être adoptées dans le cadre de l'une ou l'autre des trois stratégies susmentionnées sont détaillées. Les solutions hybrides se fondent sur les connaissances et les renseignements exposés dans les sections relatives aux autres options de SFN et font l'objet d'un examen plus détaillé dans une section qui leur est consacrée.

2.2 Stratégies de gestion des risques des aléas côtiers

Le cadre PARA (Protect, Avoid, Retreat and Accommodate, ou protection, évitement, retrait, adaptation) est souvent utilisé pour caractériser la gestion des risques liés aux aléas côtiers ainsi que l'adaptation à ces risques (p. ex., Doberstein et coll., 2019). Les stratégies conventionnelles et axées sur les SFN s'inscrivent toutes deux dans les catégories « protection » et « retrait » comme options soit hybrides, soit autonomes; certains exemples en sont donnés à la figure 1. Les stratégies d'évitement visent à empêcher l'aménagement des terres dans les zones à risques, tandis que les stratégies d'adaptation consistent à adapter l'utilisation des terres et les bâtiments existants de manière à réduire l'effet des aléas. Bien que ces deux dernières catégories soient des options valables de gestion des

risques, elles ne s'inscrivent pas dans le contexte d'adaptation des infrastructures existantes au moyen des SFN.

Figure 1. Stratégies de gestion côtière (protection et retrait) sur l'ensemble du spectre des SFN



Pour qu'elles soient efficaces, les SFN doivent être cernées, élaborées et déployées dans le cadre d'une vaste stratégie de gestion des risques d'inondation (GRI) selon des principes à caractère systémique (de Vries et coll., 2021) qui admettent que certaines inondations sont inévitables, en particulier dans un avenir incertain, et qui visent à gérer les risques relatifs aux aléas (Sayers et coll., 2013). Différentes méthodes devraient être envisagées sur une échelle systémique, et différentes stratégies peuvent être déployées en tandem, selon les conditions propres à l'emplacement.

Les stratégies de protection supposent l'adoption de mesures pour protéger l'utilisation des terres, les infrastructures et les biens existants contre les inondations et l'érosion. Ces stratégies servent souvent à protéger des terres ou des infrastructures qui ont une grande valeur ou une importance économique ou culturelle considérable et dont le déplacement hors de la zone inondable est impossible. Parmi les stratégies de protection, on compte les approches qui consistent à faire avancer la ligne de défense et à maintenir la ligne de défense (p. ex., Simm, 2021). Selon l'approche d'*avancement de la ligne de défense*, les biens construits restent au même endroit et de nouvelles défenses sont construites, ou les défenses existantes sont améliorées, entre ces biens et la mer (figure 1, a à c). Il est possible d'intégrer une adaptation au moyen des SFN dans une stratégie d'avancement de la ligne en créant des systèmes naturels constitués de marais ou de plages, par exemple, devant des infrastructures grises. Les contraintes liées à l'espace et à la propriété constituent souvent des obstacles à la faisabilité des options de SFN dans les stratégies d'avancement de la ligne. L'option du *maintien de la ligne de défense*

s'inscrit également dans les stratégies de protection; elle consiste à améliorer les méthodes actuelles de GRI en laissant le littoral inchangé. Il peut s'agir, par exemple, de rehausser les structures ou de restaurer un habitat déjà en place, mais dégradé.

Les options de retrait (figure 1, *d* à *f*) comportent soit l'abandon de biens construits existants (y compris des infrastructures de GRI) et des terres dans une zone à risque, soit le déplacement des biens hors d'une zone à risque, et des infrastructures de défense plus loin de la côte. Le retrait convient lorsqu'on n'a pas les moyens nécessaires pour adopter d'autres stratégies ou lorsqu'il est possible de déplacer l'infrastructure (c.-à-d. s'il y a suffisamment d'espace pour le faire et si le déplacement est faisable sur le plan économique, ou encore si les terres en question n'ont pas de grande valeur économique ou culturelle). Le déplacement d'infrastructures grises peut également être bénéfique en réduisant l'incidence de la compression côtière, et de la perte d'habitats intertidaux qu'elle entraîne devant les défenses maritimes à cause de l'érosion. Souvent, un retrait peut à lui seul (sans autre intervention) réduire les aléas côtiers et peut être considéré comme une SFN, puisqu'il permet le rétablissement de l'habitat de la plaine inondable; il devrait donc être considéré de manière proactive (Saunders-Hastings et coll., 2020) (figure 1 *d*). Les stratégies de retrait peuvent également faciliter la mise en place de SFN en créant un espace supplémentaire entre les biens construits et la côte dans lequel incorporer des SFN. Les espaces disponibles convenables pour accueillir les infrastructures loin des aléas côtiers sont souvent limités et coûteux; cependant, ces coûts peuvent être équivalents aux coûts d'investissements pour aménager des infrastructures de protection côtière dans le cadre d'autres stratégies.

2.3 Intention derrière l'adaptation

L'adaptation, au sens utilisé dans le présent rapport, consiste à remplacer, à modifier ou à améliorer des infrastructures existantes par l'ajout de nouvelles caractéristiques et de nouveaux systèmes. Les personnes prenant des décisions peuvent choisir d'adapter au moyen des SFN les systèmes d'infrastructures grises existants, vieillissants ou peu performants, ou leurs composants, plutôt qu'opter pour d'autres défenses grises. Ainsi, l'adaptation au moyen des SFN offre une excellente occasion d'améliorer la performance ou l'intégrité des systèmes de GRI, tout en apportant d'autres avantages. Les avantages connexes sociaux, économiques et environnementaux des SFN constituent des arguments de poids pour adapter les infrastructures existantes de GRI au moyen des SFN. Ces autres avantages sont examinés plus en détail à la section 1.2.

Les possibilités d'adaptation d'infrastructures grises de GRI au moyen des SFN existent tout au long du cycle de vie des infrastructures de protection côtière. Elles peuvent survenir lorsqu'on envisage de construire de nouvelles infrastructures grises, de réparer, de modifier ou de remplacer des composants d'infrastructures grises existantes. L'adaptation au moyen des SFN est particulièrement pertinente lorsque le système en place est en fin de vie utile, lorsque le système ne protège plus adéquatement contre les aléas actuels, ou encore comme mesure préventive face à l'augmentation des aléas futurs. La section 4.6 fournit de l'information complémentaire sur le moment d'exécuter l'adaptation.

Les sections suivantes décrivent des options de SFN possibles pour adapter les systèmes existants de GRI. Notamment, les adaptations pour la GRI peuvent nécessiter une combinaison de fonctions grises et vertes (également connues sous le nom de fonctions hybrides; voir la section 2.10), qui s'inscrivent ainsi dans le spectre gris-vert (voir la figure 1). Par exemple, il est possible de construire des récifs coralliens artificiels à partir de fondations en béton, ou encore d'incorporer des épis ou des clôtures de sable dans un système de plage. Chaque projet nécessitera une solution unique qui se situera dans une partie différente du spectre gris-vert et du paradigme protection-évitement-retrait-adaptation. Malgré cela, **l'adaptation doit viser à faire évoluer les systèmes de GRI vers l'extrémité verte du spectre des SFN, au moyen d'améliorations progressives de l'ensemble du système, en appliquant une approche aussi naturelle qu'il est raisonnablement et techniquement possible de faire, en maximisant les avantages connexes.**

2.4 Aperçu des options d'adaptation

Il existe diverses options en matière de SFN pour adapter les infrastructures de GRI existantes et atténuer les aléas côtiers. La présente section donne une vue d'ensemble des différents types de SFN qui pourraient convenir à cette fin. Puisqu'il existe de nombreuses options d'adaptation (selon l'emplacement, le contexte côtier, les infrastructures grises et l'habitat), la présente section propose une vue d'ensemble des options possibles en fonction des besoins particuliers d'un projet. Suedel et coll. (2021) offrent des guides d'aménagement détaillés et d'autres études de cas.

Plusieurs SFN peuvent être combinées et mises en œuvre en parallèle afin de répondre aux besoins du projet. Les SFN peuvent également inclure des composants d'infrastructure grise (tels que des épis ou des seuils rocheux) ou être adoptées dans le cadre de systèmes de GRI qui comprennent des ouvrages conventionnels d'ingénierie des travaux maritimes (p. ex. : des murs de protection et digues), et qui créent ainsi des systèmes hybrides (section 2.10). En outre, des options de SFN peuvent être appliquées en conjugaison avec diverses stratégies de gestion des risques, dont les stratégies de retrait (voir la section 2.2). L'échelle des projets peut varier, depuis les petits ouvrages privés jusqu'aux grands projets à l'échelle d'un quartier ou d'une région entière. Le choix des options de SFN appropriées doit tenir compte des particularités du projet, notamment les considérations administratives (p. ex. : contraintes de financement) et techniques (p. ex. : processus côtiers), qui sont examinées plus en détail aux chapitres 4 et 5, respectivement.

Les options en matière de SFN aux fins d'adaptation peuvent être réparties en six grandes catégories :

- les plages et dunes;
- les zones humides (y compris les marais, estrans et mangroves);
- les îles;
- la végétation terrestre côtière;
- les éléments naturels submergés (y compris les récifs, les herbiers de varech et la végétation submergée);
- les éléments hybrides.

La figure 2 résume brièvement les avantages de chacune des six grandes catégories de SFN pour la gestion des risques d'inondation. Chaque projet faisant appel à des SFN est différent, et les avantages que procurent ces solutions varient d'un emplacement à l'autre. La figure 2 vise donc à donner des indications générales sur les avantages que peut comporter chaque type d'adaptation au moyen des SFN. Il est également possible de déployer différents types de SFN en parallèle (p. ex. : îles et marais, Gailani et coll., 2021) de manière à maximiser les avantages propres aux différents types de SFN.

Figure 2. Résumé des avantages en matière de gestion des risques d’inondation de chaque option d’adaptation

	 Plages et dunes	 Zones humides et bas-fonds intertidaux	 Îles	 Végétation terrestre	 Éléments submergés	 Éléments hybrides
Niveaux maximums réduits des crues avec eaux calmes	○	?	?	○	○	?
Effets réduits des vagues (c.-à-d. les débordements)	✓	✓	✓	✓	?	?
Vitesses réduites ou détournement des eaux de crue	?	?	?	?	?	?
Durée réduite des inondations	?	?	○	?	○	?
Performance résiduelle après des épisodes d’inondation	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Résilience ou mesures d’urgence en cas de défaillance des infrastructures de GRI	?	✓	✓	✓	✓	?
Protection contre l’érosion	✓	✓	✓	✓	?	?
Meilleur apport en sédiments ou meilleure rétention	✓	✓	✓	✓	?	?

LÉGENDE

- Aucun avantage procuré
- ? Avantage occasionnel, selon les caractéristiques de conception
- ✓ Avantage procuré

La plupart des options de SFN agissent sur les vagues, les eaux de crue, les courants et les ondes de tempête (atténuation ou transformation) pour réduire les impacts de la GRI. L’atténuation des vagues consiste à réduire leur hauteur et leur énergie grâce à la friction lorsque les vagues passent sur le fond marin et à travers la végétation. La hauteur et l’énergie réduites des vagues diminuent leur potentiel d’érosion et d’inondation (le débordement des vagues). Les SFN atténuent les eaux de crue en les stockant et en améliorant le drainage, de manière à réduire la hauteur de crue et la durée des inondations. L’atténuation des ondes de tempête consiste à réduire les niveaux de ces ondes en diminuant leur énergie sur de grandes distances. En raison de la diversité des systèmes hybrides que comprend le spectre gris-vert, de nombreux avantages indiqués dans la figure 2 sont possibles, mais incertains. Les éléments hybrides qui se situent près de l’extrémité verte du spectre pourraient éventuellement fournir autant d’avantages que de véritables SFN.

Les six options de SFN pour l’adaptation sont décrites dans les sections 2.5 à 2.10 (ainsi que leurs avantages connexes potentiels). Une comparaison qualitative des coûts de conception, de construction et d’entretien pour chaque option est présentée à la section 2.11.

2.5 Plages et dunes

Les adaptations dont les SFN incluent des plages et dunes portent sur la préservation et l'amélioration des plages et dunes existantes ou sur l'élaboration de nouveaux systèmes, soit par une recharge artificielle en sédiments, soit en favorisant les processus naturels de sédimentation, soit encore en combinant les deux techniques. Les plages et dunes dissipent l'énergie des vagues et protègent ainsi contre les inondations et l'érosion causées par les vagues (Lodder et coll., 2021). Outre les avantages directs liés à l'atténuation des aléas côtiers, les plages et dunes peuvent également apporter toute une gamme d'avantages sociaux, économiques et environnementaux. Ces avantages connexes que procurent les SFN avec plages ou dunes varient d'un projet à l'autre; l'encadré 3 donne un aperçu des avantages connexes que procurent habituellement ces types de projets. Le document d'orientation intitulé *Avantages connexes* fournit une liste plus exhaustive des avantages potentiels des SFN, tandis que celui intitulé *Suivi de l'efficacité : Méthodes et indicateurs proposés* décrit en détail les méthodes de suivi et les indicateurs de performance suggérés pour les systèmes à plages et dunes.

Encadré 3. Exemples d'avantages connexes types que procurent les SFN avec plages et dunes

Environnementaux	Sociaux	Économiques
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Disponibilité et qualité des habitats terrestres et aquatiques ✓ Aires de repos et d'alimentation ✓ Cycle de l'eau 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Des espaces de loisirs et de rassemblement plus vastes ✓ Esthétique améliorée 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Augmentation du tourisme ✓ Réduction des coûts pour les infrastructures adjacentes (pertes causées par les inondations) ✓ Possibilités d'écotourisme
		

La recharge des plages et les dunes sont examinées plus en détail aux sections 2.5.1 et 2.5.2, respectivement. Les principaux points à retenir concernant ces deux types de SFN sont résumés dans l'encadré 4.

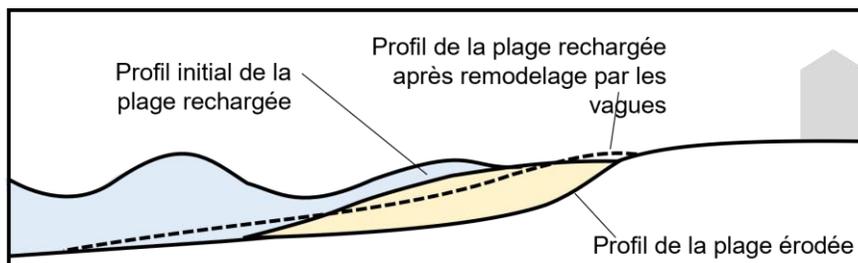
Encadré 4. Principaux points à retenir relativement à la recharge en sable des plages et dunes

	Les dunes et les recharges en sable sont des systèmes dynamiques et en constante évolution qui peuvent protéger contre l'érosion et les inondations, créer de nouveaux habitats et améliorer les activités récréatives et touristiques.
	Les SFN avec dunes et recharges en sable comprennent un dépôt de sédiments, la plantation de végétaux indigènes et l'élimination des espèces envahissantes.
	Il est important de bien sélectionner les végétaux à planter sur les dunes et d'éviter les effets négatifs de la recharge en sable sur les habitats existants.
	Une plage suffisamment large pour y transporter des sédiments et un espace de développement suffisant pour la croissance des dunes sont nécessaires. De nombreux guides techniques d'aménagement sont déjà disponibles.
	Il importe de comprendre la dynamique côtière locale. Une gestion adaptative est à prévoir.
	Des contrôles stricts de l'accès du public ainsi que du piétinement de la végétation et de la structure des dunes seront nécessaires pour préserver les systèmes et habitats dunaires.

2.5.1 Recharge en sable

La recharge en sable consiste à ajouter des sédiments (il peut s'agir de sable, de gravier, de galets ou de cailloux) à la plage, à l'avant-plage, aux rives des chenaux ou au delta extérieur (figure 3); elle est devenue l'un des moyens préférés d'atténuation des aléas côtiers en Amérique du Nord. Cette méthode a été choisie dans plusieurs endroits, notamment à Miami, aux États-Unis, où le projet de lutte contre l'érosion des plages du comté de Miami-Dade est en cours depuis 1975 (MD County, 2010). Des conseils détaillés sur les méthodes et les techniques de recharge en sable peuvent être trouvés dans Dean (2002) et Dean et Dalrymple (2010). L'objectif de la recharge est de rétablir le bilan sédimentaire en faveur de l'accumulation plutôt que de l'érosion, souvent en cherchant à contrer des activités adjacentes qui auraient réduit l'approvisionnement en sédiments et à accroître la stabilité du système (Lodder et coll., 2021). Les sédiments sont soit directement appliqués sur la plage ou sur le système dunaire (d'un seul coup ou par étapes), soit disposés de manière à être transportés le long de la plage sous l'effet de la dérive littorale (p. ex., de Schipper et coll., 2016). Bien que l'érosion puisse toujours se produire (en particulier dans les zones présentant des déficits sédimentaires), la plage s'en trouve souvent élargie et surélevée, ce qui exerce un effet tampon contre les forces d'érosion. Les plages qui présentent une gamme de substrats (dont les plages sableuses, rocheuses et de cailloux) peuvent bénéficier de la recharge en sable (Lodder et coll., 2021).

Figure 3. Recharge d'une plage pour réduire l'érosion



Ce qui advient des sédiments déposés dépend fortement du site en question, et il faut habituellement comprendre l'hydrodynamique et le régime de transport des sédiments propres à la zone pour estimer les bilans de sable et prédire le déroulement du projet à long terme (Wilmink et coll., 2017). Le type, la taille et la distribution des matériaux sédimentaires utilisés pour recharger une plage sont également d'une importance cruciale et varient d'un projet à l'autre. Des matériaux de mauvaise taille peuvent favoriser l'érosion et avoir des effets négatifs sur les valeurs écologiques du site ainsi que sur son utilisation par le public. Par exemple, la recharge d'une plage dans la péninsule de Hel, en Pologne, a échoué par suite de l'érosion du matériau à granulométrie fine dragué dans une baie voisine et déposé sur la plage (Hanley et coll., 2014). Dans ce cas, il aurait été préférable d'utiliser du sable grossier récupéré au large et semblable au sable originel de la plage (Hanley et coll., 2014). Même avec des matériaux de bonne taille, le remplacement d'une partie des sédiments mis en place doit être envisagé (de Schipper et coll., 2016) et pris en compte dans la planification (p. ex. : pour s'assurer que les bonnes ressources seront disponibles) et dans la gestion adaptative du projet. L'étude de cas 1 décrit un exemple de projet de recharge réussi à Cancún, au Mexique, dans le cadre duquel une approche de gestion adaptative a été adoptée après la construction. Voir la section 5.5 pour plus d'informations sur la gestion adaptative.

Des approches hybrides favoriseront l'accumulation des sédiments ou leur durée de résidence, tout comme les caps submergés ou émergents, l'utilisation d'éléments construits, tels que des épis, ou encore les clôtures de sable pour améliorer cette accumulation en modifiant l'hydrodynamique riveraine, et par conséquent, les formes de transport des sédiments. Les approches vertes, comme la plantation de végétaux et l'amélioration des herbiers marins, peuvent aussi réduire l'érosion et promouvoir l'accumulation (Chen et coll., 2022). Les projets de recharge des plages qui intègrent ces stratégies d'accumulation (p. ex. : la plantation de végétaux ou une combinaison d'herbiers marins et de dépôt de sédiments) ont eu une plus longue durée de vie et plus de succès sur le plan de l'accumulation de sable et de la réduction de l'érosion des matériaux déposés (Chen et coll., 2022).

Il faut aussi tenir compte des incidences écologiques quand on planifie des projets touchant les plages. L'extraction de sédiments de recharge depuis la zone d'emprunt peut perturber la faune et les habitats qu'elle abrite. Pareillement, la végétation, la faune et l'habitat déjà présents sur la plage qui doit être rechargée peuvent aussi être affectés (p. ex., Peterson et Bishop, 2005). À titre d'exemple, la recharge des plages dans les aires de ponte des tortues peut nuire à la nidification et à l'éclosion, peut-être à cause de changements dans la couleur et la taille des grains des sédiments (Brock et coll., 2009). Les travaux de « méga-recharge » comptent souvent sur les avantages d'une seule recharge massive en matière de temps de rétablissement du système, comparativement à de multiples recharges plus fréquentes (Lodder et coll., 2021).

La recharge en sable constitue un moyen de protection du littoral fréquemment utilisé à l'échelle mondiale; aussi est-elle l'objet de nombreux guides techniques d'aménagement. Par exemple, les lecteurs sont invités à consulter les guides *International Guidelines on Natural and Nature-based*

Features for Flood Risk Management (Lignes directrices internationales sur les caractéristiques naturelles et fondées sur la nature dans la gestion des risques d'inondation; Bridges et coll., 2021) ou *Coastal Engineering Manual* (Manuel des travaux maritimes; USACE, 2002) pour des guides techniques d'aménagement. Des contraintes techniques propres au site doivent généralement être prises en compte pour assurer le succès d'un projet de recharge. Ces contraintes comprennent (Lodder et coll., 2021) :

- la disponibilité des sédiments;
- la taille et la granulométrie des sédiments;
- la pente de la plage;
- la hauteur du profil;
- le volume de sédiments;
- la largeur de la plage;
- les structures de régulation (p. ex. : les épis);
- les types d'habitats;
- le régime des vagues.

Comme le décrit la section 5.1, certains systèmes se situent au-delà des directives techniques standards et des limites des équations empiriques, et exigent le recours à des modèles numériques ou physiques ou encore à des projets pilotes pour éclairer, affiner ou valider la conception (Fonds mondial pour la nature, 2016). Les modèles numériques géomorphologiques tels que LITPACK, GenCADE, XBeach, XBeach-G, MIKE 21/3 ST/SM (SDT/SM : transport de sédiments/morphologie du littoral) et Delft3D sont d'usage courant dans le cadre de projets de recharge en sable pour évaluer la stabilité des sédiments mis en place, lors de tempêtes ponctuelles et à long terme. Ils permettent d'évaluer l'incidence des activités humaines (p. ex. : le dragage) et de déterminer le besoin potentiel de futurs travaux d'entretien. Voir le chapitre 5 pour plus d'informations sur les considérations d'aménagement.

Étude de cas 1. Recharge en sable d'une plage à Cancún

Recharge en sable d'une plage à Cancún

Cancún (Quintana Roo)

Stabilisation d'une plage après érosion

Mexique

Les plages de Cancún sont sujettes à l'érosion due à l'action des vagues, et cette tendance s'est intensifiée au cours des dernières décennies dans la foulée d'une série d'ouragans et de tempêtes. Au début des années 2000, l'érosion s'est aggravée par suite d'une construction dense d'hôtels et l'élimination d'éléments naturels, comme les mangroves et les dunes le long de la côte, ce qui a favorisé la perte de sédiments. Étant donné l'importance économique du tourisme pour la région, des travaux pour rétablir les plages et les protéger contre l'érosion ont été entamés.

La recharge des plages de Cancún a commencé en 2006, avec la mise en place de 2,7 millions de mètres cubes de sable prélevés dans deux bancs de sable voisins, au coût de 19 millions de dollars US (Martell et coll., 2020). Ces premiers travaux ont précédé de peu l'ouragan Dean, en 2007. Cette tempête a considérablement endommagé et érodé la plage, a enlevé une grande partie des matériaux déposés et a créé d'énormes escarpements de plage.

Des activités de surveillance ont eu lieu de 2006 à 2009 pour comprendre les courants, le transport et la dynamique d'accumulation le long de la côte. Après ces travaux, une seconde recharge a eu lieu en 2010 en tenant compte des connaissances acquises. Cette seconde recharge a vu le placement de 5,2 millions de mètres cubes de sédiments plus compatibles sur la plage, et l'installation d'un épi et d'un brise-lames pour empêcher le transport du sable vers la mer (Martell et coll., 2020).

Après cette deuxième tentative de recharge en 2010, le projet a d'abord semblé voué à l'échec à la suite d'une forte érosion qui avait réduit la largeur de la plage et laissé d'imposants escarpements. Cependant, dès 2013, le forçage des vagues et les marées avaient naturellement modifié ces escarpements, qui formaient désormais une pente douce d'une largeur stable d'environ 30 mètres. Le système de plage est resté stable et, en 2020, aucune autre recharge ne paraissait nécessaire. Toutefois, la zone reste vulnérable aux ouragans, et il faut s'attendre à ce que de nouvelles recharges soient nécessaires dans l'avenir après de fortes tempêtes (Martell et coll., 2020).

Figure 4. Imagerie par satellite de la plage en 2009 avant la recharge (à gauche), et 10 ans plus tard en 2020 (à droite), après la fin des travaux de recharge



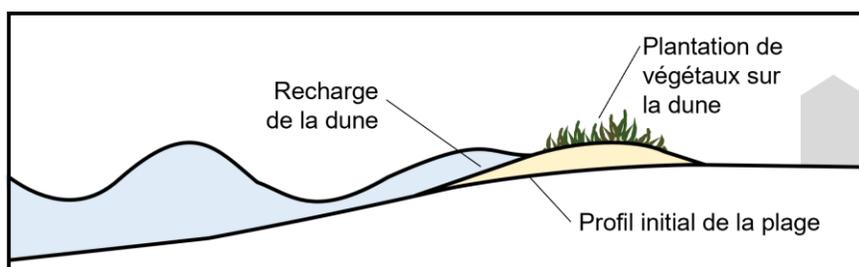
Source : Google Earth, 2022

2.5.2 Dunes

Les dunes sont des systèmes dynamiques qui se situent au-delà des limites de l'action régulière des vagues. Elles peuvent grossir, diminuer, se remodeler, changer avec les saisons, être l'objet de recharges naturelles ou artificielles, et s'adapter aux changements climatiques. Elles constituent une barrière physique contre les inondations et dissipent l'énergie des vagues, de manière à réduire l'érosion. Elles se forment par le transport de sédiments par le vent et les vagues; ces sédiments se trouvent souvent piégés par la végétation ou d'autres éléments rugueux situés sur les dunes. Les dunes dépendent d'un apport adéquat en sédiments, et de vitesses du vent suffisantes ou de vagues pour transporter les sédiments sur leur crête (Lodder et coll., 2021).

La restauration ou l'établissement de dunes se fait généralement par une combinaison de recharge en sédiments, de plantation de végétaux indigènes et d'élimination des espèces envahissantes, en vue d'accroître la stabilité des dunes et de favoriser l'accumulation des sédiments (figure 5). Un accès restreint des piétons permet également de prévenir l'aplatissement des dunes ainsi que la perte de leur structure et de leur végétation (p. ex., Šile et coll., 2017).

Figure 5. Établissement d'une dune pour mieux protéger contre les inondations



La création et la restauration de dunes nécessitent des techniques différentes en fonction des besoins particuliers du site. Les dunes bien conçues peuvent s'accumuler naturellement au fil du temps et assurer une protection du littoral à long terme et naturellement adaptable, qui exige peu d'entretien complémentaire (p. ex., Maun et Fahselt, 2009). Il importe de consulter une équipe pluridisciplinaire de spécialistes qui connaissent bien l'environnement local (voir les chapitres 4 et 5) et de suivre une méthode de gestion adaptative (voir la section 5.5). L'étude de cas 2 décrit un exemple de projet de restauration de dunes qui a permis de réduire les effets des tempêtes. Les systèmes dunaires hybrides constituent une autre option. Par exemple, un système dunaire pourrait être établi contre une digue ou un mur de protection existant et finir par recouvrir cette structure (p. ex., van Loon-Steensma et coll., 2014). La section 2.10 présente de l'information plus détaillée sur les systèmes hybrides.

Les lignes directrices internationales de l'*United States Army Corps of Engineers* (USACE, Corps des ingénieurs de l'armée des États-Unis) comprennent des considérations techniques détaillées sur la conception des dunes (Lodder et coll., 2021). Voici un aperçu des facteurs généraux à prendre en compte dans la conception des systèmes dunaires (Lodder et coll., 2021) :

- Le type de végétation, l'élimination des espèces non indigènes, la succession ainsi que les besoins en matière de plantation de végétaux, d'arrosage, de fertilisation et d'apport adéquat d'embruns salins;
- Une plage de sable suffisamment large pour favoriser le transport des sédiments par le vent (> 100 m entre le niveau moyen de la mer et le pied de la dune);
- De l'espace pour permettre la croissance et l'évolution des dunes;
- Les effets de l'énergie des vagues et du vent sur le transport, le dépôt et l'érosion des sédiments.

Ces considérations de conception sont importantes pour la réussite d'un projet. En effet, certains projets de création de dunes ont subi des retraits et de l'érosion. Dans une étude portant sur plusieurs projets d'aménagement de dunes, Morris et coll. (2018) ont constaté que les dunes construites près de la mer (p. ex. : selon l'approche de protection) subissent souvent de l'érosion, tandis que celles aménagées plus loin (p. ex. : selon l'approche du retrait) grossissent, même pendant les tempêtes. Les dunes peuvent se rétablir et grossir naturellement (p. ex., Maun et Fahselt, 2009), et certains projets étudiés, marqués d'abord par une érosion, se sont néanmoins rétablis pour ensuite grossir suivant l'érosion initiale (Morris et coll., 2018).

Étude de cas 2. Restauration de dunes dans le New Jersey

Restauration des dunes dans la réserve South Cape May Meadows

Cape May
(New Jersey),
États-Unis

Restauration des dunes pour mieux résister aux tempêtes

Cape May, petite collectivité du New Jersey, aux États-Unis, est sujette aux inondations et à l'érosion côtière causées par les tempêtes et les ouragans. Dans la foulée d'une série de tempêtes survenues à la fin des années 1990, les autorités locales ont organisé des discussions pour trouver des solutions et réduire les risques et dommages causés par les inondations.

En 2007, une combinaison de stratégies SFN a été mise en œuvre dans la réserve naturelle de South Cape May Meadows. Elle comprenait la restauration des dunes et la recharge en sable de la plage pour protéger l'agglomération et améliorer l'habitat côtier. Il a fallu 1,4 million de mètres cubes de sable pour restaurer un système de dunes de 1,6 km de long et d'une hauteur de 5 m, au coût de 15 millions de dollars US (Naturally Resilient Communities, 2022a).

Le projet a été couronné de succès et a protégé la collectivité lors de l'ouragan Sandy, en 2012. En effet, le système de dunes et de plage restauré a permis d'éviter les inondations. Avant la réalisation de ce projet au moyen des SFN, le montant moyen d'une demande d'indemnisation après sinistre à Cape May s'élevait à environ 144 000 \$ US (Naturally Resilient Communities, 2022a). Après l'achèvement du système dunes-plage et l'ouragan Sandy, les demandes d'indemnisation pour dommages causés par les inondations ont diminué à environ 4 000 \$ US. On estime qu'au cours des 50 prochaines années, les économies réalisées par suite de la réduction des demandes d'indemnisation seront de l'ordre de 9,6 millions de dollars US (Naturally Resilient Communities, 2022a).

Figure 6. Projet de plage et de dune achevé à South Cape May Meadows



Source : The Nature Conservancy, 2022

Outre les avantages du projet au chapitre de la GRI, d'autres avantages connexes ont été observés, comme l'augmentation du nombre d'oiseaux migrateurs qui utilisent la zone comme aire de repos et d'alimentation (The Nature Conservancy, 2022). Pour en savoir plus, voir Naturally Resilient Communities (2022a) : nrcsolutions.org/south-cape-may-meadows-cape-may-point-new-jersey/.

2.6 Zones humides

Les zones humides côtières comprennent les marais salins, saumâtres et d'eau douce, les estrans sableux et vaseux et les mangroves. Ces écosystèmes de zone humide côtière fournissent une multitude de services écosystémiques et permettent d'atténuer les aléas côtiers, tels que les ondes de tempête, les vagues de débordement ainsi que les inondations et l'érosion côtières. Les zones humides peuvent atténuer les inondations en stockant et en drainant les eaux de crue, car elles constituent une zone inondable. La végétation semi-submergée des zones humides, comme les forêts de palétuviers dans les mangroves, joue également un rôle clé dans la réduction de l'érosion et des inondations en atténuant les vagues. La végétation des zones humides stabilise le littoral et favorise l'accumulation de sédiments pour réduire l'érosion (Piercy et coll., 2021). Outre leurs bienfaits sur le plan de la GRI, les zones humides offrent de multiples avantages connexes; l'encadré 5 présente plusieurs avantages que procurent habituellement les zones humides. Cependant, l'évaluation des avantages connexes doit se faire projet par projet. Le document d'orientation intitulé *Avantages connexes* contient plus d'information sur les autres avantages connexes potentiels. En outre, le document intitulé *Suivi de l'efficacité : Méthodes et indicateurs proposés* décrit en détail les méthodes de suivi et indicateurs de performance pour les zones humides.

Encadré 5. Exemples d'avantages connexes typiques que procurent les SFN en zones humides

Environnementaux	Sociaux	Économiques
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Disponibilité et qualité de l'habitat aquatique ✓ Abondance et diversité d'espèces végétales et animales indigènes ✓ Stockage et qualité de l'eau ✓ Séquestration du carbone 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Espaces de loisirs et de rassemblement plus vastes ✓ Esthétique améliorée 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Augmentation du tourisme ✓ Réduction des coûts pour les infrastructures adjacentes (pertes causées par les inondations) ✓ Possibilités d'écotourisme 

Les stratégies de mise en œuvre des SFN en zones humides s'étendent de la conservation des systèmes existants à la restauration des systèmes dégradés, ainsi que la création de nouveaux milieux. Souvent, on opte pour un système hybride en créant ou en restaurant un milieu humide devant une infrastructure grise déjà en place, comme une digue ou un mur de protection (voir la section 2.10).

Comme pour les autres types de SFN, la conception et la sélection d'une solution convenable fondée sur une zone humide comprennent l'évaluation des considérations propres au site. Il existe de nombreux guides d'aménagement relatifs aux milieux humides, en particulier ceux des climats tempérés. Les lignes directrices internationales de l'*United States Army Corps of Engineers* (USACE, Corps des ingénieurs de l'armée des États-Unis) fournissent un aperçu complet des considérations techniques d'aménagement (Piercy et coll., 2021). Voici un résumé des facteurs généraux à prendre en compte :

- Le choix d'un emplacement approprié en fonction du problème (p. ex. : zone humide intérieure, non soumise aux marées, ou zone humide côtière, soumise aux marées);
- La géomorphologie propre au site, comme l'élévation, la forme et l'ordre des chenaux de marée (p. ex., Odell et coll., 2008);
- Les caractéristiques du littoral et des tempêtes;

- Les facteurs et processus environnementaux, tels que l'hydrologie, les marées, les vagues, le transport des sédiments et le type de sol;
- Le couvert végétal, le type de végétation et le besoin d'éliminer les espèces envahissantes.

Les marais et les estrans sont abordés brièvement dans la section 2.6.1, et les mangroves sont abordées séparément dans la section 2.6.2. Les principaux points à retenir concernant les systèmes de zone humide sont résumés à l'encadré 6.

Encadré 6. Principaux points à retenir relativement aux SFN en zones humides

	Les zones humides côtières comprennent les marais salins, saumâtres et d'eau douce, les estrans sableux et vaseux ainsi que les mangroves. Elles protègent contre l'érosion et les inondations et procurent de nouveaux habitats et de meilleurs avantages récréatifs et touristiques. Toutefois, leur taille compte pour ce qui est de réduire les risques d'inondation et d'assurer le bon fonctionnement du système.
	La restauration des zones humides se fait en favorisant l'inondation naturelle des terres (souvent par l'ouverture de brèches dans les digues et les levées) ou en élevant les terres basses existantes à des niveaux appropriés, en déposant des sédiments, en plantant de la végétation indigène et en éliminant les espèces envahissantes.
	La salinité, l'hydrologie (p. ex. le drainage), le transport des sédiments et le type de sol sont autant de facteurs clés à prendre en compte pour une implantation réussie de la végétation.
	Les marais salins se forment généralement dans des zones intertidales tempérées et peu profondes, à faible énergie, protégées des vagues et bénéficiant d'un apport continu de sédiments. Les mangroves poussent dans des eaux salées et saumâtres des régions tropicales et subtropicales.
	Il est important de comprendre la dynamique côtière locale pour favoriser l'accumulation de sédiments et la croissance de la végétation. Une gestion adaptative est à prévoir.

2.6.1 Marais et estrans

Les marais sont plus répandus dans les régions tempérées. Les marais des régions côtières et intérieurs comprennent les marais d'eau douce, d'eau salée et d'eau saumâtre. Ce sont des milieux végétalisés qui existent principalement dans les zones intertidales. Les graminées et les joncs y prédominent, mais les types de végétations dépendent notamment du climat, de la salinité et du drainage. Les estrans sont des composantes intertidales non végétalisées de ces systèmes, adjacents aux marais (Piercy et coll., 2021). Les marais salins peuvent procurer d'importants avantages sur le plan de l'atténuation des vagues et de la stabilisation du littoral (Shepard et coll., 2011; van Loon-Steensma, 2015). La végétation à moitié ou entièrement submergée des marais aide à piéger les sédiments et à dissiper l'énergie des vagues; elle stabilise le rivage, réduit la hauteur et l'énergie des vagues, et atténue l'érosion ainsi que les inondations provoquées par les vagues (p. ex., Barbier et coll., 2011; Duarte et coll., 2013).

Les estrans permettent de dissiper l'énergie des vagues et le transport des sédiments en ralentissant la vitesse de l'eau qui les traverse et en favorisant le dépôt des sédiments (Piercy et coll., 2021). Des recherches récentes laissent également croire que les sédiments pourraient s'accumuler dans les estrans sous l'effet de processus biogènes (Readshaw et Williams, 2022). Les zones humides ont également le

potentiel d'être autosuffisantes et de gagner en élévation à mesure que monte le niveau de la mer, grâce à l'accumulation naturelle continue de sédiments (p. ex., Kirwan et Megonigal, 2013).

Les marais permettent aussi d'atténuer les inondations en stockant l'eau et en facilitant le drainage des eaux de crue; ils réduisent ainsi le temps de rétablissement après les inondations et les ondes de tempête (Piercy et coll., 2021). À cet égard, il a été constaté que les pertes financières liées aux inondations provoquées par les grands ouragans aux États-Unis étaient beaucoup moins grandes dans les endroits qui comprennent des zones humides (Costanza et coll., 2008). L'étude de cas 3 décrit un projet de restauration de marais réalisé pour atténuer les inondations à répétition dans une région de l'Oregon, aux États-Unis.

Étude de cas 3. Restauration d'une zone humide en Oregon

Projet de réduction des inondations et de restauration d'habitat dans le couloir d'écoulement sud :

Restauration d'une zone humide pour réduire les dommages causés par les inondations

Baie de Tillamook
(Oregon),
États-Unis

Le comté de Tillamook, à l'ouest de Portland (Oregon), a connu des inondations saisonnières à répétition qui ont endommagé des propriétés, des terres agricoles, une autoroute et une voie ferrée (FEMA, 2021). Selon les estimations, les pertes liées aux inondations dans ce comté se sont élevées à plus de 60 millions de dollars entre 1996 et 2000 (FEMA, 2021). Les ondes de tempête hivernales, les fortes pluies (NOAA, 2021), les incendies et la déforestation ont aggravé les inondations, étant donné le débit des rivières et leur teneur en sédiments supérieurs à la normale (FEMA, 2021).

À la suite d'inondations saisonnières répétées et d'une forte tempête en 2006 (qui a entraîné des inondations, de l'érosion et des glissements de terrain), 24 organismes communautaires, locaux, d'État et fédéraux ont fait équipe en 2007 pour restaurer un marais en vue d'atténuer les effets des inondations dans la ville de Tillamook (Shaw et Dundas, 2021).

La construction a commencé en 2016, après la conclusion d'accords d'achat et de servitudes visant l'acquisition des terres agricoles environnantes pour les inonder. Les travaux comprenaient le retrait de 8 km de levées et de 15 aboiteaux, qui ont été remplacés par de nouveaux aboiteaux installés plus loin de la mer (Shaw et Dundas, 2021). L'endroit a ainsi été exposé aux inondations et à la force des marées, ce qui a permis la reconstitution d'un marais d'une superficie de 180 hectares. On a aussi raccordé 18 chenaux de marée au fleuve pour améliorer encore l'habitat de zone humide.

Figure 7. Marais restauré dans la baie de Tillamook



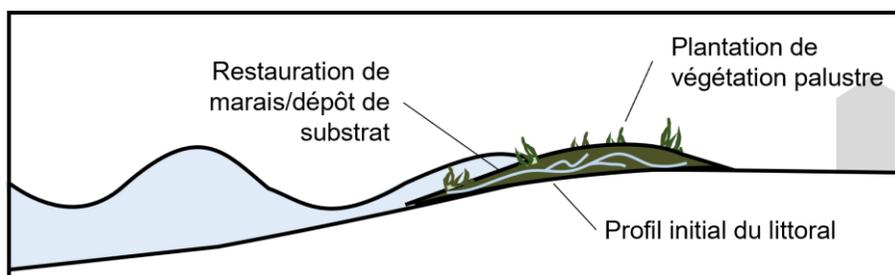
Source : Tillamook Estuaries Partnership, 2021

La modélisation a projeté une forte réduction des dommages causés par les inondations grâce à la restauration du marais (Shaw et Dundas, 2021) : on estime à 9,2 millions de dollars les économies au titre des dommages dus aux inondations au cours des 50 prochaines années (NOAA, 2021). Les avantages connexes complémentaires du projet comprenaient la création de 108 emplois, la réduction des besoins en dragage, l'amélioration de la qualité de l'eau et le stockage de 25 000 tonnes de carbone bleu (Shaw et Dundas, 2021).

Les SFN axées sur les marais et les zones intertidales peuvent inclure la conservation de marais existants, la restauration de marais dégradés ou la création de nouveaux marais, ce qui rend ces solutions très compatibles avec les activités d'adaptation. Il existe de nombreuses méthodes différentes pour restaurer et créer des zones humides; elles varient d'un projet à l'autre. Les marais salins se forment généralement dans des zones intertidales peu profondes, à faible énergie, protégées des vagues et bénéficiant d'un apport continu de sédiments (Jordan et Fröhle, 2022). La restauration et la création de marais s'effectuent généralement selon une combinaison des facteurs suivants :

- la replantation de la végétation indigène et l'élimination des espèces envahissantes;
- le dépôt de sédiments;
- l'ouverture de brèches dans les levées ou digues pour permettre l'inondation de terres auparavant protégées;
- des mesures visant à réduire l'action des vagues;
- des mesures favorisant l'accrétion des sédiments (p. ex., van Loon-Steensma et Vellinga, 2013).

Figure 8. Restauration d'un marais pour mieux protéger contre les inondations



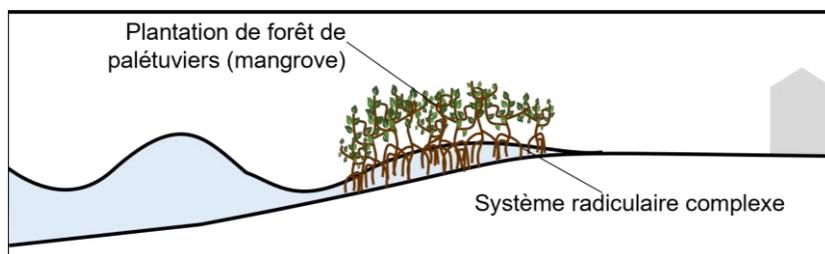
Malgré l'utilisation fréquente des systèmes de marais dans le cadre de projets de SFN et de restauration en général, les aménagements sont étroitement liés aux sites. Par conséquent, l'aménagement repose souvent sur l'utilisation de marais « analogues », c'est-à-dire des marais aux caractéristiques physiques semblables à celles du site à l'étude, pour déterminer la taille et la longueur des chenaux ainsi que les élévations et les pentes relatives à la surface des marais. Souvent, l'équipe du projet simulera des chenaux préliminaires pour déterminer l'acheminement des flux de marée et analyser l'évolution naturelle des chenaux (plutôt que d'essayer de prédire la forme et le caractère définitifs des chenaux). Odell et coll. (2008) ont décrit ce processus de conception en détail. Les projets axés sur les marais ont également tendance à s'appuyer fortement sur la gestion adaptative pour gérer les incertitudes après la construction. Des modèles numériques sont parfois utilisés pour confirmer l'hydrodynamique et le transport des sédiments, mais rarement des modèles physiques. Voir le chapitre 5 pour en savoir plus sur les considérations en matière d'aménagement.

2.6.2 Mangroves

Les mangroves sont des forêts constituées d'arbustes ou d'arbres qui vivent dans les eaux salées ou saumâtres le long des côtes et estuaires des régions tropicales et subtropicales (figure 9); dans le contexte nord-américain, cette solution peut être utile au Mexique et dans le sud des États-Unis. Dans les bonnes conditions, le rétablissement des mangroves (dont les palétuviers sont l'espèce dominante) est attendu, de même que leur adaptation aux changements climatiques (Gedan et coll., 2011). Elles constituent donc une option résiliente, adaptative et naturellement persistante pour la protection des littoraux qui pourront croître et maintenir leur fonctionnalité au fil du temps, malgré l'augmentation des risques. Le système racinaire au-dessus du sol des palétuviers atténue l'énergie des vagues pour piéger et stabiliser les sédiments, de manière à réduire l'érosion (p. ex., Gijsman et coll., 2021). La capacité des mangroves à dissiper l'énergie des vagues et à stocker l'eau s'est également révélée efficace pour réduire les

inondations dues aux ondes de tempête (Montgomery et coll., 2019). Un exemple de projet SFN axé sur les mangroves est décrit dans l'étude de cas 4.

Figure 9. Plantation d'une mangrove pour mieux protéger contre les inondations



La création ou la restauration réussie d'une mangrove dépend des éléments suivants (adapté de Balke et coll., 2011) :

- Une période suffisante sans inondation pour que les plantes puissent s'enraciner dans le sol et que les graines puissent germer;
- La croissance des racines à une profondeur suffisante qui permettra à la végétation de rester en place sous l'effet des vagues et des courants et de la perte de sédiments;
- Des conditions convenables (salinité, hydrologie, marées, milieux à faible énergie des vagues, transport de sédiments et type de sol).

Comme pour les marais, les systèmes de mangrove sont souvent mis en place en fonction de systèmes « analogues » établis qui présentent des caractéristiques physiques semblables à celles du site à l'étude. L'apport de nutriments appropriés au sol et la présence de chenaux de marée (pour favoriser le renouvellement de l'eau) sont d'une importance capitale. La restauration des mangroves repose sur un autre élément clé : la protection des jeunes plants contre l'érosion, la prédation, les courants et l'exposition aux vagues. Il est courant pour les projets de mangrove de s'appuyer fortement sur la gestion adaptative pour gérer les incertitudes après la construction. Le chapitre 5 décrit d'autres considérations générales d'aménagement relatives aux SFN. Des guides d'aménagement plus précis relatifs aux mangroves peuvent être trouvés dans Balke et coll. (2011) et Teutli-Hernández et coll. (2020).

Étude de cas 4. Expansion des mangroves de Mayakoba

Expansion des mangroves de Mayakoba

Intégration de mangroves dans une zone urbaine

Playa del Carmen
(Quintana Roo),
Mexique

Le Mexique compte près d'un million d'hectares de mangroves (forêts de palétuviers) le long des côtes du golfe, des Caraïbes et du Pacifique. La plupart de ces écosystèmes se trouvent sur la côte du golfe, dans la péninsule du Yucatán, région qui attire beaucoup de touristes. La zone côtière de l'État du Quintana Roo, dans les Caraïbes mexicaines, a connu une croissance accélérée ces dernières décennies en raison du développement du tourisme. L'expansion des infrastructures touristiques et l'étalement urbain ont entraîné la disparition de vastes zones de mangrove dans les Caraïbes mexicaines (Chávez et coll., 2021).

L'aménagement de l'hôtel et du terrain de golf de Mayakoba a été conçu comme une réponse au développement touristique à haute densité dans la région : une infrastructure respectueuse de l'environnement a été proposée afin de préserver la biodiversité (Mayakoba, 2020). Le projet Mayakoba se trouve dans un système de mangrove dégradé, qui a maintenant été restauré et qui sert de solution fondée sur la nature (SFN) pour lutter contre les inondations côtières dans la région.

La restauration d'une superficie de 60 hectares de mangrove comprenait la construction de chenaux et de ponceaux pour améliorer l'hydrologie et réduire la salinité, éléments qui favorisent le rétablissement naturel des mangroves. En outre, la végétation de la mangrove a été restaurée en plantant 15 000 propagules de palétuviers d'Amérique. Les mangroves restaurées font l'objet d'une surveillance et d'un entretien continu, notamment en ce qui concerne la qualité de l'eau, l'enlèvement d'objets qui entravent l'écoulement de l'eau, le contrôle de la végétation aquatique et l'enlèvement des sédiments (Mayakoba, 2020).

Figure 10. Chenal artificiel dans le système de mangrove restauré



Source : Mayakoba, 2020

Les zones de mangrove restaurées assurent aujourd'hui une meilleure protection côtière pour cet aménagement touristique. Les avantages connexes du projet comprennent une meilleure qualité de l'eau et une plus grande biodiversité, en particulier pour ce qui est des oiseaux, des poissons et des amphibiens, le nombre d'espèces dans cette zone étant passé de 35 à 200 (Mayakoba, 2020).

2.7 Îles

La construction d'une île consiste à créer une nouvelle terre séparée du littoral, ce qui peut être fort coûteux. Cela comprend habituellement l'apport d'un volume substantiel de matériaux de remblayage et exige souvent la protection de certaines parties des rives de l'île à l'aide de matériaux gris. Les îles servent principalement à dissiper l'énergie des vagues, ce qui réduit l'érosion et l'intensité des ondes de tempête. Elles constituent une bonne solution de remplacement là où il y a peu d'espace disponible pour d'autres solutions intertidales ou terrestres. Elles font souvent office de ligne de défense complémentaire

devant la côte. Les îles comprennent souvent une combinaison d’autres types de SFN, telles que des systèmes plage-dunes ou des marais salins (voir l’étude de cas 5 pour un exemple de projet île-marais salin). Elles peuvent donc potentiellement procurer une gamme d’avantages et d’avantages connexes en matière de gestion des risques d’inondation (GRI).

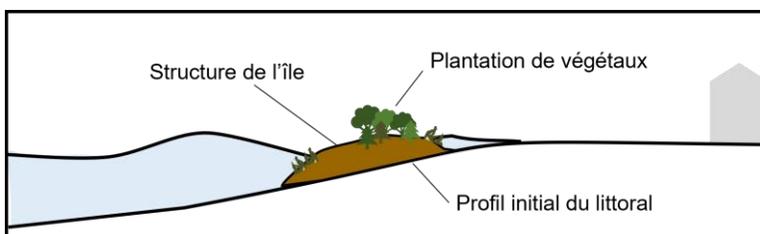
L’encadré 7 présente les avantages connexes que procurent généralement les îles. Les projets de cette nature peuvent aussi comporter de nombreux avantages complémentaires, en particulier quand les îles sont combinées avec d’autres stratégies de SFN, comme les zones humides. Il convient donc de déterminer et d’évaluer les avantages connexes au cas par cas. Le document d’orientation intitulé *Avantages connexes* fournit une description détaillée des avantages connexes potentiels des SFN. En outre, le document intitulé *Suivi de l’efficacité : Méthodes et indicateurs proposés* décrit les méthodes de suivi et les indicateurs de performance recommandés pour les SFN axées sur les îles.

Encadré 7. Exemples d’avantages connexes typiques que procurent les SFN axées sur les îles

Environnementaux	Sociaux	Économiques
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Disponibilité et qualité de l’habitat aquatique ✓ Abondance et diversité des espèces végétales et animales indigènes 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Esthétique améliorée 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Augmentation du tourisme ✓ Réduction des coûts pour les infrastructures adjacentes (pertes causées par les inondations) 

Il est possible de créer ou de restaurer trois types d’îles : les îles-barrières, les îles deltaïques et les îles situées dans une baie ou un lac (Gailani et coll., 2021). Les îles-barrières ont une forme longue et étroite et sont parallèles à la côte. Elles mesurent généralement moins de 20 km de long et protègent contre les ondes de tempête, l’érosion et le débordement des vagues. Les îles situées dans une baie ou un lac ressemblent aux îles-barrières, mais elles se trouvent à l’intérieur d’une lagune ou d’une baie. Les îles deltaïques se forment à l’embouchure des fleuves par suite du dépôt de sédiments, qui créent des îles au sein d’un réseau de chenaux.

Figure 11. Structure insulaire pour protéger contre les inondations et réduire l’érosion



Pour que les îles se forment naturellement et persistent comme élément du littoral, l’énergie des vagues et l’apport en sédiments doivent être suffisants, et la zone intertidale doit être en pente douce (Gailani et coll., 2021). En outre, les îles ne sont généralement réalisables que là où l’amplitude des marées est faible ou modérée (p. ex. : Souris [Île-du-Prince-Édouard], Canada), ce qui pourrait limiter leur applicabilité dans les régions où l’amplitude des marées est exceptionnellement élevée, comme dans certaines parties de la côte est du Canada. Les îles étant des systèmes en constante évolution, il faut

s'attendre à leur remodelage et à leur érosion continue par les processus côtiers, à moins de les protéger. Elles doivent donc être conçues de manière appropriée en tenant compte de la dynamique côtière locale. Par exemple, dans l'étude de cas 5, la conception de la deuxième phase du projet d'île a été moins réussie, et le projet a souffert de l'érosion et d'une capacité réduite à atténuer l'action des vagues. En raison de leur position au large du littoral et de leur nature dynamique, les îles exigent parfois une conception plus minutieuse et un degré plus élevé de gestion adaptative que les autres options de SFN. Il convient également d'accorder une attention particulière à l'emplacement des îles afin qu'elles n'aient pas d'impact sur les habitats sublittoraux existants. Il importe en outre de noter que des baux de zone intertidale (ou d'autres permis spéciaux) peuvent être nécessaires pour y construire.

Gailani et coll. (2021) offrent des conseils de conception d'îles. La modélisation numérique, la modélisation physique ou les projets pilotes peuvent servir à éclairer, affiner ou valider le concept (Fonds mondial pour la nature, 2016). Les outils de modélisation numérique de l'hydrodynamique, du régime des vagues et de la géomorphologie sont également d'usage courant pour affiner l'emplacement, les pentes, les élévations ou le dimensionnement des matériaux à une étape ultérieure de la construction (Vouk et coll., 2021). D'autres considérations techniques liées à l'aménagement des SFN en général sont présentées au chapitre 5.

Les principaux points à retenir en ce qui concerne les îles sont résumés dans l'encadré 8.

Encadré 8. Principaux points à retenir relativement aux SFN axées sur les îles

-  Les îles protègent contre l'érosion et les ondes de tempête; elles peuvent aussi créer un nouvel habitat et offrir des possibilités de loisirs.
-  Les îles sont particulièrement utiles lorsqu'il y a peu d'espace disponible pour des solutions terrestres. L'emplacement doit être soigneusement étudié afin d'éviter tout effet négatif sur les habitats sublittoraux existants.
-  Les îles sont souvent utilisées en combinaison avec d'autres SFN (p. ex. : en combinaison île-marais salin).
-  Pour que les îles se forment et persistent comme élément du littoral, il faut un apport suffisant en sédiments, une pente douce et une énergie des vagues suffisante pour modeler les sédiments, faute de quoi des mesures de protection contre l'érosion seront nécessaires (Gailani et coll., 2021).
-  Il est probable que des travaux d'entretien, de surveillance et de gestion adaptative soient nécessaires à cause des processus côtiers auxquels ces systèmes seront exposés. Il est important de comprendre la dynamique côtière locale, et de planifier en conséquence, afin de minimiser l'érosion.

Étude de cas 5. Création d'îles en Floride

Projet Greenshores :

Réduction de l'impact des ondes de tempête et des inondations grâce à des îles

Pensacola
(Floride),
États-Unis

La ville de Pensacola se trouve à l'extrémité nord-ouest de la Floride, sur la côte du golfe du Mexique. La région est sujette à l'érosion côtière, étant exposée à de fortes vagues et aux ondes de tempête générées par les ouragans et les tempêtes tropicales. Pensacola a subi des dommages aux biens et aux infrastructures publiques et vient au huitième rang parmi les pires endroits pour les ouragans aux États-Unis (Naturally Resilient Communities, 2022b).

Le projet Greenshores vise à corriger cette situation. Il s'agit d'un programme de restauration de l'habitat côtier en deux phases lancé en 2003. La première phase portait sur la création de cinq îles dans la baie de Pensacola à l'aide de sable dragué, et d'un brise-lames artificiel. De la végétation indigène a été plantée sur les îles pour créer un habitat palustre (Naturally Resilient Communities, 2022b). La première phase a été couronnée de succès : les îles ont réduit les inondations et l'érosion à Pensacola en atténuant les vagues. Elles ont rempli leur fonction à merveille en 2004 lorsque l'ouragan Ivan s'est abattu sur la région. Des inondations ont causé de graves dommages et des fermetures de routes à Pensacola – sauf dans la zone protégée par le projet Greenshores qui a été moins endommagée (Naturally Resilient Communities, 2022b).

Cette première phase réussie a été suivie de la deuxième phase du projet, en 2007. Cette dernière consistait en la construction de trois îles marécageuses intertidales à l'ouest des îles de la phase 1, au moyen de matériaux couramment dragués dans le fleuve Escambia voisin (Florida Department of Environmental Protection, 2021). Lors d'une consultation publique, il a été demandé que ces îles soient complètement submergées afin de préserver l'esthétique de la baie. Cette phase n'a pas eu autant de succès que la première : deux des îles ont subi de l'érosion et, dans l'ensemble, elles n'ont pas atténué les vagues par rapport à la première phase (Naturally Resilient Communities, 2022b), fort probablement parce que les îles étaient entièrement submergées.

Figure 12. Site 1 du projet (cinq îles marécageuses) et site 2 (trois îles, dont deux sont touchées par l'érosion)



Source : Google Earth, 2022, Lat 30.41, Long -87.19

2.8 Végétation terrestre

Les SFN axées sur la végétation terrestre portent sur la plantation d'arbres, de graminées ou d'arbustes indigènes dans la zone riveraine, au-dessus de la laisse des hautes eaux. La mise en place d'une végétation terrestre dans l'arrière-plage peut atténuer les vagues et les vents durant les tempêtes extrêmes, réduire l'impact de la glace et stabiliser les sédiments provenant des écoulements de surface (Scheres et Schüttrumpf, 2019). Les systèmes racinaires de la végétation terrestre peuvent piéger les sédiments et renforcer la stabilité du littoral ou des berges (Gray, 1995). Le poids accru attribuable à la végétation, à l'augmentation des sédiments et à l'accroissement de l'humidité du sol peut aussi accroître la stabilité. La plantation de végétation terrestre convient dans des zones susceptibles de subir des inondations induites par les vagues ou une érosion lors de conditions de tempête extrêmes, ou encore comme moyen d'adaptation à l'élévation du niveau de la mer.

En plus de ses avantages de GRI, la végétation terrestre peut procurer des avantages connexes, comme un habitat pour les insectes et les oiseaux. Les avantages connexes typiques des SFN axées sur la végétation terrestre sont indiqués à l'encadré 9. Pour plus de renseignements sur d'autres avantages connexes potentiels, les lecteurs sont invités à consulter le document d'orientation intitulé *Avantages connexes*. En outre, le document intitulé *Suivi de l'efficacité : Méthodes et indicateurs proposés* décrit en détail les méthodes de suivi et les indicateurs de performance recommandés pour les SFN axées sur la végétation terrestre.

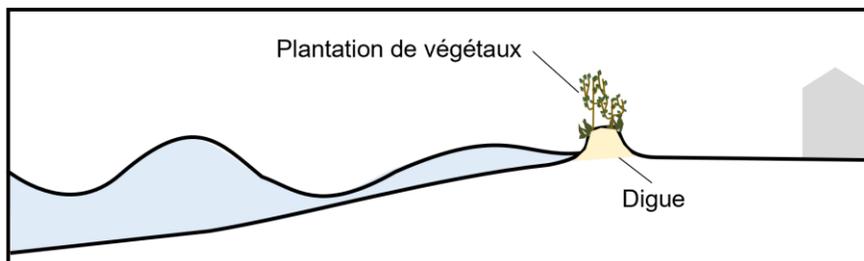
Encadré 9. Exemples d'avantages connexes typiques que procurent les SFN axées sur la végétation terrestre

Environnementaux	Sociaux	Économiques
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Disponibilité et qualité de l'habitat terrestre ✓ Abondance et diversité des espèces végétales et animales indigènes ✓ Santé des sols ✓ Séquestration du carbone 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Esthétique améliorée ✓ Recherche de nourriture, cueillette et usages traditionnels 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Réduction des coûts pour les infrastructures adjacentes (pertes causées par les inondations) 

La végétation terrestre offre la possibilité d'adapter ou d'aménager des digues de mer hybrides (figure 13); cependant, l'efficacité et la sécurité de cette approche ne font pas consensus (Scheres et Schüttrumpf, 2019). Les préoccupations soulevées concernent les risques de dommages à la structure de la digue causés par la végétation (en particulier, la végétation ligneuse), les risques accrus d'érosion et les forces supplémentaires exercées par le vent. On s'inquiète également du fait que la végétation terrestre nuise à l'entretien et à la surveillance de l'intégrité de la digue. Par conséquent, des politiques locales peuvent interdire la plantation de végétation terrestre sur les digues. Par exemple, en Colombie-Britannique (Canada), la végétation sur les digues est limitée aux graminées, qui peuvent être fauchées pour faciliter la surveillance de l'intégrité des ouvrages (Colombie-Britannique, 2022). Dans ses lignes directrices en matière de gestion des levées et autres structures de protection contre les inondations aux États-Unis, l'*United States Army Corps of Engineers* (USACE, 2019a) déconseille l'utilisation de la végétation terrestre sur les digues (des dérogations sont néanmoins possibles), et indique qu'elle peut être « périodiquement retirée » afin de maintenir la fonctionnalité de la digue et son accessibilité pour l'entretien. De plus, le repos hivernal de la végétation, en particulier dans les climats froids, peut

entraîner des performances variables au chapitre de la GRI dont il faut tenir compte lors de la conception. Quoiqu'il en soit, une collaboration avec les autorités responsables des digues ou d'autres personnes prenant des décisions demeure possible pour établir un plan d'inspection et d'entretien qui favorise l'utilisation de la végétation terrestre.

Figure 13. Recours à la végétation terrestre pour protéger contre les inondations et réduire l'érosion



Ce type de solution est considéré comme rentable et compatible avec de nombreuses utilisations des terres en vigueur. Or, le recours à la végétation terrestre comme protection contre les inondations n'en est qu'à ses débuts, et les guides d'aménagement sont rares. Des recherches en cours permettront de mieux comprendre l'efficacité de cette SFN (p. ex., Kalløe, 2019; Kalløe et coll., 2022). Pour cette raison, malgré l'utilité de la modélisation numérique, il y a lieu d'envisager la modélisation physique ou les projets pilotes pour éclairer, affiner ou valider toute adaptation au moyen de SFN axées sur la végétation terrestre pour protéger contre les inondations. D'autres considérations techniques relatives à l'aménagement des SFN en général sont présentées au chapitre 5.

L'encadré 10 résume les principaux points à retenir pour les SFN axées sur la végétation terrestre.

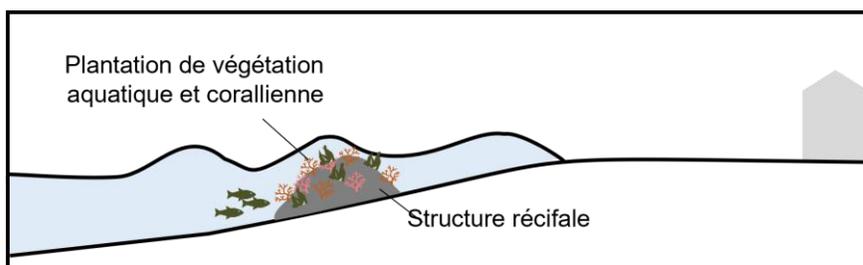
Encadré 10. Principaux points à retenir relativement aux SFN axées sur la végétation terrestre

-  La végétation terrestre offre une protection contre les vents et l'érosion, ainsi que contre les vagues en période de crue. Les performances peuvent varier en fonction des cycles saisonniers de repos hivernal et de croissance.
-  Les guides techniques relatifs à l'aménagement des options de SFN axée sur la végétation terrestre pour la GRI sont toujours en voie d'élaboration (p. ex., Kalløe, 2019; Kalløe et coll., 2022), et il convient donc d'envisager cette approche avec précaution. La modélisation physique ou les projets pilotes sont recommandés pour mieux comprendre les avantages de la GRI.
-  Il est possible de réaménager ou de développer des digues hybrides avec de la végétation terrestre. Toutefois, pour faciliter l'inspection, les autorités responsables des digues peuvent ne pas autoriser cette solution.
-  La végétation terrestre est compatible avec de nombreuses utilisations des sols en vigueur et pourrait être utilisée en combinaison avec d'autres SFN (p. ex. les marais salins).
-  La végétation terrestre est déjà un élément important de nombreux écosystèmes, ce qui laisse supposer que la végétation existante peut apporter des avantages secondaires à la gestion des risques d'inondation.

2.9 Éléments submergés

Les éléments submergés, tels que les récifs de coraux ou d'huîtres, ou les herbiers de zostères et forêts de varech, dissipent l'énergie des vagues et réduisent ainsi l'érosion et les effets des ondes de tempête (p. ex., Lowe et coll., 2021) (figure 14). La végétation aquatique submergée et les récifs artificiels ou restaurés sont largement utilisés dans les projets de restauration et de protection des côtes en Amérique du Nord. Ces éléments peuvent procurer des avantages connexes significatifs tout en protégeant le littoral de l'érosion et des inondations provoquées par les vagues (voir, à l'étude de cas 6, un exemple de projet combiné de récif d'huîtres-zostère qui a réduit l'érosion en plus d'améliorer la biodiversité). Les récifs sont plus faisables et efficaces dans les régions à faible amplitude des marées (Lowe et coll., 2021).

Figure 14. Structure de récif corallien pour protéger contre les inondations et réduire l'érosion



La végétation aquatique submergée a des propriétés analogues à celles de la végétation semi-émergente; décrites dans la section 2.6 (zones humides). Elle peut atténuer l'énergie des vagues (et ainsi prévenir les inondations et l'érosion sur le littoral) et stabiliser les sédiments du fond marin. Les récifs, quant à eux, sont des structures rigides submergées dont les propriétés ressemblent à celles de certaines solutions grises conventionnelles, comme les brise-lames artificiels. Ces derniers procurent des avantages semblables à ceux des récifs sur le plan de la GRI, mais moins d'avantages connexes que les récifs naturels. Les caractéristiques des récifs hybrides se situent entre ces deux types de structures. L'aménagement de SFN axées sur des récifs bénéficie des connaissances existantes et de l'efficacité reconnue de ces structures grises pour réduire l'érosion et l'énergie des vagues sur le littoral, ainsi que de la compréhension des effets des systèmes de récifs naturels sur les processus côtiers. Par exemple, on a estimé que le récif barrière méso-américain, dans l'État du Quintana Roo (Mexique), avait réduit de 43 % les dommages causés par l'ouragan Dean en 2007 (Reguero et coll., 2019). Comme beaucoup d'autres options de SFN, les récifs peuvent être autosuffisants et se développer au fil du temps, et ainsi conserver leur structure, s'ils sont bien aménagés (Brathwaite et coll., 2022). Ils peuvent donc constituer une méthode appropriée d'adaptation à l'élévation du niveau de la mer dans certaines zones – s'ils peuvent croître à un rythme égal à celui de l'élévation locale du niveau de la mer.

Outre les avantages de GRI, les éléments submergés peuvent procurer de nombreux avantages connexes. Les avantages connexes typiques des éléments submergés sont présentés dans l'encadré 11. Le document intitulé *Avantages connexes* comprend une liste d'autres avantages connexes potentiels associés aux SFN. En outre, le document intitulé *Suivi de l'efficacité : Méthodes et indicateurs proposés* décrit les méthodes de suivi et les indicateurs de performance recommandés pour les SFN faisant appel à des éléments submergés.

Encadré 11. Exemples d’avantages connexes typiques que procurent les SFN axées sur des éléments submergés

Environnementaux	Sociaux	Économiques
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Disponibilité et qualité de l’habitat aquatique ✓ Abondance et diversité des espèces végétales et animales indigènes 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Possibilités de loisirs plus vastes ✓ Recherche de nourriture, cueillette et usages traditionnels 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Augmentation du tourisme ✓ Réduction des coûts pour les infrastructures adjacentes (pertes causées par les inondations) ✓ Possibilités d’écotourisme 

Les récifs de coraux et d’huîtres requièrent la construction d’une structure récifale sous-jacente, souvent artificielle, en combinaison avec des matériaux naturels, comme des coquilles d’huîtres, pour favoriser le recrutement naturel des huîtres; ils peuvent aussi être activement plantés de coraux. Recréer l’environnement adéquat pour que des entités vivantes se développent et foisonnent constitue un véritable défi. Les récifs coralliens sont particulièrement sensibles à leur environnement et vivent dans des conditions relativement limitées. Ils ont principalement besoin d’une eau de bonne qualité (ce qui pose souvent des problèmes près des estuaires et dans les zones urbaines côtières), d’une profondeur d’eau appropriée et de conditions hydrodynamiques propices. Pour cette raison, la conception s’appuie souvent sur des récifs « analogues », qui se trouvent à proximité et présentent des conditions de site similaires. Les matériaux doivent généralement ressembler à ceux que l’on trouve dans l’environnement local afin d’encourager le recrutement et la croissance (Lowe et coll., 2021). Il faut dire que de nombreux spécialistes ont utilisé avec succès des matériaux artificiels, tels que des récifs en béton imprimés en 3D (p. ex., Levy et coll., 2022).

Les récifs sont soumis à une multitude de pressions croissantes (p. ex., Bryant et coll., 1998). En particulier, l’acidification et le réchauffement des océans (p. ex., Spalding et Brown, 2015) augmenteront le stress que subissent les récifs de corail. En outre, le développement continu dans les régions côtières a augmenté le ruissellement dans les milieux côtiers et estuariens, et cette tendance se maintiendra probablement (p. ex., Rabalais et coll., 2009). Cette situation amène des polluants qui perturbent les teneurs en nutriments nécessaires à la santé des systèmes coralliens, et favorise la prolifération d’algues nuisibles et l’eutrophisation. De plus, la pêche des brouteurs qui contrôlent les populations d’algues vient également aggraver le stress subi par les coraux (Bryant et coll., 1998). Toutes ces pressions menacent la fonctionnalité de ces systèmes et soulignent l’importance de créer plus d’habitats. Les SFN axées sur les éléments submergés vont exiger un suivi et une gestion adaptative. L’entretien des éléments submergés requiert généralement une équipe de biologistes spécialisés en plongée, donc cette solution sera sans doute plus coûteuse que d’autres options, selon les conditions et les risques propres au site.

Les modèles numériques permettent de mieux comprendre les avantages des éléments submergés sur le plan de la GRI, et souvent de comprendre les effets secondaires, tels que les changements dans les courants et les voies de transport des sédiments. La géométrie et l’emplacement des éléments submergés (en particulier, les récifs) par rapport à la dynamique et aux processus côtiers locaux, aux vagues, aux

courants et à la qualité de l'eau sont des éléments clés dans l'aménagement d'un projet fructueux. Des conseils complémentaires sur la restauration des herbiers de zostères et forêts de varech concernant les récifs submergés peuvent être trouvés dans Beheshti et Ward (2021) et Eger et coll. (2022), tout comme dans Baine (2001) et Lowe et coll. (2021) concernant les récifs submergés. Voir le chapitre 5 pour plus d'informations sur les considérations générales d'aménagement des SFN.

Les principaux points à retenir relativement aux SFN axées sur des éléments submergés sont résumés à l'encadré 12.

Encadré 12. Principaux points à retenir relativement aux SFN axées sur des éléments submergés

-  Les éléments submergés peuvent dissiper l'énergie des vagues et réduire l'érosion et les effets d'ondes de tempête. Ils peuvent également constituer un habitat et procurer des avantages en matière de loisirs et de tourisme.
-  Les récifs de corail et d'huîtres requièrent la construction d'une structure récifale sous-jacente, souvent artificielle, en combinaison avec des matériaux naturels, comme les coquilles d'huîtres, pour favoriser le recrutement naturel des huîtres; ou encore, activement plantés de coraux.
-  L'aménagement doit s'inspirer de récifs de forêts de varech et d'herbiers de zostères locaux, et reposer sur des matériaux semblables à ceux que l'on trouve dans l'environnement local, afin de favoriser un recrutement et une croissance écologiques (Bridges et coll., 2021).
-  L'entretien des éléments submergés exige une équipe de biologistes spécialisés en plongée, et cette solution sera probablement plus coûteuse que d'autres options.

Étude de cas 6. Projet de récifs d'huîtres dans la baie de San Francisco

Projet de récifs d'huîtres *San Francisco Bay Living Shorelines* (Rivages vivants de la baie de San Francisco) : Projet pilote de récifs d'huîtres visant à atténuer l'érosion côtière

Comté de Marin
(Californie),
États-Unis

Le projet *San Francisco Bay Living Shorelines* est un projet pilote de restauration de récifs d'huîtres lancé pour éclairer la conception de projets à plus grande échelle dans la région. Lancé en 2012, ce projet avait pour objectif de réduire l'érosion et de maintenir les processus côtiers, tout en améliorant l'habitat.

Quatre parcelles de 320 m² ont été établies le long du littoral de San Rafael, à 200 m de la côte, afin d'évaluer l'efficacité avec laquelle différents types de traitement du littoral permettraient d'atteindre le double objectif de réduire l'érosion et d'améliorer l'habitat. Il s'agissait d'une parcelle d'huîtres du Pacifique, d'une parcelle de plantation de zostères, d'une parcelle combinant huîtres et zostères, et d'une parcelle témoin (Judge et coll., 2017).

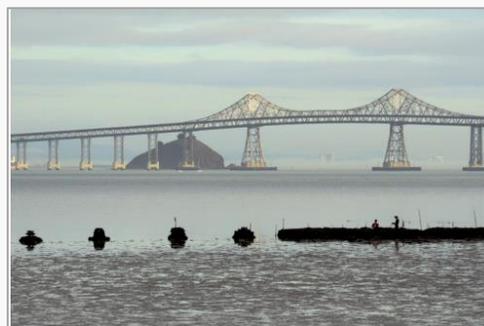
La parcelle d'huîtres combinait des structures en béton avec des sacs de demi-coquilles propres d'huîtres du Pacifique en vue de favoriser le recrutement de l'huître plate du Pacifique, espèce indigène, ainsi que d'autres substrats, comme des boules récifales et du « baycrete », un mélange de béton fabriqué à partir de sable local et de coquilles d'huîtres d'élevage, pour déterminer lesquels sont les plus efficaces. Les deux autres parcelles expérimentales comprenaient une plantation de zostères et une combinaison de plantation de zostères et de récifs d'huîtres. Le projet, comprenant la création des quatre parcelles traitées et le suivi ultérieur, a coûté 2,5 millions de dollars (Judge et coll., 2017); y ont participé des partenaires fédéraux, d'État, universitaires et commerciaux.

Une fois la construction achevée, les parcelles ont fait l'objet d'une surveillance très fréquente, de 2012 et 2017. Cette surveillance devait se poursuivre à une fréquence moindre après 2017, pour une période de cinq ans, avec l'ambition de poursuivre la surveillance à long terme. Le programme de surveillance a permis de mesurer : l'atténuation des vagues, la survie et la densité de la zostère ainsi que de l'huître plate, le recrutement, l'utilisation par les invertébrés, les poissons et les oiseaux, l'énergie des vagues et la qualité de l'eau (Judge et coll., 2017).

Le suivi a révélé un recrutement d'huîtres fructueux et rapide (5 mois) dans les parcelles de récifs d'huîtres, et en particulier sur les assemblages de coquilles. Il a été constaté que la parcelle combinant la zostère et le récif d'huîtres avait mieux atteint les objectifs d'atténuation des vagues et d'amélioration de l'habitat que les autres options. Dans le cas de cette parcelle, on a constaté une plus grande augmentation de la biodiversité (notamment : poissons, invertébrés et oiseaux) et une réduction de l'énergie des vagues de 30 % (Judge et coll., 2017). Le projet a également sensibilisé le public et suscité son soutien et son intérêt à l'égard des projets de SFN dans la région de la baie de San Francisco.

L'un des principaux enseignements tirés du projet est que les demi-coquilles propres d'huîtres du Pacifique constituent la surface la plus propice au recrutement des huîtres. Les assemblages de coquilles ont été ensevelis sous les sédiments, ce qui a mené à la recommandation d'utiliser une base en béton pour soutenir les précieuses coquilles d'huîtres au-dessus de la zone de sédimentation. Les coquilles d'huîtres se sont révélées difficiles à acquérir, et un partenariat entre les restaurants et les conchyliculteurs a été avancé comme solution pour augmenter l'offre (Judge et coll., 2017).

Figure 15. Assemblages de coquilles d'huîtres du Pacifique dans la baie de San Francisco

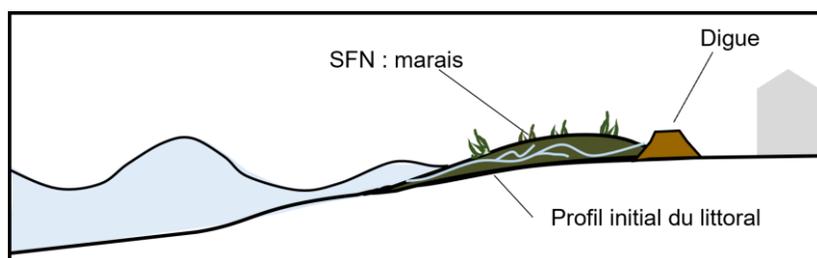


Source : Judge et coll., 2017

2.10 Éléments hybrides

En général, il est possible d'utiliser toutes les SFN décrites précédemment de pair avec des options conventionnelles d'ingénierie grise. On appelle ces combinaisons d'éléments naturels et artificiels « éléments hybrides » (figure 16). De telles combinaisons d'éléments naturels et artificiels peuvent remplacer des infrastructures vieillissantes ou servir quand un littoral ne compte encore aucun mode de défense (p. ex., van Loon-Steensma et coll., 2014). Des éléments hybrides peuvent être mis en œuvre là où une infrastructure grise existe déjà, et ainsi amorcer une transition entre éléments gris et vert. Des SFN peuvent également se greffer à des éléments gris existants, et ainsi donner lieu à un nouvel élément hybride. **De nombreux projets d'adaptation, sinon la plupart, n'utiliseront pas nécessairement les SFN seules (ce qui entraînerait un retour à des processus entièrement naturels) et seront donc considérés comme ayant des éléments hybrides.**

Figure 16. Éléments hybrides, soit un marais aménagé devant un système de digue existant



Des options hybrides peuvent être élaborées à n'importe quel stade du cycle de vie de protection du littoral (nouvel aménagement, entretien, reconception ou mise hors service). Les méthodes hybrides souvent employées en GRI peuvent inclure les éléments suivants :

- marais avec protection des bordures (p. ex. : coquilles d'huîtres ou roches);
- système marais-digue;
- recharge en sable d'une plage avec cap artificiel ou brise-lames au large;
- épis rocheux avec recharge en sable des plages;
- recharge en sable d'une plage avec ancrage de gros débris ligneux;
- restauration de dunes à l'aide de clôtures en bois;
- revêtements avec zones intertidales;
- mur de protection muni de tuiles de biodiversité;
- digues surmontées de végétation ligneuse;
- îles avec protection des bordures (p. ex. : roches ou palplanches);
- plantation de palétuviers avec cap ou brise-lames artificiels.

Les gestionnaires d'actifs envisagent souvent les solutions hybrides pour améliorer les avantages connexes (p. ex. : caractère approprié de l'habitat) associés à l'infrastructure « dure » existante, ou si la performance des SFN est remise en question. En effet, ces solutions sont un compromis entre les solutions statiques « éprouvées » et les SFN dynamiques. Par exemple, la construction d'un récif subtidal au large d'un mur de protection existant pourrait améliorer la performance et la longévité de ce dernier, tout en fournissant un habitat aux espèces menacées. De même, l'ajout de caps ou d'épis à un projet de recharge de plage pourrait stabiliser les sédiments et fournir l'assurance que les sédiments ajoutés resteront en place à long terme. Des éléments gris peuvent également être introduits comme « solution de secours » en cas de dépassement des critères nominaux de stabilité dynamique des composants non structurels des SFN. Par exemple, un revêtement peut être enterré sous un système de dunes pour éviter une défaillance catastrophique en cas de tempête extrême. Ainsi, les solutions hybrides peuvent procurer de nombreux avantages associés aux SFN, tout en offrant à l'équipe du projet et aux

parties prenantes un plus grand degré de confiance dans la performance et la longévité de la solution adoptée. En outre, les éléments hybrides procurent l'avantage potentiel d'une plus petite empreinte, ce qui permet leur utilisation dans des zones où l'espace manque pour une SFN ou visées par des enjeux réglementaires (Sutton-Grier et coll., 2015). L'étude de cas 7 décrit un exemple de projet hybride de recharge de plage en Colombie-Britannique (Canada).

Étant donné les nombreux avantages potentiels des solutions hybrides, des éléments gris ont souvent tendance à être introduits dans des systèmes par ailleurs naturels, même quand cela n'est pas absolument nécessaire. Cette habitude réduit les avantages connexes potentiels d'un projet et empêche de tirer profit des enseignements des SFN et de la recherche sur leur utilisation. Elle peut aussi renforcer les effets involontaires d'éléments gris, tels qu'une érosion accrue ailleurs dans le système, un drainage moins efficace ou le piégeage de débris flottants. Les caractéristiques d'éco-ingénierie (p. ex. : les dispositifs gris de GRI conçus pour maintenir ou améliorer la fonction des écosystèmes, la rugosité accrue des murs de protection et les cuvettes de marée en béton) se situent vers l'extrémité grise du spectre des SFN (p. ex., Suedel et coll., 2021; O'Shaughnessy et coll., 2019; Strain et coll., 2018). Ces options constituent une amélioration par rapport aux infrastructures conventionnelles et procurent de nombreux avantages. Néanmoins, il est vivement recommandé de favoriser des projets qui se situent plus vers l'extrémité verte du spectre, dans la mesure du possible. L'intention derrière l'adaptation (comme indiqué dans la section 2.3) est de rapprocher les systèmes de GRI de l'extrémité verte du spectre des SFN par l'adoption de méthodes aussi naturelles qu'il est raisonnablement et techniquement possible de le faire, tout en maximisant les avantages connexes. Les options hybrides dont la mise en œuvre repose sur une compréhension systémique, qui maximisent les avantages des SFN en combinaison avec les éléments gris là où l'incertitude, le risque, l'espace ou d'autres facteurs limitent l'adoption d'une solution entièrement verte, s'inscrivent dans cette intention.

Les approches hybrides peuvent exploiter plusieurs avantages perçus d'éléments gris, entre autres :

- leur capacité à assurer la GRI a été prouvée;
- leur conception est souvent relativement simple comparativement aux SFN;
- elles peuvent être mises en œuvre assez rapidement;
- elles sont efficaces dès que leur construction est achevée;
- elles peuvent intégrer des infrastructures existantes ou vieillissantes; leur retrait n'est alors plus nécessaire (p. ex. : l'établissement d'un système de dunes par-dessus un mur de protection existant);
- elles bénéficient peut-être déjà d'un soutien sociétal;
- leur financement peut être plus facile à obtenir.

Étude de cas 7. Amélioration de l'estuaire de Beach Creek

Amélioration de l'estuaire de Beach Creek Une intervention hybride aux avantages multiples

Qualicum Beach
(Colombie-Britannique),
Canada

Le front de mer de la petite ville de Qualicum Beach, atout central de l'agglomération, procure d'importants avantages sociaux et économiques liés au tourisme et aux loisirs. Le front de mer comprend une large plage sablonneuse dans la zone intertidale inférieure et une plage de gravier grossier et de galets dans la zone intertidale supérieure, et à l'arrière, un mur de protection en béton typique. Le front de mer fait aussi partie de l'aire de gestion de la faune de Parksville-Qualicum Beach, qui est importante sur le plan environnemental.

En 2021, la ville a mis en valeur une partie de son front de mer en améliorant une section du mur de protection et en revitalisant un exutoire dont se sert le saumon, grâce à l'aménagement d'un estuaire artificiel (ACEC-BC 2021; Qualicum Beach, 2022) (figure 17). Les travaux comprenaient la recharge en sable de la plage, l'aménagement d'un lit de ruisseau à méandres et la construction d'une flèche littorale renforcée pour protéger l'estuaire nouvellement aménagé contre les grandes vagues incidentes. Ces mesures ont également permis de protéger la zone sèche contre les inondations causées par les vagues, en brisant plus loin au large les vagues incidentes (ACEC-BC, 2021; PQB News, 2022). Facteur important, des éléments rigides et « durs » (p. ex. une flèche rocheuse arrondie) ont été introduits de telle sorte qu'ils fonctionnent en symbiose avec les éléments « verts » plus dynamiques, de manière à augmenter la longévité et la résilience du projet tout en maximisant les avantages environnementaux et sociaux.

Figure 17. L'estuaire nouvellement aménagé derrière la flèche littorale (été 2022)



Source : Image fournie par J. Wilson

En janvier 2022, une puissante tempête (accompagnée de fortes marées hivernales) a frappé une grande partie de la région. La flèche et l'estuaire nouvellement aménagés ont bien résisté à la tempête, avec seulement un délogement mineur de roches (PQB News, 2022) (figure 18, à gauche). À environ 100 à 200 m de là, deux sections adjacentes du mur de protection en béton ont cédé durant la tempête (figure 18, à droite).

Le projet a reçu un prix du mérite de la *British Columbia Association of Consulting Engineering Companies* (Association des sociétés d'ingénierie-conseil de la Colombie-Britannique; ACEC-BC, 2021).

Figure 18. Photos du littoral après la tempête du 7 janvier 2022 : à gauche, le long de l'estuaire du ruisseau restauré; à droite, le long d'une partie adjacente du littoral, où le mur de protection a cédé



Source : Images fournies par J. Wilson

Étant donné le large éventail d'options hybrides et la diversité des types de projets sur le spectre gris-vert, les avantages connexes que procurent les options hybrides varient beaucoup d'un projet à l'autre. Certains avantages connexes que peuvent procurer les hybrides sont présentés dans l'encadré 13.

Encadré 13. Avantages connexes que pourraient procurer les systèmes hybrides

Environnementaux	Sociaux	Économiques
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Disponibilité et qualité de l'habitat aquatique ✓ Abondance et diversité des espèces végétales et animales indigènes ✓ Amélioration de la santé des sols ✓ Séquestration du carbone 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Possibilités de loisirs plus vastes ✓ Amélioration de la santé publique 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Augmentation du tourisme ✓ Réduction des coûts pour les infrastructures adjacentes (pertes causées par les inondations) ✓ Possibilités d'écotourisme
		

S'il existe des preuves quant à l'efficacité de nombreux systèmes hybrides pour atténuer les aléas côtiers (p. ex. : des données de télédétection du Bangladesh ont montré qu'un système hybride de digues et de mangroves restaurées réduit considérablement les dommages causés par les inondations dues aux cyclones; Morris et coll., 2018), les recherches sur la performance des systèmes hybrides comparativement aux projets entièrement gris ou axés sur des SFN sont limitées. On compte en outre peu de guides d'aménagement et de sélection des systèmes hybrides (Sutton-Grier et coll., 2015). Il existe donc d'importantes occasions d'élaborer d'autres guides techniques d'aménagement de solutions hybrides (voir le chapitre 7). Le chapitre 5 fournit de l'information complémentaire sur les considérations d'aménagement technique relatives à l'adaptation au moyen des SFN.

Les principaux points à retenir au sujet des éléments hybrides sont résumés à l'encadré 14.

Encadré 14. Principaux points à retenir relativement aux éléments hybrides

	Les solutions hybrides combinent des éléments des SFN avec ceux d'infrastructures grises.
	Les options hybrides peuvent être mises en œuvre lorsque l'infrastructure grise existante nécessite des travaux d'entretien ou d'amélioration, lors du remplacement ou de la reconception de l'infrastructure grise existante, ou au stade de mise hors service des structures existantes de protection du littoral.
	Les avantages et avantages connexes d'éléments hybrides en matière de GRI dépendent beaucoup du projet.
	L'intention derrière la conception d'options hybrides doit être de rapprocher les systèmes de GRI de l'extrémité verte du spectre des SFN par l'adoption de méthodes aussi naturelles que possible, tout en maximisant les avantages connexes.

2.11 Comparaison des coûts des éléments SFN

Le coût total de la planification, de la conception, de l'aménagement et de la gestion d'un projet d'adaptation au moyen des SFN est propre à chaque projet et à chaque site. Les coûts dépendront en grande partie de la taille du projet, du type et de l'état de l'infrastructure existante, du type de SFN, des conditions du milieu, de l'environnement réglementaire et du degré d'acceptation du public. Il faut également s'attendre à ce que les coûts varient à l'échelle nord-américaine, en raison des fortes disparités sur le plan des coûts de main-d'œuvre ainsi que de la disponibilité des matériaux et des équipements, entre autres variables. En outre, les dernières années ont été marquées par une grande imprévisibilité des coûts à chacune des phases du cycle de vie des projets, en raison notamment des crises financières mondiales, de la pandémie de COVID-19, des catastrophes naturelles, des changements climatiques, de la disponibilité des ressources et des instabilités géopolitiques. Étant donné la grande variabilité des coûts des projets d'un pays à l'autre, voire au sein d'un même pays, les fluctuations des coûts dans le temps, et la disponibilité limitée de données sur les coûts dans de nombreuses régions, la présente section met l'accent sur les coûts relatifs des SFN aux différents stades d'un projet, à savoir la planification et la conception, l'aménagement, et l'exploitation et l'entretien. Elle vise à fournir une compréhension générale des coûts. Les coûts réels des travaux d'adaptation seront propres à chaque site, et une analyse complémentaire des coûts doit être faite pour chaque projet.

Certains coûts typiques à prévoir à chacune des étapes (adapté de Bridges et coll., 2021, 470) :

Planification et conception

- Gestion du projet
- Mobilisation des parties prenantes
- Activités de cadrage et de planification (y compris l'analyse des options)
- Activités de surveillance précoces
- Études préalables à la conception (y compris l'évaluation des risques)
- Conception pluridisciplinaire (y compris les révisions de conception)
- Estimation des coûts
- Demandes de financement
- Licences, approbations et permis
- Achats de terrains

Aménagement

- Gestion du projet
- Mobilisation des parties prenantes
- Services d'appel d'offres
- Préparation du site
- Construction (matériaux et mise en place)
- Élimination de matériaux
- Compensation des effets sur l'habitat
- Surveillance de la conformité
- Consignation des dessins et rapports

Fonctionnement et entretien

- Gestion du projet
- Mobilisation des parties prenantes
- Surveillance
- Analyses des données de suivi et actualisations du plan de gestion adaptative
- Gestion adaptative (réparations)

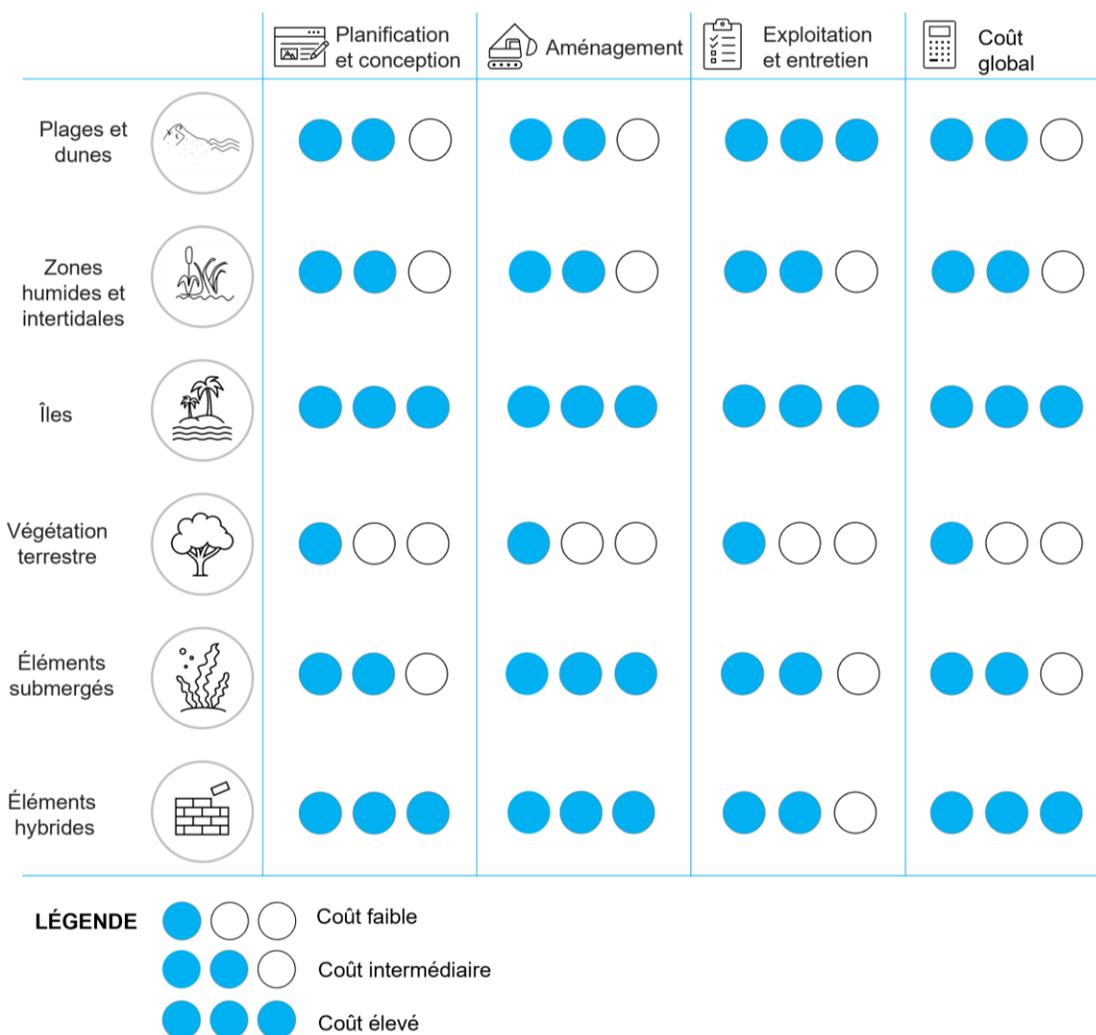
- Contributions à la recherche et au développement
- Mise hors service

La figure 19 résume les coûts totaux relatifs des différents types de SFN, de même que les coûts aux différents stades du cycle d'élaboration des SFN, c'est-à-dire la planification et la conception, l'aménagement, l'exploitation et l'entretien. Les estimations des coûts figurant dans la figure 19 sont basées sur la documentation disponible et sur les connaissances de spécialistes relatives à chaque type de SFN. L'adaptation entraînera d'autres coûts, par exemple pour des travaux de réparation ou pour la mise hors service et l'enlèvement des éléments en place; ces coûts ne sont pas pris en compte dans les estimations relatives présentées ici. Par exemple, l'enlèvement d'un mur de protection et l'aménagement d'un récif coûteront beaucoup plus cher que l'ouverture d'une brèche dans une digue ou la restauration naturelle d'un marais salin. **Une analyse des coûts d'un projet doit toujours être effectuée en fonction des réglementations et des marchés locaux, ainsi que des considérations propres au site.**

Les évaluations des coûts de la figure 19 ont été élaborées en collaboration avec un groupe de conseillers spécialistes de DHI qui ont participé à un atelier interne, en novembre 2022, sur les options, les coûts, les possibilités et les obstacles liés à l'adaptation. Les spécialistes ont souligné qu'il faut s'attendre à ce que les coûts varient énormément selon les exigences particulières du projet, des détails de conception et de la complexité de l'aménagement. Par exemple, la construction d'une île coûtera beaucoup plus cher en eau profonde qu'en eau peu profonde, même si tous les autres facteurs restent identiques. L'aménagement d'un système dunes-plage de plusieurs mètres de haut nécessitera plus de sédiments et coûtera plus cher qu'une recharge en sable plus modeste. Pour tous les types de SFN, il est plus rentable de conserver ou de restaurer un système existant que d'en créer un nouveau. Il est généralement moins coûteux de construire des projets sur la terre ferme qu'au large ou sous l'eau. Il faut également s'attendre à ce que des projets complexes comportant de nombreux éléments interconnectés coûtent plus cher à toutes les phases d'un projet.

Les projets qui bénéficient des enseignements tirés de projets antérieurs similaires et qui sont bien conçus (compte tenu des aléas côtiers) peuvent exiger un entretien et des réparations minimales. En revanche, les projets mal conçus ou novateurs (à cause soit de l'utilisation d'une nouvelle technique, soit de la mise en œuvre d'une technique établie dans un nouvel environnement) peuvent exiger plus d'entretien durant la phase d'exploitation du projet. Les personnes prenant les décisions doivent donc prévoir des budgets pour la gestion adaptative, l'entretien et le suivi à long terme d'une SFN, et proportionnés à la complexité, aux incertitudes, aux risques et à la valeur ajoutée du projet.

Figure 19. Coûts relatifs des étapes de mise en œuvre de projets selon différents types de SFN



On doit également s’attendre à une variation des coûts d’une région à l’autre en Amérique du Nord, en particulier aux étapes de construction et de gestion adaptative, du fait des importantes différences entre le Canada, le Mexique et les États-Unis sur le plan des coûts et de la disponibilité de la main-d’œuvre. Notamment, au Canada et aux États-Unis, la phase de planification et de conception est généralement moins coûteuse que la construction, les frais de planification et de conception étant souvent de l’ordre de 10 à 20 % du coût de la construction. Au Mexique, en revanche, le coût moindre de la main-d’œuvre peut entraîner des frais de planification, de conception et de construction plus bas. Les frais d’exploitation et d’entretien des SFN sont très incertains.

Lors de l’examen des SFN possibles, il faut en évaluer et comparer les coûts par rapport aux avantages qu’elles procurent sur l’ensemble du cycle de vie d’un projet. Ces avantages peuvent provenir des dommages moindres causés par les aléas côtiers, et des avantages connexes sur le plan social, économique et environnemental. Il faut également évaluer les coûts par rapport aux économies potentielles. Le coût initial d’un système SFN peut réduire les coûts d’entretien ou d’amélioration d’éléments de GRI ailleurs. C’est particulièrement vrai dans le cas des récifs et des îles, qui peuvent réduire les besoins relatifs à la protection du littoral. La section 5.4 aborde plus en détail les considérations économiques relatives aux adaptations au moyen des SFN, et traite notamment de l’importance d’évaluer les SFN sur l’ensemble de leur cycle de vie. Le chapitre 3 porte sur les stratégies

d'évaluation des SFN possibles, sujet abordé plus en détail dans le document intitulé *Avantages connexes*.

Les considérations relatives aux coûts pour chacun des six types de SFN sont brièvement décrites ci-dessous.



Plages et dunes

Le coût estimatif global des projets axés sur les plages et dunes (y compris les projets d'adaptation) par rapport aux autres types de SFN est de niveau intermédiaire. Les coûts de planification et de conception sont souvent relativement faibles, car les travaux de recharge en sable s'appuient sur des principes d'aménagement établis et sont souvent bien accueillis par le public. La présence et l'état d'une plage existante constituent d'importants facteurs dans la détermination des coûts, car il est toujours moins coûteux de restaurer une plage ou un système dunaire dégradés.

Les coûts les plus importants sont liés à l'aménagement et à l'entretien qui suit. Les systèmes plage-dunes sont souvent mis en place dans des environnements à haute énergie, ce qui les rend vulnérables à l'érosion induite par les tempêtes. L'entretien et l'exploitation dépendent grandement de la capacité du projet d'équilibrer le bilan sédimentaire ainsi que de la fréquence et de la gravité des tempêtes. Pour la plupart des projets, il faut s'attendre à des recharges en sable durant les phases d'exploitation et d'entretien. Les coûts d'entretien peuvent être moindres lorsque l'érosion est minimale. Des études morphologiques réalisées au cours de la phase de planification et de conception, ainsi que les activités continues de surveillance et de gestion adaptative permettront de déterminer s'il est nécessaire de procéder à une recharge en sable. Les coûts d'aménagement et d'entretien varieront en fonction du volume, de l'origine et du type de matériau utilisé, ainsi que des coûts de transport connexes. Le sable dragué dans le cadre de travaux courants d'entretien des ports peut parfois constituer un sous-produit relativement peu coûteux (Aerts, 2018), étant donné qu'il satisfait aux normes de qualité et aux règlements (p. ex. : faibles concentrations de métaux lourds et d'hydrocarbures).



Zones humides

Les coûts relatifs d'adaptations qui misent sur des zones humides (à tous les stades de la mise en œuvre) sont estimés comme étant de niveau intermédiaire par rapport aux autres types de SFN. Le coût de la restauration d'un habitat dégradé existant est généralement bien inférieur à celui d'aménager un habitat entièrement nouveau.

Comme pour toutes les SFN, les étapes de planification et de conception requièrent la participation d'une équipe pluridisciplinaire composée de biologistes, d'ingénieur-es et des spécialistes des zones côtières. Cependant, les concepts s'appuient généralement sur des « analogues » voisins et établis aux caractéristiques physiques semblables à celles du site à l'étude. Par conséquent, la planification et l'aménagement de zones humides peuvent être moins complexes et moins coûteux que ceux d'îles et d'éléments hybrides, notamment, mais l'être davantage que les solutions axées sur la végétation terrestre. Ainsi, les coûts de conception et de planification des zones humides sont souvent de niveau faible à intermédiaire.

Les coûts d'aménagement et de gestion adaptative des zones humides varient considérablement selon le type de zone et son adéquation au milieu. Les mangroves sont l'option de zone humide au plus faible coût par hectare; en revanche, les coûts associés aux marais salins sont environ deux fois plus élevés (Bridges et coll., 2021). Les projets de zone humide s'appuient souvent fortement sur la gestion adaptative pour gérer les incertitudes après l'aménagement; cependant, les coûts d'entretien associés à la gestion sont généralement faibles.



Îles

Les îles peuvent être l'option la plus complexe et la plus coûteuse, tant dans l'ensemble qu'à chaque étape de la réalisation du projet. Des coûts moindres sont possibles s'il s'agit de restaurer une île dégradée ou des vestiges d'île.

Les îles figurent souvent dans des environnements à haute énergie pour protéger le littoral; ces environnements peuvent éroder et dégrader leur structure (à moins qu'une méthode hybride ne soit adoptée). Par conséquent, les îles nécessitent une planification minutieuse de la part d'une équipe pluridisciplinaire de spécialistes. Le processus de délivrance de permis et d'approbation peut être très complexe. Par exemple, les îles peuvent exiger l'achat de terrains supplémentaires ou la location de la zone intertidale. La construction de nouvelles îles peut également influencer sur la navigation, les processus côtiers et les habitats, et ainsi nécessiter des permis et des approbations supplémentaires. Des frais de planification supplémentaires pourraient s'ajouter si les îles doivent incorporer d'autres types de SFN, telles que des plages ou des marais.

Les coûts de construction d'îles sont généralement plus élevés que ceux de la plupart des autres options, à l'exception des éléments submergés. Les coûts de construction s'expliquent par le temps considérable nécessaire et la quantité de matériau de remblayage requise pour créer l'île et assurer la stabilité de la structure. En outre, la logistique de la construction est plus compliquée à cause du travail en mer, qui oblige souvent à travailler au large à partir d'une barge, et de la nécessité de poser des matériaux sous la laisse de marée haute.

Les coûts de la phase d'exploitation sont aussi relativement élevés, étant donné la surveillance attentive nécessaire, la forte probabilité de travaux de réparation et d'entretien, et la complexité des activités d'entretien menées au large. Étant donné les coûts élevés d'exploitation et d'entretien, une structure grise de protection du littoral accompagne la plupart des îles, ce qui augmente les coûts et éloigne ces projets de l'extrémité verte du spectre gris-vert des SFN.



Végétation terrestre

La végétation terrestre (arbres, graminées et arbustes) constitue généralement l'une des options les plus simples et les moins coûteuses en matière de SFN.

La végétation terrestre s'intègre dans les utilisations existantes du sol, donc les coûts de planification et de conception sont minimales. Or, sa performance sur le plan de la GRI demeure méconnue, étant donné le peu de recherches et de projets pilotes sur son utilisation; une modélisation numérique ou physique pourrait donc être nécessaire pour prouver l'efficacité de cette solution.

Un tel projet pourrait requérir l'aide d'une pépinière locale pour fournir des essences d'arbres indigènes, la plantation manuelle de jeunes pousses et leur entretien par la suite. Ce type d'aménagement sera rentable dans les régions où le coût de la main-d'œuvre est faible. La gestion adaptative sera plus intensive dans les années qui suivent immédiatement l'aménagement, lorsque les jeunes pousses sont vulnérables aux tempêtes, à la sécheresse et à d'autres effets saisonniers et climatiques. Quoi qu'il en soit, ces types de projets sont relativement peu complexes et, par conséquent, les coûts relatifs à la planification, à la construction et à l'entretien sont faibles comparativement à d'autres options.



Éléments submergés

Les coûts d'aménagement d'éléments submergés peuvent être de niveau intermédiaire ou élevé par rapport à d'autres options axées sur des SFN. Toutefois, il est possible de réaliser un projet de restauration de récif de manière relativement efficace, donc moins coûteuse que l'aménagement d'un habitat entièrement nouveau. Les coûts varient énormément en fonction du type d'élément. Par exemple,

les récifs coralliens sont une option plus coûteuse que les huîtres et les herbiers de zostère (Narayan et coll., 2016).

Comme pour toutes les SFN, les étapes de planification et de conception nécessitent la participation d'une équipe pluridisciplinaire composée de biologistes, d'ingénieur-es et de spécialistes côtiers. À l'instar des zones humides, la conception (en particulier, pour les herbiers de zostère et les forêts de varech) s'appuie souvent sur des sites « analogues » voisins et établis aux caractéristiques physiques qui ressemblent à celles du site à l'étude. La conception de récifs s'appuie souvent sur des précédents établis pour les brise-lames submergés. C'est ce qui explique que leurs coûts de conception et de planification sont souvent de niveau intermédiaire. Il convient de noter que des difficultés de taille au chapitre de la conception et de la planification surviennent parfois durant le processus de délivrance de permis et d'approbation. Il importe donc d'accorder une attention particulière aux facteurs liés à la navigation, aux incidences sur les habitats existants et à l'acceptation du public au cours des étapes de cadrage et de planification du cycle de réalisation des SFN.

Étant donné la complexité d'aménager des ouvrages sous-marins et au large, les coûts de construction des éléments submergés sont en général comparativement élevés.

Ces systèmes sont souvent relativement autosuffisants, ce qui réduit le risque de coûts considérables d'entretien et d'exploitation. Néanmoins, un suivi et une gestion adaptative sont de mise. Lorsque des travaux d'entretien sont nécessaires, les coûts sont généralement élevés. Par exemple, des tempêtes peu fréquentes, mais puissantes pourraient endommager les récifs coralliens. Une intervention rapide et coûteuse par une équipe de plongeurs compétents serait alors nécessaire pour réparer le récif. En outre, les récifs coralliens sont sensibles à la qualité de l'eau et aux teneurs en nutriments, et ils ont besoin d'importants stocks de poissons-brouteurs. Dans les zones où ces conditions ne sont pas réunies, les récifs nécessiteront plus d'entretien et risquent même de ne pas survivre. Au Mexique, les récifs coralliens sont vulnérables à la sargasse (Chávez et coll., 2020); leur élimination pourrait donc augmenter les coûts d'entretien des récifs. Si ces éléments sont mis en place dans des zones sujettes aux ouragans, comme le golfe du Mexique, il faudra envisager des coûts d'entretien plus importants. De plus, les coûts d'aménagement et d'entretien varieront en fonction du volume, de l'origine et du type de matériau utilisé, ainsi que des frais connexes de transport et d'implantation.



Éléments hybrides

Étant donné la grande diversité des SFN hybrides, il existe peu de données fiables sur leurs coûts de planification, de conception, d'aménagement et d'exploitation. Ces coûts varient énormément en fonction de la combinaison d'éléments choisis, du milieu et d'autres facteurs propres au projet. Par exemple, vers l'extrémité grise du spectre des solutions hybrides, il est possible d'ajouter des caractéristiques de l'habitat à une infrastructure existante (p. ex. : la rugosité des murs de protection, les cuvettes de marée en béton), pour obtenir des améliorations simples et peu coûteuses (p. ex., Suedel et coll., 2021). Les projets plus proches de l'extrémité verte du spectre, qui requièrent des travaux plus importants pour modifier ou remplacer les structures existantes (p. ex. : un système de plage avec des structures minimales, comme des caps et des épis), seront plus coûteux. Il importe de considérer et d'évaluer les coûts relatifs des options possibles en fonction de leurs avantages potentiels, car les projets plus proches de l'extrémité verte procurent en général des avantages connexes plus importants.

Les éléments hybrides peuvent sembler plus simples à mettre en œuvre, étant donné leur similarité aux méthodes grises conventionnelles qui ont fait leurs preuves. Cependant, l'ajout de plusieurs types d'éléments peut accroître la complexité au chapitre de la conception, de l'aménagement et de l'exploitation par rapport à une solution grise conventionnelle et à une SFN. Comme pour toutes les SFN, les étapes de planification et de conception requièrent également la participation d'une équipe pluridisciplinaire composée de biologistes, d'ingénieur-es et de spécialistes côtiers. Les projets qui se fondent sur de nombreux précédents et qui sont bien conçus (compte tenu des aléas côtiers) pourraient

nécessiter peu d'entretien et de réparations. En revanche, les projets mal conçus ou novateurs (à cause soit de l'utilisation d'une nouvelle technique, soit de la mise en œuvre d'une technique établie dans un nouvel environnement) peuvent exiger plus d'entretien durant la phase d'exploitation du projet. La modélisation numérique, la modélisation physique ou les projets pilotes pourraient aider à mieux comprendre les limites et les coûts futurs relatifs aux nouvelles solutions hybrides. Quoiqu'il en soit, il faudra prévoir un suivi et une gestion adaptative, de même qu'un budget pour ces activités, dès le début du cycle de réalisation des SFN.

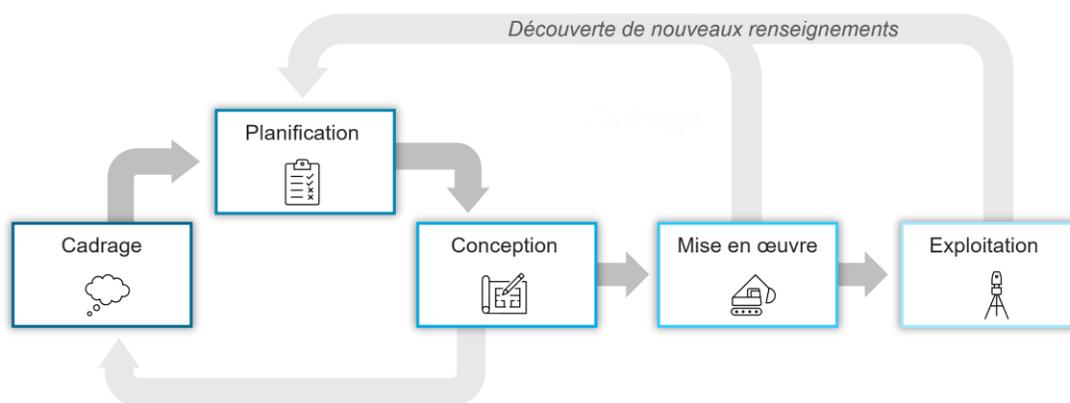
3 Adaptation : cadrage des possibilités et des options

Plusieurs facteurs peuvent motiver la décision de procéder à une adaptation au moyen des solutions fondées sur la nature (SFN), entre autres les multiples avantages qu'elles peuvent procurer. Le présent chapitre a pour objet d'examiner le processus de détermination des possibilités d'adaptation, et de donner un aperçu des outils et techniques qui permettent d'évaluer les options possibles en tenant compte de ces avantages. Le cadre conceptuel présenté ici constitue un ensemble exhaustif de pratiques exemplaires pour cadrer les possibilités et options d'adaptation; il est toutefois admis qu'il existe souvent des contraintes de projet et des limites aux ressources qui pourraient restreindre l'application directe de ce cadre. Les personnes prenant les décisions peuvent moduler l'ampleur des moyens consacrés à ce processus de sorte qu'ils soient proportionnés aux besoins des parties prenantes, aux risques que pose le projet, et à la disponibilité des ressources. Dans certains cas, il pourrait être utile de financer plusieurs études qui serviront à éclairer les décisions. Un groupe pluridisciplinaire de spécialistes pourrait participer à un processus interactif qui s'étendra sur plusieurs années. Dans d'autres cas, si les ressources sont limitées, un-e professionnel-le aguerri-e pourrait se servir du cadre pour guider un processus décisionnel simple, et faire appel à des spécialistes et à des parties prenantes externes au besoin uniquement.

3.1 Étapes d'un projet de mise en œuvre des SFN

Le cadre conceptuel pour réaliser un projet axé sur les solutions fondées sur la nature (SFN) compte cinq grandes étapes : le cadrage, la planification, la conception, la mise en œuvre et l'exploitation (voir la figure 20) (Bridges et coll., 2021). Ces étapes sont itératives et cycliques, et ce processus cyclique permet une gestion adaptative des systèmes existants de gestion des risques d'inondation (GRI) en fonction des évaluations continues dont ils font l'objet. Il permet en outre à l'équipe de projet de dimensionner et de mettre en œuvre des adaptations ou des changements à tout moment du cycle de vie de l'ouvrage. Une équipe diversifiée de spécialistes sera nécessaire pour mettre en œuvre un projet axé sur des SFN; les rôles et les responsabilités des membres sont abordés à la section 4.2.

Figure 20. Cadre conceptuel pour réaliser un projet axé sur les SFN



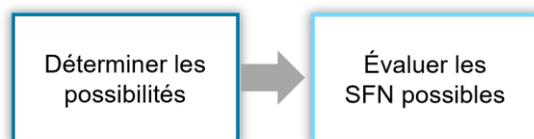
Source : Adapté de Bridges et coll., 2021

Note : Les flèches en gris foncé représentent les étapes principales, et les flèches en gris clair, les étapes secondaires (itérations).

Lorsqu'ils envisagent une adaptation, les personnes prenant les décisions doivent réfléchir soigneusement à la manière de déterminer les possibilités et d'évaluer les SFN possibles (figure 21). Ces

deux stades font partie de l'étape de cadrage dans le processus de mise en œuvre, et constituent la fondation des étapes de planification, de conception, de mise en œuvre et d'exploitation à venir.

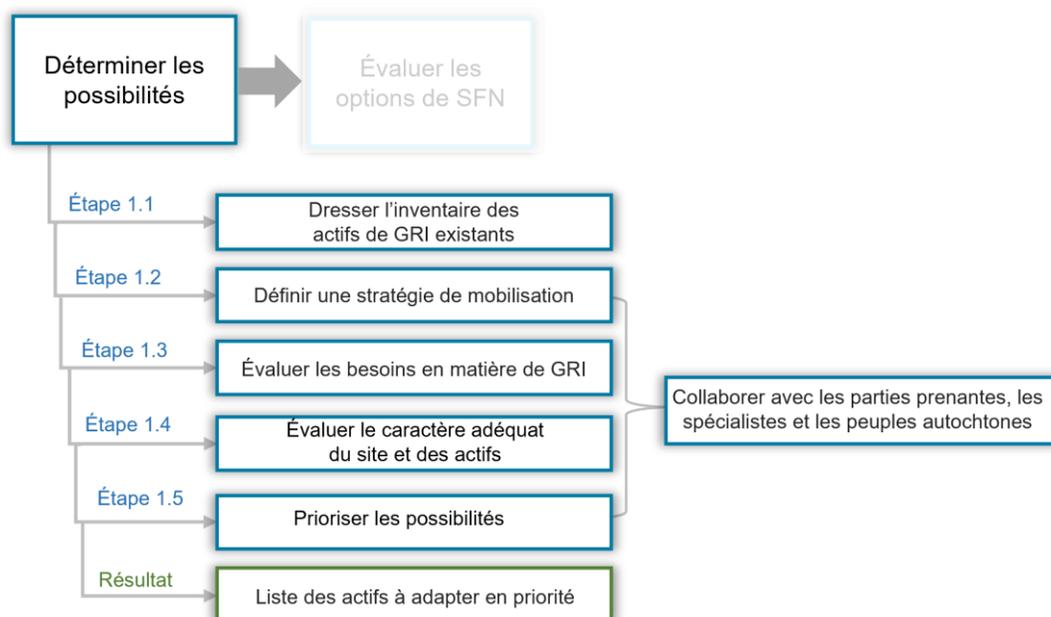
Figure 21. Cadre conceptuel pour déterminer les possibilités et options d'adaptation



3.2 Détermination des possibilités d'adaptation

La première étape de la mise en œuvre d'un projet axé sur les SFN consiste à déterminer les possibilités d'adaptation des infrastructures existantes. Une fois ces possibilités cernées, elles doivent être classées par ordre de priorité afin que les personnes qui prennent les décisions puissent choisir quels actifs adapter. La figure 22 présente un cadre en cinq étapes qui les aidera à choisir et à prioriser les actifs de GRI à adapter au moyen des SFN. Les étapes de ce cadre sont traitées plus en détail dans les sous-sections ci-dessous. Après ce processus de détermination, une évaluation des différentes options de GRI côtières, y compris les SFN, est effectuée (étape 2; voir la section 3.3).

Figure 22. Cadre conceptuel pour déterminer les possibilités d'adaptation au moyen des SFN



3.2.1 Étape 1.1 : Dresser l'inventaire des actifs de GRI existants

La première étape pour déterminer les possibilités d'adaptation au moyen des SFN consiste à dresser un inventaire (p. ex. : une liste ou une base de données) des actifs de protection côtière (p. ex. : murs de protection, revêtements, digues, dunes, etc.) dans la zone visée par les personnes prenant les décisions. La prise en compte de tous les actifs et emplacements qui pourraient bénéficier d'une GRI favorisera une démarche systémique (p. ex., de Vries et coll., 2021) et l'établissement d'une stratégie globale de GRI, plutôt que de traiter chaque site ou chaque bien individuellement. L'inventaire doit inclure des détails pertinents, comme la fonction, l'emplacement, la longueur, l'âge, la durée de vie restante et l'état de

chacun des actifs. Cet inventaire servira de point de départ pour évaluer la nécessité et la faisabilité des SFN. À partir de là, il sera possible d'appliquer les étapes suivantes pour affiner l'inventaire afin d'obtenir une liste des sites à adapter.



Résultat : Liste des actifs existants de GRI

3.2.2 Étape 1.2 : Définir une stratégie de mobilisation

Des consultations avec la collectivité, les parties prenantes, les organismes d'approbation ou de délivrance de permis et avec les peuples autochtones fournissent des renseignements précieux sur les besoins, les valeurs et les préoccupations qui permettront d'évaluer et de prioriser les besoins et possibilités en matière de GRI. De plus, la mobilisation représente une occasion d'éduquer à propos des options et besoins relatifs à la GRI côtière (y compris les SFN) et d'établir des relations. La mobilisation constitue une importante activité qu'il serait avantageux de mener tout au long des processus de détermination, de priorisation et d'évaluation. L'élaboration d'une stratégie de mobilisation doit se faire au début de l'étape de détermination. Définir une stratégie de mobilisation constitue une tâche complexe qui devrait être accomplie par des spécialistes qui possèdent l'expertise requise. Cette stratégie doit absolument tenir compte des parties prenantes à mobiliser ainsi que du moment, de la fréquence et de la façon de le faire (voir l'encadré 15). Voir la section 4.3 pour un complément d'information sur la mobilisation.



Résultat : Élaboration d'un plan de mobilisation

Des conseils plus détaillés sur la mobilisation peuvent être trouvés dans les sections 3.3.2 et 3.3.6 du document intitulé *Avantages connexes*, ainsi que dans le document *International Guidelines on Natural and Nature-Based Features for Flood Risk Management* (Bridges et coll., 2021).

Encadré 15. Questions clés à poser pour élaborer une stratégie de mobilisation

	Qui devrait participer?		Comment la mobilisation se déroulera-t-elle?
	Quand la mobilisation aura-t-elle lieu?		Quels sont les objectifs? Quelle information espère-t-on obtenir/fournir?
	À quelle fréquence la mobilisation aura-t-elle lieu?		Comment la rétroaction sera-t-elle incorporée dans le projet?

3.2.3 Étape 1.3 : Évaluer les besoins et la stratégie en matière de GRI

L'étape 1.3 consiste à évaluer l'infrastructure actuelle de GRI afin de cerner les endroits et les actifs qui bénéficieraient d'une meilleure GRI. Il s'agit de déterminer, pour chaque bien, tout écart qui existe entre l'exposition aux aléas côtiers et l'atténuation de ces dangers. Ces écarts en matière d'atténuation des risques d'inondation peuvent survenir lorsque l'infrastructure en place ne protège plus adéquatement contre les inondations ou l'érosion, lorsqu'il est prévu que l'infrastructure ne répondra pas aux besoins futurs dans le contexte des changements climatiques, lorsque l'état du bien s'est dégradé (ou l'on prévoit qu'il se dégradera), lorsque des réparations sont nécessaires ou lorsque le bien a atteint la fin de sa durée de vie utile. Ces écarts peuvent être vus comme des occasions d'améliorer la GRI côtière en place au

moyen d'un large éventail d'options (y compris les SFN), qu'il convient d'évaluer dans le contexte du système et de la stratégie globale de GRI.

Une évaluation des risques pourrait être de mise pour cerner les besoins et la stratégie de GRI en évaluant les vulnérabilités et les aléas côtiers. La pratique exemplaire consiste à adopter une approche holistique et systémique à l'égard de l'évaluation des risques, et à considérer le risque à une échelle spatiale appropriée, plutôt que d'évaluer le risque d'inondation dans un seul territoire de compétence, par exemple (p. ex., Nicholls et coll., 2005; Narayan et coll., 2012; Menéndez et coll., 2020).

Il existe plusieurs méthodes et cadres différents pour procéder à des évaluations des risques (p. ex., Hall et coll., 2003; van Alphen et coll., 2011; Narayan et coll., 2012; Journeay et coll., 2015; Colombie-Britannique, 2020; Murphy et coll., 2020). Les objectifs et les éléments fondamentaux sont similaires (Jones et coll., 2014) — le risque étant généralement considéré comme le produit de la probabilité d'un aléa, de la vulnérabilité à cet aléa et des conséquences qui en découlent². L'Association internationale de normalisation (ISO) a publié le document ISO 1409, un guide détaillé d'évaluation des risques qui est considéré comme une pratique exemplaire à l'échelle internationale (Association internationale de normalisation, 2021). Le travail nécessaire pour faire une évaluation des risques peut varier considérablement d'un projet à l'autre, et la méthode choisie et appliquée doit correspondre aux besoins et à l'ampleur du projet. Dans certains cas, une évaluation qualitative de haut niveau s'appuyant sur des études existantes et le jugement professionnel suffira. Pour les projets plus complexes, les pratiques exemplaires décrites par l'Association internationale de normalisation (2021) pourront être suivies.

La présente section donne un aperçu des principaux éléments d'une évaluation des risques :

1. Évaluer l'état actuel des actifs de GRI;
2. Évaluer les aléas côtiers actuels et futurs;
3. Évaluer la capacité des actifs existants à atténuer les aléas côtiers;
4. Procéder à une évaluation des risques et vulnérabilités.

[Étape 1.3.1 Évaluer l'état actuel des actifs de GRI](#)

L'évaluation des risques commence par une évaluation de l'état actuel des actifs de GRI existants, inscrits sur la liste des actifs établie à l'étape 1.1. Il s'agit habituellement d'une inspection des actifs par des spécialistes et d'un examen des documents antérieurs (dossiers historiques d'inspection, dessins, rapports d'entretien, etc.).

[Étape 1.3.2 Évaluer les aléas côtiers actuels et futurs](#)

L'étape suivante consiste à déterminer et à évaluer les aléas côtiers. Des spécialistes doivent procéder à une évaluation des risques liés aux aléas côtiers (inondations, érosion) pour en déterminer la probabilité et la gravité, qui peuvent varier d'un emplacement à l'autre et même d'un site à l'autre au sein d'un même projet (p. ex., USACE, 2019b). L'objectif est de comprendre l'exposition actuelle aux aléas côtiers et en quoi ils pourraient évoluer sous l'effet des changements climatiques. Les éléments dont l'évaluation est nécessaire devraient inclure les suivants : niveaux de la mer actuels et futurs, inondations côtières, marées, ondes de marée, vitesse et direction des vents, surcote due aux vagues, hauteur et effets des vagues, transport des sédiments et érosion côtière (p. ex., FEMA, 2016).

[Étape 1.3.3. Évaluer la capacité des actifs existants à atténuer les aléas côtiers](#)

Une fois que les aléas côtiers existants et futurs sont compris, il convient d'évaluer la capacité de l'infrastructure actuelle d'assurer une protection adéquate, afin de déterminer s'il est nécessaire ou non

² Voir Journeay et coll. (2015) pour une critique de différentes méthodes d'évaluation des risques.

d'améliorer la GRI. Il s'agirait, au minimum, d'évaluer les élévations minimales requises pour réduire à des niveaux sûrs le débordement et la montée des vagues, et de les comparer aux élévations nécessaires pour atténuer les inondations. Il faudrait également examiner les capacités de protection contre l'érosion ainsi que les considérations relatives à la stabilité structurelle et géotechnique. Les questions clés à prendre en compte sont :

- Le bien assure-t-il une protection GRI adéquate contre les aléas côtiers actuels et futurs?
- Quel est le risque de défaillance?
- Le bien a-t-il besoin de travaux de réparation ou d'entretien?
- Le bien arrive-t-il à la fin de sa vie utile?

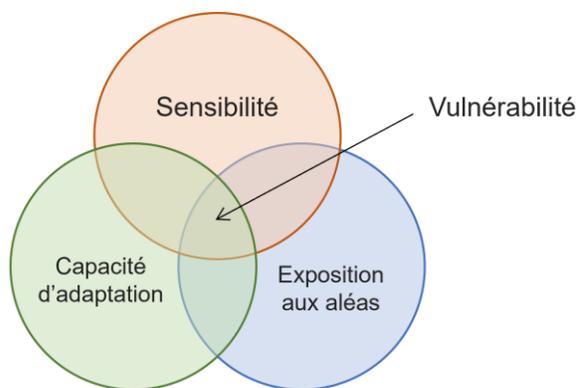
Étape 1.3.4. Procéder à une évaluation des risques et vulnérabilités

On peut ensuite procéder à une évaluation des risques portant sur la probabilité et la gravité d'une gamme d'événements à risque d'inondation côtière, ainsi que des conséquences de ces événements. L'évaluation de la vulnérabilité des collectivités et des systèmes naturels aux risques d'inondation côtière constitue un élément essentiel de cette étape (p. ex., GIEC, 2007, 2012). Une évaluation de la vulnérabilité tient compte de la sensibilité (c.-à-d. de l'importance économique et sociale) des terres touchées ainsi que de la capacité d'adaptation du système, en plus des risques d'inondation côtière et de la fragilité des infrastructures (figure 23). La capacité d'adaptation est l'aptitude à surmonter les effets des changements climatiques et à s'y adapter (Adger, 2006; GIEC, 2022).



Résultat : Détermination et quantification des besoins (écarts) de GRI

Figure 23. La vulnérabilité est une combinaison de l'exposition à un aléa côtier, de la capacité d'adaptation et de la sensibilité des zones protégées contre cet aléa



Source : GIEC, 2007, 2012

3.2.4 Étape 1.4 : Évaluer le caractère adéquat du site et des actifs pour les SFN

La faisabilité technique des SFN pour la GRI dépendra fortement des contraintes propres au site. La présente étape consiste à évaluer le caractère adéquat des sites (déterminé à l'étape 1.3) pour y mettre en œuvre des SFN. À ce stade du processus de cadrage, il est souvent possible de se fier aux connaissances de spécialistes en matière de SFN et au savoir local relatif au site pour déterminer si un projet est réalisable ou non. Des études complémentaires seront nécessaires à un stade ultérieur du projet pour comparer les avantages connexes des options réalisables, sélectionner une option et entreprendre une conception détaillée (voir la section 3.3). Dans le cadre de cette évaluation de haut niveau du caractère adéquat d'un site pour les SFN, il est généralement nécessaire de tenir compte des contraintes relatives

aux projets décrites dans l'encadré 16. D'autres contraintes, telles que la disponibilité des fonds (voir la section 4.4) et les exigences réglementaires (voir la section 4.5), peuvent aussi entrer en ligne de compte.



Résultat : Compréhension du caractère adéquat (faisabilité) du site, pour tous les actifs dans l'inventaire, relativement à la mise en œuvre d'une SFN

Il convient de souligner que cette étape porte principalement sur la faisabilité technique des options de SFN. Les avantages connexes sociaux, environnementaux et économiques seront évalués plus en détail au cours de la phase d'évaluation des options (voir la section 3.3).

Encadré 16 Exemples d'états, de contraintes et de possibilités du site à prendre en compte et qui influent sur le caractère adéquat pour les SFN

<p>Caractère adéquat du site</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Y a-t-il suffisamment d'espace pour tous les types de SFN? • Les utilisations des terres entrent-elles en conflit avec certaines SFN? • La réglementation limiterait-elle l'empreinte du projet? • Certaines SFN exigeraient-elles l'achat ou la location de nouveaux terrains?
<p>Exposition aux aléas côtiers</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Le site présente-t-il une grande amplitude de marée? • Le site est-il exposé à des vagues moyennes ou fortes, ou à des ondes de tempête? • Les vents y sont-ils moyens ou forts?
<p>Apport en sédiments</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • L'apport naturel en sédiments dans le système a-t-il été modifié par des facteurs naturels ou anthropiques (c.-à-d., y a-t-il actuellement déficit de sédiments)? • Le système est-il dominé par le transport de sédiments par un courant littoral ou perpendiculaire? • Quelles sont les sources de sédiments hors site?
<p>Contraintes d'accès</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Comment aura-t-on accès au site pendant l'aménagement? • L'aménagement comprendra-t-il des travaux sous-marins ou au large? • Aura-t-on accès au site pour le suivi et la gestion adaptative à long terme? • L'entretien régulier pourrait-il avoir des effets négatifs sur les systèmes?
<p>Écosystèmes et éléments naturels existants</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Existe-t-il des éléments naturels (dunes ou zones humides) qui pourraient être restaurés ou améliorés? • Existe-t-il des éléments ou des habitats naturels susceptibles de subir des effets négatifs en raison de nouvelles activités d'aménagement?
<p>Soutien de la collectivité</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • La mise en œuvre d'une SFN sur ce site bénéficie-t-elle du soutien de la collectivité? • Les membres de la collectivité ont-ils subi des effets négatifs de projets antérieurs de GRI dans la région? • Le projet procurera-t-il d'importants avantages connexes à la collectivité?

3.2.5 Étape 1.5 : Prioriser les possibilités

Une fois qu'une liste des actifs de GRI existants (et leurs détails afférents, énumérés dans la description des étapes précédentes) a été compilée, la dernière étape consiste à prioriser les adaptations possibles. L'objet de cette étape est de déterminer les lieux ou sites à adapter en priorité au moyen des SFN, plutôt que les types précis de SFN à mettre en œuvre. Cette étape s'appuie sur l'information collectée aux étapes précédentes du processus. La mobilisation des parties prenantes à ce stade permettra de juger du soutien de la collectivité relativement à la mise en œuvre de SFN à certains endroits. La participation de spécialistes ayant une expertise en GRI et en SFN à cet exercice de classement pourrait aussi être utile. L'exercice de classement peut se faire à l'aide d'une simple évaluation comparative globale qui catégorise les projets en tenant compte de leur vulnérabilité, de leur potentiel par rapport aux SFN et du soutien de la collectivité (encadré 17).



Résultat : Liste affinée d'actifs ou de sites prioritaires qui requièrent une meilleure gestion des risques d'inondation

Encadré 17. Catégories à prendre en compte pour classer ou prioriser les projets de SFN

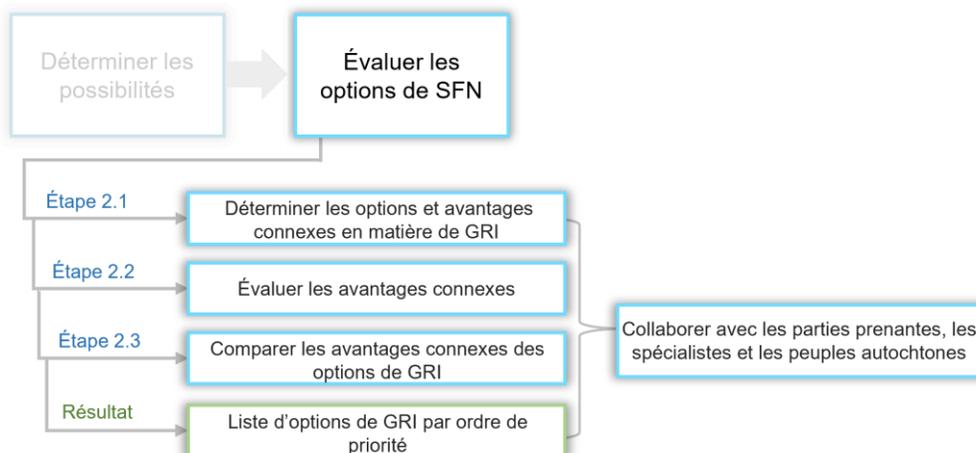
<p>Vulnérabilité</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Les biens en place arrivent-ils à la fin de leur vie utile? • Les biens en place répondent-ils aux actuels et futurs besoins de GRI? • Les conséquences d'une défaillance sont-elles graves? • Le système est-il peu résilient?
<p>Potentiel des SFN</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Existe-t-il un fort potentiel de mise en œuvre des SFN (p. ex. sont-elles réalisables)? • Y a-t-il suffisamment d'espace ou des caractéristiques existantes qui pourraient être améliorées? • Y a-t-il moyen d'obtenir d'importants avantages connexes, comparativement à ceux que procure le système GRI en place?
<p>Soutien</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • La collectivité soutient-elle le projet? • Y a-t-il suffisamment de connaissances spécialisées, de fonds, etc., pour élaborer un projet?

3.3 Évaluation des options d'adaptation

Une fois que qu'une liste de sites prioritaires pour l'adaptation a été établie à l'aide du cadre décrit à la section 3.2, l'étape suivante consiste à évaluer les différentes options disponibles pour gérer les risques d'inondation. L'objectif de cette étape est de prendre une décision éclairée afin de mettre en œuvre la meilleure option de gestion des aléas côtiers. Pour bien comprendre les avantages que procurent les SFN – et afin de communiquer ces avantages aux parties prenantes, aux titulaires de droits et aux autres parties –, il est utile d'évaluer les options de SFN de concert avec des solutions grises conventionnelles et avec l'inaction, dans le contexte de la stratégie globale de GRI. En outre, la réalisation d'une analyse multicritère et d'une évaluation des avantages connexes facilite une approche globale pour déterminer tous les avantages potentiels, tout en évitant l'affirmation d'avantages non réalistes. Ce genre d'analyse est particulièrement utile pour atténuer le risque – et la perception – d'écoblanchiment.

Le chapitre 3 du document intitulé *Avantages connexes* examine en détail une méthode recommandée qui permet de déterminer, de comparer et de prioriser les options potentielles de GRI en fonction des avantages et avantages connexes qu'elles procurent. La figure 24 ci-dessous schématise ce cadre conceptuel dans le contexte de l'adaptation.

Figure 24. Cadre conceptuel pour évaluer les options de GRI



3.3.1 Étape 2.1 Déterminer les options et avantages connexes en matière de GRI

La première étape consiste à déterminer les options potentielles en matière de conception (y compris les SFN, comme décrit au chapitre 2) qui pourraient être mises en œuvre afin de répondre aux besoins de GRI des sites priorités à l'étape 1.5, outre les solutions grises conventionnelles et l'inaction. Il convient d'examiner la faisabilité de toutes les solutions potentielles relevées à cette étape, de sorte que seules les solutions techniquement et logistiquement réalisables soient examinées aux étapes suivantes d'évaluation et de comparaison. Les limites à prendre en compte comprennent le budget, le calendrier d'exécution, les limites sur le plan de l'expertise, la faisabilité de la construction, le caractère adéquat du milieu, les contraintes physiques et la capacité à respecter les contraintes liées aux autorisations ou à la réglementation. Il se peut que les personnes prenant les décisions doivent consulter des spécialistes des SFN pour établir une liste restreinte de solutions réalisables.

Il est également nécessaire d'établir un calendrier d'exécution général de projet (en fonction de projets et d'exigences de financement antérieurs similaires, par exemple) ainsi que les défis et objectifs locaux, et de dresser une liste générale d'avantages connexes potentiels. Il importe de déterminer et de prendre en compte les avantages connexes dès cette phase initiale. La valeur du projet sera ainsi maximisée et on évitera que ces avantages ne deviennent une considération secondaire. Ainsi différentes solutions de GRI possibles pourront mieux être comparées et évaluées, puisque tous leurs avantages relatifs au projet (et pas seulement ceux en matière de GRI) peuvent être pris en compte et comparés. C'est particulièrement important lorsque des SFN sont examinées parallèlement à des options grises conventionnelles, qui accordent souvent peu de valeur aux avantages connexes. Pour plus d'informations sur cette étape du processus d'évaluation des avantages connexes, voir le chapitre 3 du document intitulé *Avantages connexes*.

La collaboration avec les parties prenantes, les spécialistes et les populations autochtones est également d'une importance capitale à ce stade et tout au long du reste du processus (comme indiqué à l'étape 1.2). Ces échanges peuvent aider à déterminer les objectifs de GRI et feront probablement ressortir d'importants avantages connexes qui doivent être priorités. Par exemple, les parties prenantes pourraient exprimer le besoin d'améliorer les lieux récréatifs, ce qui pourrait mener au classement plus haut de divers types de SFN par rapport aux options grises conventionnelles.



Résultat : Liste d'avantages connexes potentiels, de contraintes de projet et d'options réalisables de GRI pour les sites prioritaires

3.3.2 Étape 2.2 Évaluer les avantages connexes

L'étape 2.2 vise à attribuer une valeur aux avantages connexes potentiels et souhaités pour chaque option d'adaptation présélectionnée à l'étape 2.1. La valeur n'est pas nécessairement pécuniaire et peut représenter l'importance, l'intérêt ou l'utilité d'un avantage connexe (DHI, 2022a). Les options peuvent être évaluées et priorisées selon leur capacité à satisfaire aux objectifs du projet et des parties prenantes ainsi qu'en matière de faisabilité, d'incertitude, d'avantages et de compromis, de budget, de calendrier et de limites d'expertise. Les étapes clés de ce processus consistent à :

- déterminer les limites des méthodes d'évaluation des avantages connexes;
- choisir une méthode d'évaluation appropriée;
- sélectionner des indicateurs de performance pour chaque avantage connexe;
- fixer, pour chaque avantage connexe, un point de référence qui permettra d'évaluer les avantages du projet;
- procéder à l'évaluation des avantages connexes.



Résultat : Liste d'avantages connexes évalués pour chaque option d'adaptation

La section 3.4 du document d'accompagnement intitulé *Avantages connexes* comprend une description détaillée de cette étape du processus d'évaluation des avantages connexes.

3.3.3 Étape 2.3 Comparer les avantages connexes des options de GRI

Une fois que les avantages connexes potentiels de chaque solution envisagée ont été déterminés et évalués, il est alors possible de comparer les différentes options de conception pour chacune des options d'adaptation. Plusieurs outils peuvent servir à une comparaison des solutions potentielles :

- analyse « SWOT » (analyse des forces, faiblesses, possibilités et menaces);
- analyse coûts-avantages;
- analyse multicritère;
- matrice de Pugh;
- analyse par arbre de défaillances;
- analyse par arbre de décision;
- test A/B;
- prototypage;
- tests auprès des utilisateurs;
- enquête/questionnaire.

Étant donné la complexité d'attribuer une valeur pécuniaire aux avantages connexes et la nature souvent intangible de certains d'entre eux, nous recommandons l'utilisation d'une analyse multicritère pour pondérer et comparer les avantages de chaque option de GRI. Il convient de pondérer les avantages connexes en fonction de leur importance et de leur priorité pour l'équipe de projet, les parties prenantes et les titulaires de droits. La section 3.5.3 du document intitulé *Avantages connexes* décrit plus en détail l'analyse multicritère.

La phase de comparaison vise à déterminer la ou les options d'adaptation qui satisfont le mieux aux objectifs du projet et des parties prenantes, par une analyse multicritère des avantages et avantages connexes escomptés en matière de GRI. L'option ou les options aux notes les plus élevées après analyse devraient procurer le plus grand nombre d'avantages, compte tenu des besoins du projet. À noter toutefois que les résultats de l'analyse doivent servir uniquement à la prise de décisions. Un examen soigneux des besoins, des contraintes et des compromis propres au projet doit toujours précéder le choix

d'une option. En particulier, il faut aussi examiner soigneusement les compromis entre les avantages connexes, d'une part, et leur fourniture équitable entre parties prenantes et titulaires de droits.

Certains avantages (p. ex. : la réduction des niveaux des crues) seront probablement d'une importance particulière, et une modélisation ou une analyse plus détaillée des options les mieux cotées pourrait avoir lieu à ce stade pour confirmer leur valeur.



Résultat : Évaluation des options potentielles de GRI au moyen d'une analyse multicritère afin de faciliter la sélection de la meilleure solution d'adaptation

4 Adaptation : considérations administratives

Le présent chapitre donne un aperçu des considérations administratives clés qui vont soutenir la prise de décisions concernant l'adaptation de systèmes d'infrastructure existants au moyen des solutions fondées sur la nature (SFN). Il comprend une synthèse des considérations relatives au cadrage du projet, aux rôles et responsabilités, aux défis financiers, à la réglementation et au moment d'exécution. Les considérations techniques sont décrites séparément au chapitre 5.

4.1 Cadrage

Le cadrage d'un projet axé sur les SFN est la première étape du cadre conceptuel d'élaboration (figure 20). Cette étape consiste généralement à bien comprendre les besoins du projet et à définir ses contraintes. Le cadrage doit faire partie intégrante d'une vaste et systémique stratégie de gestion des risques d'inondation (GRI), plutôt que de porter sur des sites individuels. Les exemples de stratégies systémiques de GRI comprennent le *San Francisco Bay Sea-level Rise Adaptation Framework* (Cadre d'adaptation à l'élévation du niveau de la mer dans la baie de San Francisco; Point Blue Conservation Science, 2019) et les plans de gestion du littoral pour l'Angleterre et le Pays de Galles (Environment Agency, 2022).

Le chapitre 3 présente un processus détaillé pour cadrer les possibilités d'adaptation dans un portefeuille existant d'actifs de GRI, et déterminer les options convenables. Bridges et coll. (2021) offrent également une description exhaustive des étapes et des résultats relativement à l'étape de cadrage. Voici un résumé des tâches et considérations potentielles relatives au cadrage d'un projet d'adaptation :

- Déterminer et mobiliser les partenaires du projet, les spécialistes clés et les parties prenantes (voir la section 4.2).
- Citer en exemple des projets similaires antérieurs, y compris les résultats d'activités de mobilisation antérieures.
- Définir le problème, la visée, les besoins et les objectifs du projet de manière collaborative.
- Définir le système (c.-à-d. les importants processus physiques, environnementaux, sociaux et économiques).
- Commencer à délimiter les contraintes du projet (notamment les contraintes spatiales, temporelles, réglementaires, de gouvernance et financières) et les possibilités d'adaptation (voir la section 3.2 et les sections 4.2 à 4.6).
- Commencer à cerner les options d'adaptation possibles (voir le chapitre 2).
- Déterminer les mécanismes potentiels de financement ou de subventions (voir la section 4.4).
- Préparer un budget initial (approximatif) du projet, qui devrait couvrir les coûts des étapes de planification et conception, d'aménagement, de suivi, de gestion adaptative et d'entretien.
- Obtenir le financement nécessaire pour commencer les premières analyses, y compris l'évaluation des conditions de base et l'évaluation des options (voir la section 3.3).

Il faut également, au cours de l'étape de cadrage, comprendre de façon générale les considérations techniques (voir le chapitre 5).

4.2 Rôles et responsabilités

Les spécialistes qui ont pris part à l'atelier de la CCE (DHI, 2022b) ont indiqué les gouvernements, les collectivités, les promoteurs, les propriétaires fonciers et les entités privées comme étant des groupes susceptibles d'assumer la responsabilité des SFN. Dans l'ensemble, il est considéré que les gouvernements ont la plus grande responsabilité. Au Canada, au Mexique et aux États-Unis, étant donné

le chevauchement des compétences entre différents ordres de gouvernement, il peut être difficile de déterminer duquel relèvent les zones côtières. Divers paliers de gouvernement et organismes non gouvernementaux réclament des pouvoirs, des responsabilités, des droits ou des intérêts relatifs aux zones littorales. Les peuples autochtones, ainsi que les autorités locales et les gouvernements provinciaux, d'États et fédéraux ont des compétences relativement aux zones côtières et marines, et leurs visées peuvent diverger. En outre, ces zones peuvent être l'objet de nombreuses lois, de traités, de droits souverains et de déclarations (dont la Déclaration des Nations Unies sur les droits des peuples autochtones). Il importe donc que tous les ordres de gouvernement assument leur part de responsabilité et agissent en collaboration pour établir un cadre stratégique et réglementaire qui facilitera la mise en œuvre des SFN.

Les gouvernements fédéraux exerceront probablement des responsabilités de haut niveau, comme la création et la gestion des politiques et réglementations, le financement et l'établissement d'orientations. Les gouvernements fédéraux sont responsables de la création de programmes de financement auxquels sont admissibles les autorités locales (voir la section 4.4.). Les gouvernements fédéraux sont également responsables de certains actifs d'infrastructure publics, comme les routes et infrastructures militaires, qui pourraient faire l'objet de GRI. Par exemple, le gouvernement fédéral américain priorise l'adaptation des bases militaires au moyen des SFN (The White House, 2022) et envisage les SFN pour assurer la résilience des routes côtières (Federal Highway Administration, 2018). Les organismes gouvernementaux d'États et provinciaux sont responsables des politiques, objectifs et règlements plus détaillés qui répondent aux besoins particuliers de leur région, et assurent eux aussi le financement. Les gouvernements d'États et provinciaux sont également responsables de la gestion de certains types d'infrastructures qui pourraient avoir besoin d'adaptation. Au Canada, par exemple, la gestion des infrastructures routières et la gestion des digues réglementées relèvent toutes deux des provinces.

Les autorités locales devront également établir des politiques et des réglementations, notamment en ce qui concerne les objectifs et politiques de planification du territoire, de manière à faciliter et à favoriser les SFN (Pathak et coll., 2022). Les autorités locales joueront un rôle central dans la détermination des besoins, l'élaboration des plans de projet et la mise en œuvre des projets, puisque, bien souvent, ce sont les actifs côtiers existants relevant de leur compétence et compris dans leurs portefeuilles d'infrastructures existantes qui feront l'objet de projets d'adaptation. De même, les peuples autochtones côtiers devront examiner leurs infrastructures côtières, leurs besoins et leurs politiques en matière de GRI, ainsi que le potentiel des SFN pour répondre à ces besoins.

Compte tenu de la gouvernance fragmentée et des intérêts des multiples parties prenantes dans les zones côtières, il est crucial que les personnes prenant les décisions collaborent avec tous les ordres de gouvernement, les peuples autochtones, les titulaires de droits, les collectivités, les organisations (p. ex. : les autorités en matière de conservation), les organismes d'autorisation et les parties prenantes dès le début des processus de mise en œuvre des SFN pour assurer la prise en compte et l'intégration des besoins de toutes les parties. L'étude de cas 8 décrit l'initiative *Living Dike* (Digue vivante), réalisée en Colombie-Britannique (Canada), qui réunit une table ronde de représentants (de Premières Nations locales, de tous les ordres de gouvernement, d'organisations à but non lucratif, du milieu universitaire et de spécialistes de l'industrie) pour adapter les infrastructures de digues existantes en y incorporant des marais salins. La section 4.3 porte d'ailleurs sur la mobilisation.

Les collectivités et les propriétaires de terrains privés ont une part de responsabilité dans la détermination des besoins, la mobilisation ou le lobbying auprès des gouvernements et des autorités locales, en plus de participer au processus de mobilisation. Les propriétaires de terrains privés confrontés à des risques d'inondation ou d'érosion pourraient envisager l'adaptation du littoral au moyen des SFN afin de réduire ces risques.

La tâche de concevoir et de mettre en œuvre les projets axés sur les SFN reviendra aux équipes de projet. Comme tout projet axé sur les SFN, l'adaptation requiert une équipe pluridisciplinaire de spécialistes, et

souvent l'inclusion de personnes ayant une expertise et des connaissances locales (Suedel et coll., 2021; Fonds mondial pour la nature, 2016). Les projets de GRI axés sur les SFN en zones côtières sont souvent dirigés par des ingénieurs des travaux maritimes, des géomorphologues de zones côtières et des biologistes marins. Ces équipes peuvent néanmoins inclure des spécialistes techniques des domaines de la météorologie, des changements climatiques, de l'hydrogéologie, de l'ingénierie géotechnique, de l'ingénierie des structures marines et du génie civil, en plus des spécialistes de l'environnement (voir la section 5.2), des sciences sociales (voir la section 5.3) et de l'économie (voir la section 5.4).

Étude de cas 8. L'initiative *Living Dike* (digue vivante)

L'initiative *Living Dike* (Digue vivante) Aménagement de marais salins pour adapter l'infrastructure d'une digue

Baie Boundary
(Colombie-Britannique),
Canada

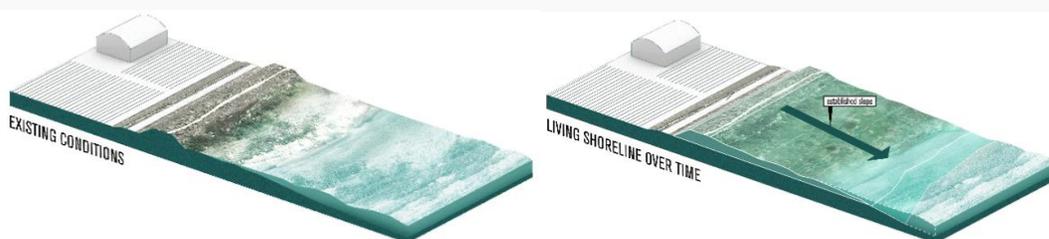
La baie Boundary compte environ 400 ha de marais salins et de vastes vasières (Molnar et coll., 2021). Elle est bordée par environ 15 km de digues qui protègent de basses terres agricoles, des collectivités et des infrastructures contre les inondations côtières. Les marais salins en place constituent un habitat important pour les saumons juvéniles et les oiseaux migrateurs et servent à dissiper l'énergie des vagues sur leurs pentes douces avant qu'elles n'atteignent les digues. À mesure que s'élève le niveau de la mer, le prisme de marée se déplacera vers l'intérieur des terres, ce qui forcera une migration des marais et leur compression contre les digues – phénomène que l'on nomme « compression côtière ». La superficie des marais salins diminuera en conséquence, ce qui aura une incidence sur la disponibilité de l'habitat et sur la dissipation des vagues. Les digues actuelles ne sont pas conçues pour faire face à l'élévation du niveau de la mer ni à une plus grande exposition aux vagues suite à la perte des marais salins (SNC-Lavalin, 2018).

Afin de s'adapter à l'élévation du niveau de la mer, les villes de Surrey et de Delta ainsi que la Première Nation de Semiahmoo ont fait équipe (Molnar et coll., 2021) pour mettre en œuvre une méthode innovante décrite d'abord par Westcoast Environmental Law et SNC-Lavalin en 2018 : l'initiative *Living Dike* (SNC-Lavalin, 2018; Carlson, 2020). Cette initiative consiste en une recharge progressive des marais existants avec des sédiments fins pour les élever petit à petit sur plusieurs années (figure 25). Les marais et les organismes existants pourront ainsi migrer et s'adapter aux conditions changeantes, sans interruption des services écologiques qu'ils fournissent. L'extension et l'élévation des marais réduisent considérablement la nécessité de rehausser l'infrastructure de digues existante pour l'adapter à l'élévation du niveau de la mer.

La première étape du projet consiste à réaliser un projet pilote pour mettre à l'épreuve des variantes du concept de digue vivante (City of Surrey, 2022). La planification, la conception et l'autorisation ont commencé en 2020. L'aménagement devait commencer en 2023 et se terminer en 2027. Les projets pilotes sont élaborés avec des conseils techniques d'une table ronde de représentants qui incluent de Premières Nations locales, tous les ordres de gouvernement, des organisations à but non lucratif, le milieu universitaire et des spécialistes de l'industrie. Les données collectées dans le cadre du projet pilote contribueront aux étapes ultérieures du projet et éclaireront la planification de l'adaptation dans la région.

Le projet pilote a été financé par le Fonds d'atténuation et d'adaptation en matière de catastrophes d'Infrastructure Canada et par le Secrétariat de la planification des mesures d'urgence des Premières Nations.

Figure 25. Illustration conceptuelle des conditions existantes (à gauche) et de la conception future (à droite) d'une digue vivante potentielle



Source : Lokman, 2022

4.3 Communications et mobilisation

Les projets d'adaptation au moyen des SFN offrent un large éventail de possibilités d'adaptation, qu'il convient d'exploiter au maximum pour améliorer les résultats d'un projet. La mobilisation relative à un projet SFN passe par la communication entre l'équipe d'exécution du projet et l'ensemble des parties prenantes et des titulaires de droits concernés. Il est important que le processus de mobilisation commence tôt à l'étape de cadrage pour permettre leur participation à la définition des problèmes actuels et des besoins futurs, et à la détermination des solutions de rechange préférées (Bridges et coll., 2021). À cette fin, il convient d'établir un plan de ressources et de mobilisation dès les premières étapes du projet afin de s'assurer d'avoir des ressources suffisantes (dont le financement et l'expertise) pour que toutes les activités de mobilisation et de communication aient lieu. Une réévaluation fréquente de ce plan est de mise pour s'assurer que le degré et le type de mobilisation correspondent toujours à l'objectif du projet (Bridges et coll., 2021). Il importe de noter que la mobilisation doit être inclusive, équitable, accessible et constructive pour toutes les personnes que le projet pourrait toucher directement ou intéresser (Bridges et coll., 2021; IDB, 2020).

Il est utile de comprendre le degré de mobilisation requis (mobilisation faible, moyenne ou forte) à chaque étape du projet afin de déterminer les actions concrètes à mener. Les cas de faible mobilisation comprennent des projets présentant peu de conflits ou d'incertitudes, peu de possibilités de décisions et peu d'intérêt de la part des parties prenantes. L'encadré 18 donne des exemples de faible mobilisation dans le contexte des étapes d'un projet d'adaptation au moyen des SFN (adapté de Bridges et coll., 2021). Les cas de mobilisation moyenne comprennent des projets présentant des conflits relativement faibles, la participation de multiples parties prenantes et le besoin d'évaluer les compromis. Les cas de forte mobilisation comprennent des projets présentant un potentiel élevé de conflits ou d'incertitudes, aux nombreuses parties prenantes susceptibles d'être touchées (possiblement de façon disproportionnée) et exigeant beaucoup de compromis (Bridges et coll., 2021). Il est important de prendre en considération les résultats et la rétroaction de toute activité de consultation antérieure menée pour des projets similaires ou des projets dans des zones similaires. Si une mobilisation rigoureuse est souhaitable, s'il y a lieu, le degré de mobilisation atteint peut dépendre des contraintes de temps et de ressources propres au projet. Le chapitre 3 des *International Guidelines on Natural and Nature-based Features for Flood Risk Management* de l'US Army Corps of Engineers (Bridges et coll., 2021) constitue une référence complète en matière d'activités de mobilisation recommandées dans le cadre des projets axés sur les SFN.

Encadré 18. Exemples d'actions de mobilisation à toutes les étapes d'un projet d'adaptation axé sur les SFN qui requiert une faible mobilisation des parties prenantes

<p>Cadrage</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Déterminer la mobilisation globale requise • Identifier les parties prenantes • Créer un plan de mobilisation
<p>Planification</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Exécuter les activités de mobilisation avec les parties prenantes concernées • Obtenir du feedback à propos d'activités particulières • Améliorer les détails et la qualité, dans la mesure du possible
<p>Conception</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Présenter le plan définitif aux groupes de parties prenantes concernés ou touchés • Diffuser de l'information sur la nature et le calendrier des activités • Préciser la personne à contacter en cas de problème
<p>Mise en œuvre</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Réexaminer et modifier ou adapter le plan de mobilisation à mesure que l'on acquiert de nouvelles informations et données
<p>Exploitation</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Poursuivre la mobilisation durant les étapes de gestion et de suivi • S'assurer que les parties prenantes sont régulièrement informées des activités de gestion, d'entretien et de suivi

Source : Adapté de Bridges et coll., 2021

Une première mobilisation pourrait permettre aux parties prenantes et aux membres du projet de déterminer d'autres possibilités d'amener de multiples avantages grâce à leurs points de vue et objectifs uniques (Bridges et coll., 2021). L'intégration d'un groupe diversifié de parties prenantes (p. ex. : ONG, autorités locales et régionales, industrie locale, scientifiques, propriétaires fonciers, groupes autochtones marginalisés, membres de la collectivité) peut également hausser le potentiel d'adhésion ou de financement de la part de groupes motivés, s'ils estiment que des avantages connexes viendront maximiser leurs investissements (Brill et coll., 2021). Plusieurs méthodes de communication différentes pourraient être nécessaires pour mobiliser efficacement divers publics, afin que tous les groupes de parties prenantes puissent se familiariser avec les objectifs et besoins du projet.

Pour plus d'informations sur la mobilisation des parties prenantes, consulter la section 3.3 du document intitulé *Avantages connexes*.

4.4 Financement

Le financement des SFN peut provenir de diverses sources : des institutions financières internationales, des gouvernements, des ONG et des institutions privées. Toutefois, l'accès à ce financement demeure l'un des principaux problèmes, comme l'ont indiqué les personnes ayant participé à l'atelier de la CCE (DHI, 2022b). La présente section offre une vue d'ensemble des différents types de financement, et en donne quelques exemples. La section 3.3 du document intitulé *Suivi de l'efficacité* comprend plus d'information sur les possibilités de financement. Silva Zuniga et coll. (2020) ainsi que Pathak et coll. (2022) offrent de l'information complémentaire sur les possibilités de financement. De l'information sur les possibilités de financement émergentes peut également être trouvée sur la plateforme de connaissances sur la croissance verte et la plateforme de financement vert pour l'Amérique latine et les Caraïbes (voir l'encadré 19).

Les fonds publics constituent actuellement la source de financement la plus courante pour les SFN (PNUE, 2021); ce financement provient principalement de subventions fédérales (p. ex. : le programme *Building Resilient Infrastructure and Communities* aux États-Unis et le Fonds des solutions climatiques axées sur la nature au Canada), de subventions d'États et de provinces (comme le *Florida Resilient Coastlines Program*) et de prêts des autorités locales (Pathak et coll., 2022). Les autorités locales sont moins susceptibles de fournir un financement en raison de leurs budgets limités, mais elles pourraient explorer des options de partenariat avec le secteur privé. Parmi les autres mécanismes potentiels de financement par les gouvernements, on compte les crédits carbone (voir la section 6.2.2), les prêts et les obligations (p. ex., Global Centre on Adaptation, 2021). L'encadré 19 présente une brève liste de certaines possibilités de financement offertes par les institutions internationales et les gouvernements fédéraux; cette liste n'est pas exhaustive et vise à fournir des exemples des principales sources de financement disponibles.

Il existe au Mexique deux fonds destinés à promouvoir la GRI : le *Fondo de Desastres Naturales de México* (FONDEN, Fonds mexicain pour les catastrophes naturelles) et le *Fondo de Prevención de Desastres Naturales* (FOPREDEN, Fonds de prévention des catastrophes naturelles). Le *Fondo Sectorial de Investigación Ambiental* (FSIA, Fonds sectoriel pour la recherche environnementale) finance des initiatives visant à accroître la résilience locale aux effets des changements climatiques (OCDE, 2021). Néanmoins, les allocations budgétaires pour la mise en œuvre et le suivi des SFN sont rares. Les agences internationales de développement, les banques multilatérales et le secteur privé ont contribué à faciliter les initiatives de SFN au Mexique. Par exemple, reconnaissant la difficulté d'augmenter le financement des SFN en puisant dans les budgets publics, le Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD) cherche à stimuler la participation du secteur privé dans l'élaboration de mécanismes de financement non gouvernementaux (PNUD BIOFIN, 2021).

Encadré 19. Exemples de financement national et international

Institutions internationales :

- Fonds vert pour le climat 

Financement du gouvernement du Canada :

- Fonds des solutions climatiques axées sur la nature 
- Fonds d'atténuation et d'adaptation en matière de catastrophes 
- Fonds pour les infrastructures naturelles 

Financement du gouvernement des États-Unis :

- *Building Resilient Infrastructures and Communities* (Construire des infrastructures et des collectivités résilientes) 
- National Coastal Resilience Fund (Fonds national de résilience des zones côtières) 

Financement du gouvernement du Mexique :

- *Fondo de Desastres Naturales de México* (FONDEN, Fonds mexicain pour les catastrophes naturelles) 
- *Fondo de Prevención de Desastres Naturales* (FOPREDEN, Fonds de prévention des catastrophes naturelles) 

Ressources :

- *Restore Your Coast* (ressource permettant de trouver des sources de financement pour des projets aux États-Unis) 
- *Green Growth Knowledge Platform* (Plateforme de connaissances sur la croissance verte) 
- *Green Finance for Latin America and the Caribbean* (Plateforme de finance verte pour l'Amérique latine et les Caraïbes) 
- *Climate Funds Update* (Dernières nouvelles sur les fonds climatiques) 

Le secteur privé peut fournir des fonds sous forme de prêts, d'obligations vertes et d'assurances. L'étude de cas 4 dans le document intitulé *Suivi de l'efficacité* donne un exemple d'utilisation d'une assurance pour financer le suivi et l'entretien du récif barrière méso-américain dans l'État mexicain du Quintana Roo (TNC, 2021). Au Canada, de nouvelles mesures incitatives inspirées de ce projet mexicain sont en cours d'élaboration. L'Initiative sur les actifs naturels s'associe à Swiss Re et au Bureau d'assurance du Canada (BAC) dans le cadre d'un projet pilote visant à développer de nouvelles solutions d'assurance pour les autorités locales qui fourniraient des indemnités pour les dommages causés aux actifs naturels assurant une protection contre les inondations (MNAI, 2023; BAC, 2023). Les obligations à impact environnemental ont réussi à associer des investisseurs à des municipalités qui projettent des travaux environnementaux; par exemple, la première obligation à impact environnemental aux États-Unis a financé le *Storm Water Project* (projet relatif aux eaux pluviales) de la société des eaux Washington DC Water (Quantified Ventures, 2022) et pourrait également être appliquée aux projets de SFN.

Il existe des possibilités de financement de plus en plus créatives, telles que les partenariats public-privé, un modèle de financement courant qui repose sur la collaboration ou le partenariat d'entités des secteurs public et privé pour financer des projets (Eyquem, 2021), ainsi que le financement mixte (p. ex., Earth Security, 2021). Comme solution de rechange aux options de financement habituelles, les collectivités peuvent lever des capitaux pour des projets à petite échelle par l'intermédiaire de programmes de financement participatif et de subventions communautaires (Pathak et coll., 2022). Les promoteurs

intègrent également de plus en plus de SFN dans les aménagements côtiers afin d'attirer les investissements privés.

4.5 Règlements

Différents niveaux de réglementation gouvernementale s'appliquent aux SFN, car les gouvernements fédéraux, provinciaux, d'États, territoriaux, municipaux et autochtones ont tous des responsabilités en matière de GRI (p. ex., Vouk et coll., 2021; West Coast Environmental Law, 2022). Les dispositions réglementaires relatives aux SFN sur le plan fédéral ou national relèvent souvent de règlements généraux sur les changements climatiques, l'adaptation à ces changements, la gestion des risques ou les infrastructures. Les SFN sont parfois directement mentionnées, mais les dispositions et objectifs précis ne sont pas toujours définis (DHI, 2022b; Rahman et coll., 2019). Ainsi, il existe une possibilité d'incorporer les SFN de manière plus approfondie dans le paysage réglementaire à mesure qu'elles deviendront une solution plus acceptée et mieux connue.

En raison de la complexité des compétences qui se chevauchent et de la réglementation qui varie d'un pays à l'autre et à l'intérieur d'un même pays, l'avis d'un spécialiste local sera nécessaire pour s'y retrouver dans l'environnement réglementaire relatif à l'adaptation des infrastructures de GRI au moyen de SFN dans une région donnée.

Des politiques et des réglementations propres aux SFN sont mises en place à l'heure actuelle en Amérique du Nord. Les États-Unis ont annoncé une politique fédérale en matière de SFN, décrite dans l'étude de cas 9, qui définit les intentions, les objectifs et les solutions pour les SFN et jette les bases d'un cadre réglementaire. La *Bipartisan Infrastructure Law* (Loi bipartisane sur les infrastructures) est actuellement le principal cadre réglementaire qui vise les SFN aux États-Unis (The White House, 2022), principalement en orientant et en finançant les organismes gouvernementaux responsables des côtes, tels que la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA, Administration nationale des systèmes océaniques et atmosphériques; NOAA, 2022a). Le gouvernement du Canada a publié une Stratégie nationale d'adaptation (2023), qui fournit un cadre d'action national pour la mise en œuvre de solutions d'adaptation, telles que les SFN, ainsi qu'un Plan d'action pour l'adaptation qui orientera les futurs programmes et investissements fédéraux dans ce domaine (Environnement et Changement climatique Canada, 2023).

Il existe à l'heure actuelle un cadre stratégique et réglementaire au Mexique, mais sa mise en œuvre n'en est qu'à ses débuts (DHI, 2022b). Le *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales* (Semarnat, ministère de l'Environnement et des Ressources naturelles) participe le plus activement à la planification et à la mise en œuvre des SFN au pays (OCDE, 2021). Les SFN font depuis peu partie de certaines des principales politiques du pays (p. ex., le *Programa Nacional Hídrico* [PNH, Programme national de l'eau] et le *Programa Sectorial de Medio Ambiente y Recursos Naturales 2020-2024* [Programme sectoriel 2020-2024 pour l'environnement et les ressources naturelles]) (OCDE, 2021). De nombreuses institutions gouvernementales prennent part à la gestion et au développement de zones côtières au Mexique, et il existe plus de 40 lois et règlements applicables à ces zones. Parmi les lois fédérales pertinentes pour la SFN, citons la *Ley General de Bienes Nacionales* (Loi générale sur les actifs nationaux), la *Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente* (Loi générale sur l'équilibre écologique et la protection de l'environnement), la *Ley de Vida Silvestre* (Loi sur les espèces sauvages), la *Ley de Cambio Climático* (Loi sur le changement climatique) et la *Ley de Asentamientos Humanos* (Loi sur les établissements humains).

Les politiques et réglementations plus générales peuvent fixer des objectifs que doivent suivre les gouvernements d'États ou provinciaux et locaux lorsqu'ils élaborent leurs propres réglementations, qui seront plus détaillées et adaptées aux besoins de la région ou de la localité. Les réglementations provinciales et d'États dans les trois pays influent grandement sur les projets de SFN, car les permis de construire et les autorisations dépendent du respect des exigences définies dans ces réglementations. Les

règlements qui concernent l'adaptation, la gestion des catastrophes, la protection de l'environnement et les infrastructures et les plans de gestion côtière contiennent les dispositions réglementaires des provinces et États relatives aux SFN. Par exemple, le *California Coastal Act* (Loi californienne sur les côtes) définit les réglementations relatives aux aménagements côtiers dans l'État (California Coastal Commission, 2023); au Canada, la *Nova Scotia Coastal Protection Act* (Loi sur la protection des côtes de la Nouvelle-Écosse; Nouvelle-Écosse, 2021), une réglementation provinciale similaire, vise les mêmes objectifs.

À l'échelle locale, dans les trois pays, les réglementations pertinentes pour les SFN concernent principalement l'aménagement du territoire (Pathak et coll., 2022), l'adaptation aux changements climatiques et les politiques environnementales. Les règlements locaux relatifs à l'environnement et aux permis d'aménagement peuvent avoir la plus grande incidence sur les projets de SFN. Pour qu'ils soient approuvés, ces projets doivent être conçus de manière à satisfaire aux exigences de règlements municipaux particuliers en matière de construction dans les zones côtières et doivent respecter les règlements environnementaux.

Étude de cas 9. Soutien politique et financier du gouvernement fédéral pour les SFN

Plan directeur pour les solutions fondées sur la nature

États-Unis

Financement fédéral et soutien réglementaire pour les SFN aux États-Unis

En 2022, le gouvernement des États-Unis a annoncé la *Nature-based Solutions Road Map* (Plan directeur pour les solutions fondées sur la nature; White House Council on Environmental Quality, 2022), qui doit libérer le plein potentiel des SFN pour faire face au changement climatique, à la perte de nature et aux inégalités (The White House, 2022). Ce plan vise à fournir des mécanismes de financement et de réglementation pour permettre la mise en œuvre des SFN, tout en donnant l'exemple priorisant l'adaptation d'installations et d'actifs fédéraux. Ces travaux donnent ensuite lieu à des études de cas et à des lignes directrices.

Du financement est offert par l'intermédiaire du programme *Building Resilient Infrastructure and Communities* (Construire des infrastructures et des collectivités résilientes) de la *Federal Emergency Management Agency* (FEMA, Agence fédérale de gestion des urgences; FEMA, 2022), et des efforts sont déployés afin de rendre plus simple et plus accessible la présentation de demandes de financement. Un soutien particulier est accordé aux communautés défavorisées pour qu'elles mènent une analyse coûts-avantages, requise pour obtenir les permis de projets axés sur les SFN (The White House, 2022).

D'un point de vue réglementaire, les exigences de la FEMA en matière de gestion des plaines inondables imposeront désormais la prise en compte des SFN pour tous les projets susceptibles de toucher les plaines inondables ou les zones humides (The White House, 2022).

Le plan directeur vise également à fournir des conseils sur les outils pour évaluer les SFN, et un groupe de travail a pour tâche d'élaborer des lignes directrices pour les analyses coûts-avantages propres aux projets de SFN.

4.6 Moment d'exécution

Les possibilités d'adapter les infrastructures de GRI existantes au moyen des SFN existent tout au long du cycle de vie des actifs de protection côtière : lors de la construction, de la réparation, de la modification et du remplacement des infrastructures grises. Cependant, c'est lorsque l'infrastructure de GRI existante approche de la fin de sa vie utile ou qu'elle a besoin de réparations que se présente la

meilleure occasion d'adaptation au moyen des SFN. Cette dernière est envisageable aux étapes de planification de l'entretien, de la réparation ou du remplacement pour répondre aux besoins croissants et changeants en matière de GRI et des parties prenantes (Suedel et coll., 2021).

Par ailleurs, une adaptation au moyen des SFN est envisageable pour des infrastructures de GRI qui sont encore en bon état (c.-à-d. qui n'ont besoin d'être ni réparées ni remplacées), mais qui ne répondent pas aux besoins actuels ou futurs de GRI ou qui n'offrent pas suffisamment d'avantages connexes environnementaux, économiques et sociaux. Dans le même ordre d'idées, des zones considérées comme peu vulnérables lors du précédent cycle d'aménagement d'ouvrages de GRI (voir le chapitre 3) pourraient aujourd'hui être plus vulnérables par suite de l'évolution des conditions climatiques et de l'augmentation des densités de population à proximité du littoral, par exemple. Ces zones peuvent présenter une occasion de mettre en œuvre des SFN, l'adaptation étant réalisée dans le cadre d'activités de gestion adaptative des infrastructures de GRI existantes.

La durée du cycle de réalisation des SFN (de la conceptualisation à l'aménagement) varie considérablement en fonction de la complexité du projet, des règlements locaux, des activités de mobilisation et d'autres facteurs propres à chaque projet. Cependant, le cadrage, la planification, la conception et l'aménagement de nombreux projets SFN peuvent prendre d'une à cinq années. La performance des SFN varie souvent dans le temps : elle peut prendre du temps ou s'améliorer à mesure que les végétaux croissent et que le système s'adapte aux facteurs environnementaux. Une gestion adaptative et un suivi seront nécessaires pour assurer la réussite du projet (voir le chapitre 5 pour plus d'information sur les performances variables relatives aux composants physiques et écologiques des SFN). L'aménagement peut souvent s'achever en une saison, mais peut aussi s'étendre sur plusieurs années, en particulier quand une approche par étapes est nécessaire ou une gestion adaptative intensive s'impose. Le moment d'exécution des travaux d'aménagement varie en fonction du climat local, des créneaux environnementaux les moins dommageables, des fenêtres de marée, des heures de clarté et de la disponibilité des entrepreneurs, entre autres facteurs. Le suivi et la gestion adaptative doivent se poursuivre sur toute la durée de vie du projet, qui peut varier considérablement. Le document d'accompagnement intitulé *Suivi de l'efficacité* traite en détail de ce sujet.

5 Adaptation : considérations techniques

L'utilisation d'une approche systémique est fondamentale pour les solutions fondées sur la nature (SFN). Les approches systémiques incorporent un large éventail de processus physiques (ingénierie), environnementaux et sociaux et d'interconnexions – à différentes échelles spatiales et temporelles – dans le plan de conception et de mise en œuvre (Vouk et coll., 2021). Les projets d'adaptation au moyen des SFN doivent adopter une approche similaire, ce qui exige la prise en compte de nombreux paramètres techniques. En général, les considérations techniques peuvent être divisées en considérations d'ingénierie, écologiques, sociales et économiques. Le suivi à long terme et la gestion adaptative doivent également être considérés dès le début. Le présent chapitre donne un aperçu de ces principales considérations techniques.

5.1 Considérations d'ingénierie

Les adaptations au moyen des SFN peuvent apporter d'immenses avantages sociaux, économiques et environnementaux (voir le document intitulé *Avantages connexes*), s'ils sont bien conçus et mis en œuvre et gérés de manière adaptative. Généralement, le but d'une adaptation au moyen des SFN est que l'ouvrage s'entretienne, et que sa performance s'améliore au fil du temps (Bridges et coll., 2021); cependant, il faut s'attendre à ce qu'une gestion adaptative soit nécessaire, en particulier pendant l'aménagement et au cours des premières années suivantes. La *Federal Highway Administration* (Administration fédérale américaine des routes; Federal Highway Administration, 2018) recommande d'examiner les questions suivantes relatives à l'ingénierie pour guider les étapes de cadrage et de première élaboration des options :

- L'option est-elle techniquement réalisable?
- Est-elle raisonnable?
- Est-elle justifiable?
- Est-elle aménageable?

À l'étape de conception du projet (voir la figure 20), l'équipe de conception doit définir les matériaux, la taille des éléments à mettre en place, les élévations, les pentes et la méthode d'aménagement, entre autres (Federal Highway Administration, 2018). L'équipe de conception doit aussi tenir compte des considérations sociales, économiques et environnementales dans la conception et la gestion adaptative.

Si certaines adaptations au moyen des SFN sont bien définies dans la littérature et accompagnées de guides techniques d'aménagement, de nombreuses adaptations au moyen des SFN ne répondent pas aux directives techniques standards et ne se prêtent pas aux équations empiriques. La modélisation numérique, la modélisation physique ou les projets pilotes pourraient être nécessaires pour éclairer, affiner ou valider la conception (Fonds mondial pour la nature, 2016). Les outils de modélisation numérique hydrodynamique, géomorphologique et des vagues servent couramment à évaluer la performance de concepts de rechange ou à affiner la disposition, les pentes, les élévations ou le dimensionnement des matériaux d'un concept existant (Vouk et coll., 2021).

Les outils de modélisation géomorphologique sont particulièrement utiles pour évaluer la stabilité des systèmes fondés sur les sédiments (p. ex. : les recharges en sable) lors de tempêtes ponctuelles ainsi qu'à long terme, pour évaluer l'incidence des activités humaines (telles que le dragage) et pour éclairer le possible besoin de travaux d'entretien. Cependant, l'élaboration, l'étalonnage et la validation des modèles exigent la prise de données exhaustives sur le terrain. Des modèles physiques sont souvent utilisés pour les projets à haut risque ou lorsque les modèles numériques ne se prêtent pas à la situation (Vouk et coll., 2021; Wilson et coll., 2020). Les modèles physiques exigent habituellement beaucoup de temps et de ressources, et les installations pour exécuter ce type de travail sont limitées en Amérique du Nord. La gestion adaptative permet à l'équipe de conception de tirer des enseignements des résultats de

la surveillance et d'affiner le concept pendant et après l'aménagement afin d'améliorer la performance (voir la section 5.5).

Un ensemble plus complet, mais non exhaustif, de questions techniques visant à orienter les aspects de la conception liés à l'ingénierie est présenté ci-dessous (adapté de : Federal Highway Administration, 2018; BID, 2020; Suedel et coll., 2021; Vouk et coll., 2021; Fonds mondial pour la nature, 2016) :

Échelle spatiale et temporelle

- L'échelle physique correspond-elle à l'échelle des processus côtiers?
- L'échelle physique touche-t-elle la navigation ou empiète-t-elle sur les terres voisines?
- Le concept tient-il compte à la fois des processus de dégradation discrets et chroniques?
- Le concept tient-il compte du décalage pour atteindre la pleine performance?
- Quelle est la vie utile des composants structurels gris?
- Quelle est l'incertitude quant aux conditions futures au site? (une grande incertitude pourrait rendre la SFN plus souhaitable.)

Conception

- Comment les stocks de sédiments seront-ils maintenus, s'ils ne sont pas autosuffisants?
- Les modifications du profil transversal, de l'élévation de la crête et de la rugosité ont-elles été prises en compte, en réponse à des conditions morphologiques variables ou à des changements dans la végétation ou la croissance biologique?
- Les processus géotechniques et hydrogéologiques ont-ils été pris en compte?
- Comment les éléments vivants (c.-à-d. la végétation et les acteurs biologiques) contribueront-ils à la performance de la gestion des risques d'inondation (GRI)?
- Le projet risque-t-il d'avoir des effets négatifs sur les structures existantes?
- Le concept fonctionnera-t-il dans les conditions actuelles et futures des changements climatiques potentiels, étant donné diverses incertitudes?
- Le concept intègre-t-il une redondance suffisante ou des performances résiduelles de GRI compte tenu des processus connus, des incertitudes et du décalage?
- Existe-t-il des risques qui n'ont pas été atténués?

Aménagement et entretien

- D'où viendront les matériaux pour l'aménagement et l'entretien, et quand seront-ils disponibles?
- Quelle sera l'incidence sur la construction ou l'entretien des structures grises existantes?
- La mise hors service à la fin de la vie utile a-t-elle été envisagée?

Les *International Guidelines on Natural and Nature-based Features for Flood Risk Management* (Bridges et coll., 2021) fournissent les orientations les plus complètes sur la conception et la mise en œuvre des SFN. Le document *Nature-Based Solutions for Coastal Highway Resilience: An Implementation Guide* (Federal Highway Administration, 2018) fournit des conseils pratiques en matière de conception technique. Le *Practical Guide to Implementing Green-Gray Infrastructure* (Green-Gray Community of Practice, 2020, p. 107) fournit également une liste des documents d'orientation en matière de conception technique relatifs aux SFN. *Increasing Infrastructure Resilience with Nature-based Solutions* (BID, 2020) fournit des conseils sur les adaptations au moyen des SFN, conseils qui sont spécifiques à l'Amérique latine et aux Caraïbes. Le document d'accompagnement intitulé *Suivi de l'efficacité* comprend de plus amples renseignements sur le suivi à l'étape d'entretien.

5.2 Considérations environnementales

Les avantages connexes environnementaux, tels que la connectivité des habitats, la séquestration du carbone et l'amélioration de la qualité de l'eau et de l'air, sont des éléments fondamentaux de projets

axés sur des SFN. Il est donc vital de comprendre et d'observer la base de référence de l'écologie et de la biologie du système pour la conception, la mise en œuvre et la gestion adaptative de l'adaptation à l'aide de SFN. En particulier, cette compréhension soutient la conception et la gestion adaptative d'une SFN, y compris la décision concernant le(s) type(s) d'élément(s) et de matériau(x), leur emplacement et leur taille. La diversification des éléments et l'inclusion de composants adaptatifs peuvent également améliorer la résilience d'un système en favorisant de multiples lignes de défense contre les inondations et l'érosion (Vouk et coll., 2021).

Les systèmes environnementaux évoluent en permanence en réponse à des facteurs externes. Les changements climatiques et les impacts qui en découlent constitueront un défi de plus pour les systèmes environnementaux (qui peuvent inclure les SFN), ce qui entraînera leur adaptation dynamique à court, à moyen et à long terme (Bridges et coll., 2021). La résilience des systèmes environnementaux est un facteur clé de la fonctionnalité, de la durabilité et de la viabilité à long terme des SFN, qui doivent à leur tour s'adapter au comportement naturel des systèmes environnementaux.

Il y a souvent un décalage entre la mise en œuvre d'un projet et sa pleine performance. Il peut être difficile d'estimer le temps nécessaire pour concrétiser pleinement les avantages que procure une adaptation au moyen des SFN. Néanmoins, ce décalage doit être pris en compte et intégré dans le calendrier d'exécution du projet (c.-à-d. géré durant les étapes de conception et de gestion adaptative du projet), en sachant qu'il y aura un certain degré d'incertitude par rapport au temps nécessaire pour que les avantages se concrétisent pleinement. Cette incertitude pourra être gérée en consultant des spécialistes au sein de l'équipe de conception et en tirant des enseignements d'autres projets similaires mis en œuvre ailleurs. En outre, l'équipe de projet doit tenir compte des variations naturelles du système, qui peuvent influencer tant sur la performance de la GRI que sur celle des avantages connexes. Par exemple, il se peut que la mise en place d'un système récifal à usages multiples doive s'étendre sur plusieurs saisons de frai avant que se manifestent les résultats escomptés en matière de biodiversité marine et d'augmentation de l'abondance des poissons. Il y a aussi un décalage entre la plantation de végétaux et leur maturité, qui peut prendre d'une saison de croissance à plusieurs années, selon les circonstances propres au projet. Les *International Guidelines on Natural and Nature-based Features for Flood Risk Management* (Bridges et coll., 2021) fournissent des conseils complets sur l'importance des considérations relatives au cycle de vie et leur lien avec l'évolution de la performance des SFN.

Le cadrage des possibilités et options peut soulever plus d'une méthode pour réaliser les objectifs du projet; il faut alors faire des compromis pour restreindre le choix. Par exemple, la plantation d'espèces envahissantes à croissance rapide peut maximiser la capacité de stockage du carbone, mais aussi avoir des effets négatifs sur la végétation et la faune indigènes (pollinisateurs, oiseaux, insectes, etc.). Au minimum, une adaptation au moyen des SFN ne devrait jamais réduire la résilience d'un système ni avoir un effet négatif sur les valeurs écologiques adjacentes (Al-Rajhi, 2020).

Une série de questions techniques est fournie ci-dessous pour aider à guider les aspects environnementaux de la conception d'une adaptation au moyen des SFN (adapté de : Bridges et coll., 2021; Vouk et coll., 2021; Pathak et coll., 2022) :

Conception

- L'objectif premier des composants naturels est-il de fournir des services de GRI ou d'améliorer la valeur écologique?
- La SFN aura-t-elle des avantages nets positifs pour l'environnement?
- Y a-t-il des compromis à faire entre les différents avantages connexes?
- La SFN prévoit-elle l'espace nécessaire au fonctionnement des éléments et processus naturels?
- La SFN protège-t-elle ou restaure-t-elle une infrastructure naturelle essentielle?
- Quelles sont les conditions écologiques optimales requises à un endroit donné?

Adaptation aux changements climatiques

- Les changements climatiques nuiront-ils aux actifs naturels dont dépendra la performance de la SFN?
- Les éléments vivants (c.-à-d. la végétation et les acteurs biologiques) peuvent-ils résister aux facteurs de stress environnementaux prévus et potentiels?
- Quels sont les paramètres nécessaires pour concevoir des éléments d'amélioration durables sur toute la durée de vie du projet et adaptés aux effets prévus des changements climatiques?

Aménagement et gestion adaptative

- Quelle incidence l'aménagement aura-t-il sur les éléments vivants déjà en place?
- Quelle incidence les activités de surveillance et d'entretien auront-elles sur les éléments vivants existants?

Le document intitulé *Avantages connexes* fournit une liste exhaustive de potentiels avantages connexes environnementaux à prendre en compte dans le cadre d'un projet SFN. Le rapport *Use of Natural and Nature-Based Features for Coastal Resilience* (Bridges et coll., 2015) fournit plus de conseils sur leur utilisation pour accroître la résilience des zones côtières dans le contexte d'un climat changeant.

5.3 Considérations sociales

La capacité des collectivités à se préparer aux aléas climatiques, à intervenir et à s'en rétablir réduit considérablement la vulnérabilité de celles-ci aux risques d'inondation (Arkema et coll., 2017). Les principaux facteurs de vulnérabilité sociale aux aléas côtiers comprennent les écarts dans l'accès aux ressources (p. ex. : l'argent et la technologie), au pouvoir (p. ex. : l'influence politique), à la capacité (p. ex. : la capacité sociale à réagir) et à l'information. Ces éléments sont des sources d'inégalités en matière de réaction aux catastrophes et de reprise par la suite (Arkema et coll., 2017). La vulnérabilité sociale est souvent disproportionnellement plus élevée chez les groupes minoritaires et marginalisés et ceux qui vivent dans des collectivités à faible revenu aux taux de pauvreté élevés (Arkema et coll., 2017). Les écarts de revenus entre secteurs peuvent produire différents résultats socioéconomiques pour un projet en fonction de son emplacement. Par exemple, les coûts de remplacement dans un quartier cosu pourraient attirer des investissements plus importants afin de protéger les propriétés de plus grande valeur, même si fournir une protection contre les inondations à une collectivité plus densément peuplée ou à faible revenu pourrait procurer des avantages non économiques plus considérables (Arkema et coll., 2017). Il importe donc d'examiner dès le début du projet, au sein et en dehors de l'équipe de projet, les questions clés énumérées ci-dessous concernant l'équité, les peuples autochtones et l'accès.

Il est important de tenir compte du fait que les populations minoritaires, les collectivités historiquement marginalisées et les populations au statut socioéconomique inférieur sont souvent plus exposées aux risques climatiques en raison de leur situation géographique, de leur accès aux ressources, de leur statut économique et de leur situation par rapport à la propriété foncière (Pathak et coll., 2022). Si l'équité ne constitue pas une considération clé durant l'élaboration des mesures d'adaptation au moyen des SFN, les collectivités socialement vulnérables continueront d'être exposées de manière disproportionnée aux risques et aux défis climatiques (Pathak et coll., 2022). Les groupes minoritaires, les collectivités marginalisées et les personnes au statut socioéconomique inférieur n'ont souvent qu'un accès limité aux adaptations au moyen des SFN, qui peuvent procurer des avantages sur le plan social et sanitaire, comme des espaces verts qui améliorent le bien-être mental, réduisent les maladies chroniques et offrent des lieux sûrs pour faire de l'exercice (Pathak et coll., 2022).

Les actifs naturels et les améliorations peuvent également soulever des défis pour les collectivités socialement vulnérables en augmentant les coûts de logement ou de location et la valeur des propriétés, ce qui conduit à l'éco-embourgeoisement et au déplacement de résidents. L'équipe de conception du

projet doit tenir compte des vulnérabilités sociales et de la capacité d'adaptation dès les étapes de planification et de conception du projet. Pour leur part, les autorités locales doivent évaluer les concepts proposés afin d'éviter qu'un projet n'empire les vulnérabilités socioéconomiques ou ne soit mal adapté à ces collectivités (Pathak et coll., 2022). Les parties prenantes et titulaires de droits devraient participer dès le début au processus de planification afin de comprendre les besoins, les valeurs et les priorités. Les compromis entre avantages connexes devraient faire l'objet de discussions détaillées avec les parties prenantes et titulaires de droits afin de maximiser les bienfaits pour ces collectivités et de hausser l'adhésion du public.

De nombreux secteurs socialement vulnérables coïncident avec des communautés autochtones, qui ont souvent été marginalisées dans la prise de décisions publiques et privées (Löfqvist et coll., 2022). Pour les peuples autochtones du Canada, du Mexique et des États-Unis, l'amélioration des solutions relatives au climat et à la biodiversité n'est pas une nouveauté, mais bien une méthode qu'ils appliquent depuis des siècles (Reed et coll., 2022). Il est important de prendre en compte les perspectives et connaissances autochtones, souvent appelées connaissances écologiques traditionnelles, au moins autant que les systèmes de connaissances « occidentaux » dans le processus d'élaboration des SFN.

En résumé, les types et l'ampleur des avantages sociaux que procure une adaptation axée sur une SFN doivent reposer en grande partie sur les besoins, les valeurs et les priorités des parties prenantes locales et des titulaires de droits locaux. Les projets d'adaptation axés sur des SFN doivent nécessairement prendre en compte les considérations sociales. Pour aider à la conception socialement responsable des SFN comportant une gouvernance inclusive, l'Union internationale pour la conservation de la nature a publié la *Norme mondiale de l'UICN pour les solutions fondées sur la nature* (UICN, 2020); une série de questions techniques est fournie ci-dessous pour guider les aspects sociaux de la conception d'une SFN (adapté de Pathak et coll., 2022, et de Reed et coll., 2022) :

Équité

- L'équipe du projet tient-elle compte de la vulnérabilité sociale et économique des collectivités marginalisées?
- Y a-t-il une incidence sur le plan de l'équité en ce qui a trait à l'adaptation au moyen des SFN?
- Cette adaptation au moyen des SFN réduira-t-elle les risques pour la collectivité cible?
- Les parties prenantes locales et titulaires de droits locaux font-ils partie des cycles d'élaboration des SFN (y compris le cadrage, la planification et la mise en œuvre)?
- Y a-t-il représentation équitable dans le processus décisionnel?
- Les ressources, coûts et avantages sont-ils équitablement répartis?

Peuples autochtones

- Les groupes autochtones locaux ont-ils participé aux cycles d'élaboration des SFN (y compris le cadrage, la planification et la mise en œuvre)?
- La conception tient-elle compte des connaissances écologiques traditionnelles et des perspectives autochtones?
- Ce projet pourrait-il entraîner ou faciliter de la violence et une dépossession des terres au détriment des populations autochtones?

Accès

- Les personnes touchées ont-elles la possibilité de participer au processus décisionnel?
- Les personnes touchées ont-elles accès aux renseignements sur le projet?
- Existe-t-il des obstacles en matière de transport ou d'accessibilité qui empêcheraient les groupes marginalisés de bénéficier du projet proposé?

Le document intitulé *Avantages connexes* comprend une liste exhaustive d'avantages connexes sur le plan social à envisager dans le cadre d'un projet SFN. Le rapport *Linking social, ecological, and*

physical science to advance natural and nature-based protection for coastal communities (Arkema et coll., 2017) fournit des indications précieuses et des paramètres sociaux pour mesurer la vulnérabilité sociale aux aléas côtiers. Le rapport *Toward Indigenous visions of nature-based solutions: an exploration into Canadian federal climate policy* souligne l'importance de soutenir l'autodétermination durable des peuples autochtones pour éviter qu'ils ne subissent d'autres dommages. Le chapitre 3 des *International Guidelines on Natural and Nature-based Features for Flood Risk Management* (Bridges et coll., 2021) décrit également des stratégies détaillées de mobilisation des parties prenantes.

5.4 Considérations économiques

Au moment d'évaluer les options de GRI, une comparaison directe des coûts et des avantages, basée uniquement sur la performance en matière de GRI a souvent tendance à être privilégiée. Non seulement ce type d'évaluation dévalue-t-il les avantages connexes non tangibles, tels que l'équité et l'inclusion, mais il ne reflète pas non plus l'ensemble des retombées économiques sur le cycle de vie du projet. Le fait de ne pas tenir compte de toutes les retombées économiques d'un projet peut entraîner des conséquences imprévues considérables. Le document d'accompagnement intitulé *Avantages connexes* comprend un cadre qui inclut les avantages connexes dans l'évaluation des projets. Les solutions de rechange à l'analyse coûts-avantages peuvent inclure, entre autres, les éléments suivants :

- Évaluation de la valeur économique;
- Analyse d'entrées-sorties;
- Analyse du coût du cycle de vie
- Analyse des risques
- Analyse coût-avantage social

Tous les projets de SFN devraient prendre en compte un large éventail d'avantages connexes de nature économique et évaluer le coût total et les économies ou recettes sur la durée de vie du projet. Toutes les étapes du processus d'élaboration des SFN peuvent générer des coûts, y compris la conception, l'exploitation, la gestion, l'aménagement, le suivi et la gestion adaptative. Il est possible de générer des recettes en monnayant les avantages directs, par le tourisme, la création d'emplois ou des compensations carbone, par exemple (BID, 2020). C'est généralement à l'étape de conception que se font les estimations de coûts (Aerts, 2018); or, tous les coûts et toutes les économies peuvent ne pas se concrétiser simultanément, étant donné l'évolution des SFN (BID, 2020). Les coûts et économies peuvent également varier en fonction de fluctuations socioéconomiques qui touchent les coûts de main-d'œuvre, l'approvisionnement en matériaux et la valeur foncière (Aerts, 2018). Il importe donc de suivre et d'évaluer les avantages économiques connexes du projet au fur et à mesure de l'évolution de ce dernier, et de rapporter ces bienfaits aux parties prenantes du projet.

Les coûts directs d'une adaptation au moyen des SFN peuvent être répartis en différentes catégories : conception et aménagement, exploitation et gestion, coûts d'opportunité et coûts de transaction. Les coûts de conception et d'aménagement sont les investissements initiaux qui peuvent inclure des frais pour la planification, la conception, l'acquisition de terrains, l'obtention de permis, l'achat de matériaux et de machines et les coûts de main-d'œuvre (Aerts, 2018; BID, 2020). Les coûts d'exploitation et de gestion sont répartis tout au long du cycle de vie du projet et comprennent les coûts annuels nécessaires pour assurer l'exploitation, le suivi, les réparations et le remplacement d'équipements (Aerts, 2018; BID, 2020). Les coûts d'opportunité correspondent à la perte relative potentielle d'argent liée à la mise en œuvre d'une adaptation axée sur une SFN plutôt qu'une autre option (BID, 2020). Les coûts de transaction se rapportent au temps, aux moyens et aux ressources nécessaires pour faciliter le projet d'adaptation au moyen des SFN, y compris le coût du cadrage, de la planification, de la prise de décision, etc. Les coûts de transaction peuvent être élevés pour les promoteurs qui manquent d'expérience en matière de projets de GRI au moyen des SFN, ou pour les projets qui connaissent de

nombreux faux départs, changements de cadrage ou reprises, et les ressources requises augmentent le temps et les moyens requis (BID, 2020).

Il est souvent difficile d'estimer en argent les économies, les recettes ou la valeur liées aux avantages directs de la GRI ou aux avantages connexes d'un projet SFN, ces avantages étant souvent de nature non économique. Cependant, il est souvent utile et nécessaire de déterminer l'ampleur des avantages économiques que procure un projet. Les méthodes d'estimation peuvent être qualitatives ou quantitatives, en fonction des ressources disponibles et du résultat souhaité. Il importe de noter que les méthodes et indicateurs d'estimation doivent demeurer constants durant tout le cycle de vie du projet pour permettre une surveillance précise, un suivi de la performance et une gestion adaptative, ainsi que pour communiquer les avantages aux parties prenantes. Le document intitulé *Avantages connexes* comprend des guides techniques sur les méthodes d'estimation.

Il est également nécessaire de comprendre les coûts du projet (à toutes les étapes du cycle de vie des SFN) ainsi que toutes les sources de financement potentielles pour garantir la faisabilité d'un projet SFN. L'élaboration d'une stratégie de financement et l'estimation des coûts et des économies doivent avoir lieu au début du projet, et doivent être ajustées en fonction des nouveaux renseignements disponibles tout au long du cycle de vie du projet. Les possibilités de financement sont examinées plus en détail à la section 4.4.

Une série de questions techniques est fournie ci-dessous pour guider les aspects économiques de la conception d'une SFN (adapté de Pathak et coll., 2022, et BID, 2020) :

Coût

- Est-il possible d'intégrer l'adaptation au moyen des SFN dans les processus de planification existants?
- Sur quel horizon les coûts s'étaleront-ils?
- Cette adaptation au moyen des SFN est-elle moins coûteuse (installation, surveillance et entretien compris) que d'autres options?
- Existe-t-il d'autres options plus rentables?
- Quel est le coût des ressources (y compris les connaissances, le temps et les moyens requis) pour une adaptation au moyen des SFN?
- Quelle est l'ampleur de l'investissement requis pour les coûts initiaux, y compris le capital, la planification, les autorisations, les matériaux, la machinerie, l'acquisition de terrains, la main-d'œuvre et l'aménagement?
- Quel est le coût du projet SFN par rapport à d'autres stratégies de gestion des inondations côtières, comme les infrastructures grises ou la planification de l'utilisation du territoire?
- Quelle est l'ampleur de l'investissement à long terme nécessaire pendant le cycle de vie du projet, y compris l'exploitation, l'entretien, le suivi et l'équipement?

Valeur

- Le projet réduira-t-il les risques ou les dommages et, par conséquent, les coûts de rétablissement/réparation?
- Comment les avantages du projet SFN seront-ils estimés et monnayés, par exemple par la prévention des dommages, l'augmentation du tourisme ou l'amélioration de la qualité de vie?
- Quels sont les avantages à long terme du projet?
- Quels effets le projet aura-t-il sur l'économie locale et régionale, notamment dans les domaines de l'emploi, des revenus et du commerce?
- Quelles informations et données sont nécessaires pour évaluer les retombées économiques du projet SFN, et comment seront-elles collectées et analysées?
- Comment la valeur ou les économies intangibles seront-elles mesurées et monnayées?
- Les avantages économiques sont-ils répartis entre parties prenantes et titulaires de droits?

- Quels coûts compensatoires ce projet entraînera-t-il?
- Comment les avantages du projet SFN seront-ils répartis entre les différentes parties prenantes, dont les résidents, les entreprises locales et les organismes gouvernementaux?
- Quel est l'horizon pour concrétiser la valeur/les recettes/les économies?

Financement

- Quelle est la stratégie de mobilisation des parties prenantes?
- Quelle est la stratégie de financement?
- Quelles sont les sources de financement (y compris le financement fédéral et les possibilités de subventions)?
- Comment le projet axé sur des SFN sera-t-il financé et maintenu dans le temps?
- Existe-t-il des possibilités de synergie applicables à d'autres parties prenantes?

Le document intitulé *Avantages connexes* comprend une liste exhaustive d'avantages connexes sur le plan économique à envisager dans le cadre d'un projet SFN. Le document *Increasing infrastructure resilience with Nature-based Solutions* (BID, 2020) fournit des orientations sur l'évaluation économique des SFN et sur la manière dont les SFN peuvent accroître la valeur des projets d'infrastructure. Le document *A Review of Cost Estimates for Flood Adaptation* (Aerts, 2018) fournit des renseignements tirés de la littérature évaluée par les pairs sur les coûts d'aménagement et les frais liés à l'exploitation et à l'entretien des SFN.

5.5 Considérations relatives au suivi et à la gestion adaptative

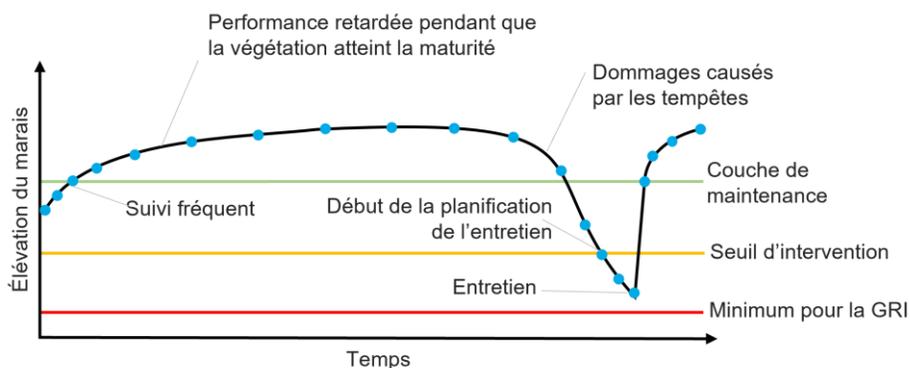
La gestion adaptative permet de prendre en compte et de réduire l'incertitude dans les projets de SFN grâce à une mise en œuvre progressive. Elle se plie à la nature dynamique de l'environnement et porte sur les aspects du projet qu'il est possible de maîtriser ou d'adapter pour rendre les étapes de planification plus souples et permettre l'évolution du concept (de Looft et coll., 2021 et références internes). Cela est particulièrement important, étant donné l'avenir incertain dans le contexte des changements climatiques (p. ex., Cado van der Lely et coll., 2021). Le suivi et la gestion adaptative d'une adaptation au moyen des SFN aideront également à concrétiser les avantages et avantages connexes de la GRI au fil du temps (Vouk et coll., 2021). Le suivi et la gestion adaptative sont donc au cœur du cycle des projets de SFN.

Inclure des considérations relatives au suivi et à la gestion adaptative dès le début du cycle d'un projet axé sur les SFN et maintenir ces activités tout au long du projet, permettra d'obtenir des résultats optimaux. Les considérations relatives au suivi et à la gestion adaptative comprennent la définition claire des rôles propres au projet, la fréquence et la durée du suivi (c.-à-d. le calendrier d'exécution), la méthode de collecte des données, la conformité aux politiques ou aux normes pertinentes, la formation requise pour réaliser les activités, et le financement (Vouk et coll., 2021).

Le calendrier d'exécution du suivi et de la gestion adaptative varie en fonction du projet et du type d'adaptation au moyen des SFN. Ce calendrier doit être pris en compte, depuis la collecte des données de référence jusqu'à la collecte des données opérationnelles. Comme la plupart des projets d'adaptation se déroulent sur de longues périodes, ils requièrent un entretien régulier pour s'assurer qu'ils fonctionnent comme prévu et procurent les avantages escomptés (Vouk et coll., 2021). Le passage d'une tempête pourrait même rendre nécessaires des réparations d'urgence, en plus de l'entretien régulier. La figure 26 illustre comment le suivi de l'élévation d'un marais (par exemple) pourrait influencer sur la prise de décisions quant au moment d'ajouter du substrat, et à la quantité requise. Dans cet exemple, les données de suivi révèlent que l'élévation du marais est inférieure au seuil d'intervention, ce qui déclenche la planification d'activités d'entretien. Une rétroaction prompte est nécessaire entre le programme de suivi et la gestion adaptative pour faciliter la prise de mesures par les personnes prenant

les décisions. Les travaux d'entretien doivent viser à rétablir la couche de maintenance et à toujours maintenir la performance de la GRI.

Figure 26. Modèle conceptuel des données de suivi de l'élévation d'un marais qui éclairent la gestion adaptative



Source : Adapté de Looff et coll., 2021, p. 290

Il faut prendre en compte les mesures et indicateurs de performance, ainsi que les méthodes de suivi et d'analyse afin d'assurer la constance tout au long du projet. Cela permettra de bien comprendre la performance et de comparer les projets (Pathak et coll., 2022). Les méthodes de collecte et d'analyse des données peuvent varier selon les particularités du projet, mais des mesures d'assurance et de contrôle de la qualité doivent toujours être mises en œuvre (p. ex. : métadonnées, documentation rigoureuse). Les documents intitulés *Suivi de l'efficacité* et *Suivi de l'efficacité : Méthodes et indicateurs proposés* comprennent des guides techniques complémentaires sur le suivi et la gestion adaptative.

La fréquence et la durée des activités de suivi et de gestion adaptative sont en lien direct avec le niveau de financement nécessaire (Vouk et coll., 2021). Les sources de financement peuvent inclure les institutions financières internationales, les institutions publiques (p. ex. : les budgets de gouvernements, subventions, organisations à but non lucratif, bénévoles) et les sources privées (p. ex. : les dons) (de Looff et coll., 2021; Silva Zuniga et coll., 2020). Les possibilités de financement d'une adaptation au moyen des SFN sont examinées en détail à la section 4.4, et les possibilités de financement propres au suivi sont abordées dans le document intitulé *Suivi de l'efficacité*.

Ci-dessous une série de questions techniques pour orienter les considérations relatives au suivi et à la gestion adaptative (adapté de : BID, 2020; de Looff et coll., 2021; et Pathak et coll., 2022) :

Échelle spatiale et temporelle

- Quand les avantages escomptés vont-ils se concrétiser?
- Quelles sont la fréquence et la durée prévues des activités de suivi?
- Quelle est l'échelle spatiale des activités de suivi?
- Le calendrier d'exécution est-il assez long pour constater les résultats d'une action en fonction de la dynamique temporelle?
- Y a-t-il suffisamment de temps pour mettre en œuvre la gestion adaptative?

Ressources

- Le financement est-il suffisant pour couvrir le suivi et l'entretien prévus?
- Comment le suivi sera-t-il financé?
- Les ressources humaines et l'équipement requis pour le suivi prévu sont-ils disponibles?

Données

- Comment les avantages/actions précis seront-ils mesurés?

- Quels indicateurs seront constamment mesurés?
- Quelles mesures serviront à déterminer si la SFN est performante ou si une adaptation est requise?
- Comment les données requises seront-elles collectées?
- Qui collectera les données?
- Comment les données seront-elles gérées, analysées et stockées?
- Comment les résultats seront-ils diffusés auprès des parties prenantes et des titulaires de droits?

Les documents intitulés *Suivi de l'efficacité* et *Suivi de l'efficacité : Méthodes et indicateurs proposés* comprennent des guides techniques plus approfondis sur l'élaboration et la mise en œuvre des plans de suivi. Le document *Increasing infrastructure resilience with Nature-based Solutions* (BID, 2020) fournit également des conseils sur les plans de suivi et d'évaluation pour les SFN. Le chapitre 7 des *International Guidelines on Natural and Nature-based Features for Flood Risk Management* (de Looff et coll., 2021) décrit des stratégies détaillées pour élaborer un plan de gestion adaptative. L'ensemble du document de Bridges et coll. (2021) présente des stratégies de suivi et de gestion adaptative pour des caractéristiques naturelles spécifiques (p. ex. : plages et dunes, îles, récifs).

6 Incitations à l'adaptation au moyen des SFN

Il existe divers types d'incitations pour adapter des infrastructures existantes de gestion des risques d'inondation (GRI) au moyen de solutions fondées sur la nature (SFN), au lieu des options d'ingénierie grise. Ces incitations peuvent être inhérentes au projet lui-même ou provenir de l'extérieur : de gouvernements, du secteur privé, d'ONG et d'organisations communautaires. Le présent chapitre donne un aperçu des différents types d'incitations qui existent actuellement, et de celles qui pourraient être mises en œuvre. Étant donné la diversité des possibilités et la complexité des aides financières possibles pour ce type de projet dans chacun des pays, il est recommandé d'obtenir l'avis de spécialistes locaux pour cerner les façons d'obtenir un soutien financier.

6.1 Incitations inhérentes

La capacité inhérente de certains types de SFN à s'adapter à des conditions environnementales changeantes (dont l'élévation régionale du niveau de la mer), et l'occasion qu'offrent ces types de projets de passer à une gestion adaptative, procurent un avantage par rapport aux approches grises conventionnelles dans le contexte d'un avenir incertain (p. ex., Cado van der Lely et coll., 2021). Les projets SFN fournissent également des incitations inhérentes à leur mise en œuvre sous forme de nombreux avantages connexes. Certes, les avantages connexes varient d'un projet à l'autre, mais tous les types de SFN relatives aux zones côtières mentionnées dans le présent document (voir le chapitre 2) procurent des avantages directs sur le plan de la GRI, ainsi que des avantages connexes de nature sociale, économique et environnementale propres à chaque projet, qu'une option d'infrastructure grise pourrait ne pas fournir. La plupart des projets SFN créent des emplois à l'échelle locale – aux étapes de la planification, de la conception, de l'aménagement, du suivi et de la gestion adaptative. Ils peuvent également avoir des retombées économiques à plus long terme, sous forme d'une augmentation du tourisme ou de recettes fiscales, par exemple. Tous les projets SFN comportent une quelconque forme d'habitat nouveau ou restauré qui fournira des services écosystémiques supplémentaires. Par exemple, une SFN axée sur le développement d'une mangrove peut améliorer la qualité de l'eau, la salubrité des sols et la séquestration du carbone. L'ajout de nouveaux espaces verts et récréatifs et des améliorations potentielles en matière de santé publique, entre autres, procurent des avantages sociaux. D'autres avantages sociaux (et culturels) sont possibles en facilitant l'utilisation des modes traditionnels de gestion des terres des peuples autochtones, comme la restauration des parcs à myes. Ces avantages connexes constituent des incitations inhérentes aux adaptations au moyen des SFN. Le chapitre 2 du document intitulé *Avantages connexes* traite de la façon de déterminer et d'évaluer les incitations qui pourraient être inhérentes à un projet.

6.2 Incitations gouvernementales

Des incitations à la mise en œuvre de SFN peuvent provenir de tous les ordres de gouvernement, depuis les accords internationaux intergouvernementaux (tels que la Convention-cadre de 2016 des Nations Unies sur les changements climatiques), jusqu'aux gouvernements nationaux ou fédéraux, aux gouvernements d'États/provinciaux et territoriaux et aux autorités locales. Les incitations gouvernementales, à tous les paliers de gouvernement, se répartissent en deux principales catégories présentées ci-dessous : 1) les dispositions réglementaires qui favorisent les SFN ou simplifient leur autorisation; 2) les incitations financières pour les projets et la recherche (notamment sous forme de subventions et de programmes). Outre ces deux principales catégories, les gouvernements peuvent aussi stimuler les projets SFN au moyen d'orientations et d'activités de sensibilisation concernant les avantages et les éléments techniques de la conception. Les gouvernements peuvent également établir des programmes de certification conçus pour reconnaître les entités privées qui mettent en œuvre des SFN (voir la section 6.3).

6.2.1 Incitations réglementaires

Pour que les personnes prenant les décisions mettent en œuvre des SFN, la réglementation doit être prise en compte dès les étapes liminaires de la planification des projets de GRI, qu'il s'agisse d'ouvrages entièrement nouveaux ou d'adaptations. Les politiques et règlements gouvernementaux peuvent stimuler l'utilisation des SFN en rendant obligatoire leur prise en considération dès les étapes de planification d'un projet. Par exemple, en 2016, la petite ville de Qualicum Beach, en Colombie-Britannique (Canada) a créé deux cadres d'évaluation pour évaluer les propositions d'aménagement du front de mer de façon systématique et transparente et pour éclairer la prise de décisions relatives à leur approbation. Les cadres exigent des promoteurs qu'ils comparent leur solution proposée à la méthode d'« inaction » (au minimum) et favorisent une tendance vers les SFN si la solution proposée a des incidences négatives sur le plan social, technique ou environnemental, comparativement à l'inaction. Le document intitulé *Avantages connexes* comprend de l'information complémentaire sur les cadres d'évaluation, plus précisément l'étude de cas n° 6, qui porte sur le front de mer de Qualicum Beach.

Au cours de la série d'ateliers de la CCE (DHI, 2022b), les spécialistes ont également souligné l'absence d'orientations concernant le processus d'autorisation et de délivrance de permis relativement aux SFN. Les gouvernements peuvent collaborer entre eux pour simplifier ou rationaliser la délivrance de permis et d'autorisations pour les SFN. Autoriser certaines exemptions en matière de planification, réduire les frais ou accélérer le traitement des demandes de permis pour les projets SFN pourraient également stimuler les promoteurs (Pathak et coll., 2022). Ils pourraient également éliminer les effets dissuasifs des exigences de planification opaques, en fixant des règles de planification claires propres aux SFN pour guider l'élaboration de tels projets. Par exemple, le programme pilote Green Shores, en Colombie-Britannique (Canada) prévoit une procédure d'autorisation accélérée pour les projets côtiers axés sur des SFN ainsi qu'une liste de vérification détaillée des levés et de la documentation nécessaires pour présenter une demande concernant une SFN (Stewardship Centre for British Columbia, 2022a).

6.2.2 Incitations financières

Lors de l'atelier de la CCE (DHI, 2022b), les spécialistes ont souligné l'accès au financement comme obstacle à la réalisation de projets SFN. D'après eux, l'incertitude entourant les solutions novatrices (y compris les SFN), l'absence de précédents et la spécificité des projets SFN d'un site à l'autre peuvent alourdir le risque perçu et donc nuire à l'obtention d'un financement. L'augmentation du risque peut également avoir un effet dissuasif lorsque les projets dépendent d'un financement privé qui doit être remboursé (Raška et coll., 2022). Les subventions fédérales et d'États de même que le financement par des programmes offrant des fonds sans obligation de remboursement ou à faibles taux d'intérêt constituent des incitations, tout en allégeant les coûts et en réduisant le risque financier (p. ex., le *National Coastal Resilience Fund* [Fonds national pour la résilience dans les zones côtières] aux États-Unis; NOAA, 2022b). Les gouvernements peuvent aussi conclure des partenariats public-privé pour financer des projets SFN. La section 4.4 en donne des exemples et indique des ressources pour déterminer les sources de financement pour les SFN.

Les incitations financières gouvernementales peuvent inclure les incitations fiscales et les subventions d'assurance pour les entités privées qui mettent en œuvre des projets SFN ou les soutiennent financièrement. Par exemple, les gouvernements pourraient offrir des incitations fiscales aux propriétaires de terrains privés qui utilisent des SFN ou qui restaurent sur leurs terres des écosystèmes côtiers qui procurent des avantages en matière de GRI. Les entités privées pourraient bien être incitées à soutenir ou à réaliser des projets SFN si elles étaient publiquement reconnues pour leur action, de manière à leur permettre de mieux satisfaire aux objectifs de responsabilité sociale des entreprises.

Les crédits carbone peuvent eux aussi constituer une incitation financière à la mise en œuvre de SFN, telles que les mangroves, les marais salins et les herbiers marins, qui procurent l'avantage connexe d'une séquestration du carbone. Des crédits carbone ont été accordés pour le projet de restauration de la

mangrove de San Crisanto, au Mexique (voir l'étude de cas n° 1 dans le document intitulé *Avantages connexes* pour plus de détails sur ce projet) (Godoy, 2022). De plus, au Canada, la Colombie-Britannique a accordé des crédits carbone pour des SFN terrestres mises en œuvre dans le cadre de la Coastal First Nations Great Bear Initiative (Coastal First Nations, 2010).

6.3 Incitations d'ONG et d'organisations communautaires

Les ONG et les organisations communautaires peuvent également offrir des incitations à la mise en œuvre de SFN de diverses façons, par exemple en faisant campagne et en exploitant des appuis, en fournissant du soutien technique ou du financement, en délivrant des certifications ou en dirigeant directement des projets. Au Mexique, par exemple, des ONG jouent un rôle prépondérant dans la mise en œuvre des SFN, la quasi-totalité des projets pilotes ayant bénéficié de leur participation (OCDE, 2021).

Les ONG et organisations communautaires peuvent hausser l'adhésion du public en menant des campagnes et des activités de sensibilisation aux SFN et à leurs avantages connexes, et en portant ces derniers à l'attention des responsables politiques et des personnes prenant les décisions. Un meilleur soutien du public peut mener à un plus grand engagement communautaire et encourager les collectivités à faire pression sur les gouvernements et l'industrie pour qu'ils envisagent des SFN aux fins de GRI. Une meilleure sensibilisation et des pressions sociales croissantes feront des SFN une priorité pour les gouvernements et les inscriront dans les plans d'action stratégiques. Elles favoriseront ainsi le financement public et l'adoption de règlements nécessaires pour faciliter les projets SFN. Les ONG peuvent de même stimuler l'adoption des SFN en contribuant aux programmes de subventions gouvernementaux, ou en offrant elles-mêmes des subventions, de manière indépendante ou en partenariat avec des entités privées.

Les ONG ou les gouvernements pourraient offrir des certifications et des récompenses aux particuliers qui réalisent ou soutiennent des projets SFN. Les certifications peuvent aider les entreprises privées à atteindre leurs objectifs de responsabilité sociale et à prouver leur engagement envers les questions environnementales – c'est là une exigence de plus en plus grande de la part de clients et de parties prenantes. Par exemple, en Colombie-Britannique (Canada) et dans l'État de Washington (États-Unis), le programme *Green Shores* (Littoral vert) évalue les aménagements côtiers par rapport à divers critères de conception durable et attribue des points aux projets (Stewardship Centre for British Columbia, 2022b). *L'Institute for Sustainable Infrastructure* (Institut pour des infrastructures durables) propose également un programme mondial de récompenses pour les projets d'infrastructure évalués en fonction de critères de durabilité, de résilience et d'équité dans le cadre de son *Envision Framework* (Cadre d'action « Imaginer ») (Institute for Sustainable Infrastructure, 2022).

Les ONG peuvent indirectement stimuler l'utilisation de SFN en soutenant des projets. Elles peuvent collaborer avec des parties prenantes pour cerner leurs besoins en matière de GRI ainsi que leurs options de gestion préférées, mener des recherches et diffuser des connaissances sur les SFN, offrir des guides techniques pour les membres de la collectivité qui prennent part à l'élaboration, et diriger directement des projets. Ces possibilités qui s'offrent aux ONG réduisent les obstacles et éliminent les contre-incitations à l'adaptation au moyen des SFN.

6.4 Incitations du secteur privé

Le secteur privé peut stimuler les SFN en offrant du financement, comme des subventions, des prêts, des partenariats public-privé, des obligations vertes et des produits d'assurance (voir la section 4.4). Outre le financement direct de projets, des entités privées peuvent financer la recherche sur les SFN afin de combler les écarts des savoirs susceptibles d'entraver la mise en œuvre de projets axés sur les SFN. Les entités privées peuvent aussi appuyer les pressions sociales exercées sur les gouvernements en faveur

des SFN en faisant du lobbying et en collaborant avec des ONG, des groupes communautaires et d'autres parties prenantes. S'il y a lieu, des entreprises privées qui ont une expertise technique pourraient conseiller les entités locales qui ont l'intention de mettre en œuvre des projets SFN.

7 Possibilités et orientations futures

L'adaptation d'infrastructures existantes de gestion des risques d'inondation (GRI) au moyen de solutions fondées sur la nature (SFN) présente de nombreux avantages, notamment une meilleure protection contre les inondations, une plus grande résilience au climat et de nombreux avantages connexes de nature sociale, économique et environnementale. Cependant, plusieurs défis et plusieurs écarts des savoirs font obstacle à leur adaptation; ils sont décrits à la section 1.3. L'encadré 20 présente un résumé des initiatives potentielles auxquelles peuvent avoir recours les personnes prenant les décisions pour écarter ces obstacles. Ces possibilités ont été soulevées lors de la série d'ateliers de la CCE (DHI, 2022b)).

Il est possible d'écarter, ou du moins de réduire la plupart des obstacles sociaux (ou liés aux attitudes) concernant l'adaptation d'infrastructures de GRI existantes au moyen de SFN en améliorant la communication, la mobilisation et le partage des connaissances. La communication peut être améliorée en organisant des sessions, des ateliers ou des séminaires sur les SFN et leurs avantages potentiels et en s'assurant que le format, le niveau de détail technique et les messages sont adaptés au public visé. Des initiatives complémentaires visant à étoffer et à partager les connaissances au moyen d'études, de projets pilotes et d'études de cas aideront à communiquer les avantages des SFN aux collectivités. Il est possible d'améliorer la mobilisation en l'intégrant dès le début du cycle de vie d'un projet, durant le processus de cadrage.

Il existe plusieurs façons de réduire les obstacles techniques : la recherche appliquée, l'élaboration de guides techniques complémentaires, l'éducation, la formation, les études de cas et le partage des connaissances. Les spécialistes qui ont participé à la série d'ateliers de la CCE (DHI, 2022b) ont maintes fois mentionné le besoin de guides techniques supplémentaires sur les SFN; or, étant donné le caractère nouveau de nombreuses SFN, des recherches complémentaires et des projets pilotes s'imposent pour soutenir l'élaboration de ces guides. Les études de cas constituent également une importante source d'information, mais elles sont souvent réalisées dans des régions similaires et n'exploitent qu'un nombre limité de techniques SFN. Il conviendrait d'axer les nouvelles études de cas sur des techniques plus innovantes, des régions sous-représentées, des échecs et des résultats à long terme. Il faut aussi réaliser des études de cas comparant les SFN aux infrastructures conventionnelles. La formation et le partage des connaissances sont réalisables en modifiant les programmes universitaires existants et en créant des communautés de pratique qui mettront l'accent sur les aspects pluridisciplinaires des SFN. Les régions nordiques auront aussi dans l'avenir des occasions d'apprendre des méthodes employées plus au sud, étant donné le déplacement des écotypes vers le nord sous l'effet des changements climatiques.

La variabilité saisonnière et à long terme des systèmes environnementaux naturels constitue également un obstacle important à l'adaptation au moyen des SFN. Encourager la réalisation d'études de cas qui comprennent des résultats de suivi à long terme et les mettre en évidence permettrait d'éviter cet obstacle. La mise en place de réseaux supplémentaires pour faire le suivi de données environnementales de base/standard (qui sont nécessaires à la conception des SFN) dans des zones où il existe peu de données de suivi à long terme permettra de réduire les incertitudes quant à la façon de comprendre l'environnement naturel. Le document intitulé *Suivi de l'efficacité : Méthodes et indicateurs proposés* recommande des données de suivi de base pour les SFN. De plus, l'élaboration de projections climatiques à plus petite échelle (régionale ou locale) pour l'ensemble de l'Amérique du Nord offrirait de l'information utile pour étayer les arguments pour l'adaptation au moyen des SFN.

Les spécialistes interrogés dans le cadre de la série d'ateliers de la CCE sur les SFN (DHI, 2022b) ont souligné à plusieurs reprises le manque de financement et le manque d'accès au financement comme étant les principaux obstacles à la mise en œuvre et à la gestion à long terme des SFN. En particulier, le financement manque pour le suivi à long terme, comme pour l'exploitation et l'entretien, ce qui favorise le financement de solutions grises hautement capitalistiques. En outre, les bailleurs de fonds semblent ignorer les avantages connexes potentiels des SFN qu'il est possible d'obtenir, soit avec le même niveau

de financement, soit avec un niveau légèrement plus élevé, que celui requis pour les projets de GRI habituels. L'établissement de flux de financement à l'échelle régionale permettrait d'ôter les obstacles au financement de projets pilotes au moyen de SFN novatrices, à l'adaptation d'infrastructures existantes, de la gestion adaptative à long terme des SFN et de la planification stratégique à grande échelle et à long terme des infrastructures de GRI. Les stratégies de financement doivent tenir compte des politiques, mécanismes et protocoles propres à chaque région (Brill et coll., 2021).

Les gouvernements peuvent encore soutenir l'adaptation au moyen des SFN en élaborant des incitations politiques et des lois qui obligent à prendre en compte de multiples options et à évaluer les avantages connexes, et qui encouragent l'investissement dans les SFN. Les incitations peuvent également encourager les décideurs à « faire et reconstruire mieux » (Vouk et coll., 2021) à la suite de catastrophes naturelles et de défaillances d'infrastructures. Les autres possibilités pour les institutions décrites dans l'encadré 20 concernent la diffusion d'information existante sur les avantages des SFN auprès d'organisations gouvernementales, la démonstration de la protection juridique de l'environnement ou des services environnementaux, et la rationalisation des modalités pour simplifier le processus d'autorisation des SFN.

Encadré 20. Possibilités et orientations futures relatives à l'adaptation au moyen des SFN et types d'obstacles que les actions abordent

Possibilités et orientations futures	Type d'obstacle visé			
	Social	Technique	Environn.	Institutionnel
1. Organiser ou financer des sessions, ateliers et séminaires sur l'adaptation au moyen des SFN.	✓	✓	○	✓
2. Encourager la mobilisation de parties prenantes diversifiées (responsables des politiques, peuples autochtones, groupes sociaux, etc.) dès le début du cycle de vie du projet.	✓	○	○	✓
3. Créer une communauté de pratique sur les SFN avec des spécialistes dans plusieurs disciplines, dans de multiples régions.	✓	✓	○	○
4. Soutenir et publier des travaux de recherche sur l'adaptation au moyen des SFN et sur les SFN novatrices, et élaborer des guides de conception.	✓	✓	○	○
5. Réaliser des projets pilotes d'adaptation au moyen des SFN et sur des SFN novatrices.	✓	✓	○	○
6. Encourager et mettre en évidence les études de cas qui comparent les SFN aux infrastructures grises conventionnelles.	○	✓	○	✓
7. Encourager et mettre en évidence des études de cas qui comprennent des résultats à long terme.	○	✓	✓	✓
8. Inclure une formation interdisciplinaire sur la conception et la mise en œuvre des SFN dans les programmes et diplômes universitaires.	○	✓	○	○
9. Mettre en place des réseaux supplémentaires pour héberger et partager les données de suivi standard (p. ex. les données sur les vagues) requises pour les concepts axés sur les SFN, et publier ces données.	○	✓	✓	✓
10. Réduire l'échelle des projections climatiques mondiales et nationales à l'échelle locale, pour réduire les incertitudes relatives à l'adaptation aux changements climatiques.	○	✓	✓	✓
11. Modifier les approbations réglementaires de manière à exiger la comparaison de plusieurs options (y compris une SFN et l'inaction).	✓	○	○	✓
12. Établir des flux de financement afin que les gouvernements régionaux et autorités locales puissent élaborer des plans de gestion stratégique des infrastructures de GRI.	○	○	○	✓
13. Établir des flux de financement à l'échelle de la région pour les projets pilotes axés sur les SFN et des projets SFN présentant un degré élevé d'innovation.	○	✓	○	✓
14. Établir des flux de financement à l'échelle régionale pour les projets d'adaptation axés sur des SFN.	○	○	○	✓
15. Distribuer les orientations existantes sur les SFN aux organismes gouvernementaux.	○	○	○	✓
16. Simplifier les procédures d'autorisation (c.-à-d. offrir des processus accélérés) pour l'aménagement, le suivi et la gestion adaptative des SFN.	○	○	○	✓
17. Résoudre les conflits entre règlements des compétences et d'organismes gouvernementaux.	✓	○	○	✓
18. Offrir des incitations politiques (p. ex. des allègements fiscaux) pour les adaptations au moyen des SFN.	○	○	○	✓
19. Assurer une protection juridique à l'environnement et aux services environnementaux.	○	○	○	✓

8 Conclusions

Le but des adaptations au moyen des solutions fondées sur la nature (SFN) est d'amorcer une transition des systèmes gris vers les systèmes verts. Le présent document fournit une synthèse des informations relatives à l'adaptation d'infrastructures au moyen des SFN dans le contexte de la gestion des risques d'inondation (GRI) au Canada, au Mexique et aux États-Unis. Il porte sur les options d'adaptation axées sur les SFN, la détermination des possibilités d'adaptation, les considérations administratives et techniques, les incitations aux adaptations au moyen des SFN, et les possibilités de combler les écarts des savoirs et d'écartier les obstacles.

Pour améliorer l'adoption des SFN, les personnes prenant les décisions doivent d'abord cerner les possibilités d'adaptation parmi leur portefeuille d'infrastructures de GRI et dans le cadre de la stratégie globale de GRI. La détermination des possibilités doit commencer dès les premières étapes d'un projet, et être l'objet de réévaluations périodiques tout au long du cycle de vie du projet. Le présent document propose plusieurs étapes clés pour aider à déterminer les possibilités : évaluer l'inventaire d'actifs de GRI, planifier la mobilisation des parties prenantes, déterminer les besoins et lacunes en matière de GRI, évaluer le caractère adéquat des sites pour les SFN et prioriser les actifs à adapter. Une fois que les actifs sont priorisés, il est alors possible de déterminer les options d'adaptation au moyen des SFN et les évaluer par rapport aux options grises et à l'inaction. Il importe de prendre en compte la faisabilité et l'incertitude des projets durant cette étape, et d'évaluer les options de manière holistique, en considérant à la fois les avantages sur le plan de la GRI et les avantages connexes de nature sociale, économique et environnementale.

La présente synthèse donne également un aperçu des considérations administratives clés (cadrage, rôles et responsabilités, communications et mobilisation, financement, règlements et moment d'exécution) relatives à l'adaptation au moyen des SFN. C'est à tous les ordres de gouvernement, aux autorités locales et aux propriétaires de terrains privés qu'il incombe d'adapter les infrastructures grises et de collaborer à cette fin. Le financement existe principalement sous forme de subventions gouvernementales, mais de plus en plus sous forme de fonds privés et de partenariats public-privé. Actuellement, le cadre réglementaire applicable aux SFN est relativement faible, mais il s'améliore; partout en Amérique du Nord, des propositions de politiques et de règlements sont élaborées à cet égard. Les considérations techniques (c.-à-d. concernant l'ingénierie, l'environnement, la dimension sociale, l'économie, le suivi et la gestion adaptative) sont propres à chaque projet. Les personnes prenant les décisions et l'équipe de projet doivent adopter des approches systémiques, la mobilisation continue et une gestion adaptative tout au long du cycle d'élaboration des SFN.

Le présent document présente des incitations existantes ou qui pourraient être créées pour favoriser l'adoption de l'adaptation au moyen des SFN. Les incitations inhérentes aux projets SFN incluent une grande variété d'avantages connexes, notamment environnementaux (p. ex. : habitats restaurés, amélioration de la qualité de l'eau), sociaux (p. ex. : nouveaux espaces verts, amélioration de la santé publique) et économiques (p. ex. : meilleures perspectives d'emploi, plus de tourisme). En outre, diverses organisations, dont les gouvernements, les ONG, les groupes communautaires ou le secteur privé, peuvent offrir des mesures incitatives. Celles qui existent actuellement sont principalement d'ordre financier et réglementaire par les gouvernements, comme les crédits d'impôt et la délivrance accélérée de permis. Toutefois, les ONG, les groupes communautaires et le secteur privé encouragent de plus en plus l'adoption des SFN par divers moyens : les plaidoyers, des fonds ou une expertise technique, et en montant directement des projets de SFN.

Enfin, les occasions de promouvoir les SFN sont nombreuses si l'on écarte les obstacles et comble les données manquantes pour déterminer et évaluer les possibilités d'adaptation. Il faudra plus de flux de financement ou de projets pilotes axés sur les SFN, et de détermination, d'évaluation et d'analyses à long terme, de suivi et de gestion adaptative en matière d'adaptation pour écartier les obstacles.

Bibliographie

- ACEC-BC, 2021. *The ACEC-BC Awards: Qualicum Beach Waterfront – Beach Creek Estuary Enhancement*. <acecbcawards.com/2021-awards/natural-resource-habitat/qualicum-beach-waterfront-beach-creek-estuary-enhancement/>. Consulté le 1^{er} décembre 2022.
- Adger, W.N, 2006. « Vulnerability ». *Global Environmental Change* 16: 268–281. En ligne : <doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006>
- Aerts, J.C.J.H, 2018. « A review of cost estimates for flood adaptation ». *Water (Switzerland)* 10(11): 1646. En ligne : <doi.org/10.3390/w10111646>.
- Anderson, C.C., G. Renaud, S. Hanscomb et A. Gonzalez-Ollauri, 2022. « Green, hybrid, or grey disaster risk reduction measures: What shapes public preferences for nature-based solutions? » *Journal of Environmental Management* (310) 114727. En ligne : <doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114727>
- Arkema, K.K., R. Griffin, S. Maldonado, J. Silver, J. Suckale et A.D. Guerry, 2017. « Linking social, ecological, and physical science to advance natural and nature-based protection for coastal communities ». *Annals of the New York Academy of Sciences* 1399 (1) : 5–26. En ligne : <doi.org/10.1111/nyas.13322>.
- Association internationale de normalisation [ISO], 2021. ISO 14091:2021(fr), *Adaptation au changement climatique — Lignes directrices sur la vulnérabilité, les impacts et l'évaluation des risques*. En ligne : www.iso.org/obp/ui/fr/#iso:std:iso:14091:ed-1:v1:fr.
- BAC, 2023. « Nature based solutions ». Bureau d'assurance du Canada. <<http://www.abc.ca/pe/disaster/nature-based-solutions>>. Consulté le 19 janvier 2023.
- Baine, M., 2001. « Artificial reefs: A review of their design, application, management and performance ». *Ocean Coast. Manag.* 44: 241–259. En ligne : <[doi.org/10.1016/S0964-5691\(01\)00048-5](https://doi.org/10.1016/S0964-5691(01)00048-5)>.
- Balke T., T.J. Bouma, E.M. Horstman, E.L. Webb, P.L. Erftemeijer et P.M. Herman, 2011. « Windows of opportunity: thresholds to mangrove seedling establishment on tidal flats ». *Marine Ecology Progress Series* 440 : 1–9. En ligne : <doi.org/10.3354/meps09364>.
- Barbier, E.B, S.D. Hacker, C. Kennedy, E.W. Koch, A.C. Stier et B.R. Silliman, 2011. « The value of estuarine and coastal ecosystem services ». *Ecological Monographs* 81(2) : 169–193. En ligne : <doi.org/10.1890/10-1510.1>.
- Beheshti, K., et M. Ward, 2021. *Eelgrass restoration on the U.S. West coast: a comprehensive assessment of restoration techniques and their outcomes*. Pacific Marine and Estuarine Fish Habitat Partnership. En ligne : <honu.psmfc.org/media/PMEP/Eelgrass_Restoration_Synthesis/Documents/PMEP_Beheshti_Ward_2021_EelgrassSynthesisReport.pdf>.
- BID, 2020. *Increasing infrastructure resilience with Nature-based Solutions (NbS)*. Banque interaméricaine de développement et Acclimatize—Building Climate Resilience. En ligne : <publications.iadb.org/publications/english/document/Increasing-Infrastructure-Resilience-with-Nature-Based-Solutions-NbS.pdf>.
- Brathwaite, A., E. Clua, R. Roach et N. Pascal, 2022. Coral reef restoration for coastal protection: crafting technical and financial solutions. *Journal of Environmental Management* 310 : 114718 En ligne : <doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114718>.

- Bridges, T.S., J.K. King, J.D. Simm, M.M. Beck, G. Collins, Q. Lodder et R.K. Mohan, 2021. *International guidelines on natural and nature-based features for flood-risk management*. : U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS. En ligne : <[dx.doi.org/10.21079/11681/41946](https://doi.org/10.21079/11681/41946)>.
- Bridges, T.S., P.W. Wagner, K.A. Burks-Copes, M.E. Bates, Z.A. Collier, C.J. Fischenich, J.Z. Gailani, L.D. Leuck, C.D. Piercy, J.D. Rosati, E.J. Russo, D.J. Shafer, B.C. Suedel, E.A. Vuxton, et T.V. Wamsley, 2015. *Use of natural and nature-based features (NNBF) for coastal resilience*. US Army Engineer Research and Development Center. En ligne : <<https://usace.contentdm.oclc.org/digital/collection/p266001coll1/id/3442/>>.
- Brill, G., T. Shiao, C. Kammeyer, S. Diringer, K. Vigerstol, N. Ofosu-Amaah, M. Matosich, C. Müller-Zantop, W. Larson et T. Dekker, 2021. *Benefit accounting of nature-based solutions for watersheds: guide*. United Nations CEO Water Mandate and Pacific Institute, Oakland, Californie. En ligne : <ceowatermandate.org/nbs/wp-content/uploads/sites/41/2021/03/guide.pdf>.
- Brock, K.A, J.S. Reece et L.M. Ehrhart, 2009. « The Effects of Artificial Beach Nourishment on Marine Turtles: Differences between Loggerhead and Green Turtles ». *Restoration Ecology* 17:297–307. En ligne : <<https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2007.00337.x>>
- Bryant, D., L. Burke, J. McManus et M. Spalding, 1998. *Reefs at risk. A map-based indicator of the threats to the world's coral reefs*. En ligne : <files.wri.org/d8/s3fs-public/pdf/reefs.pdf>
- Cado van der Lely, A., E. van Eekelen, D. Honingh, J. Leenders, S. McEvoy, E. Penning, M. Sterk, I. Voskamp, A. Warren et V. van Zelst, 2021. *Building with nature: a future proof strategy for coping with a changing and uncertain world. White Paper*. Ecoshape. En ligne : <www.ecoshape.org/en/enablers/management-monitoring-maintenance>
- California Coastal Commission, 2023. *California Coastal Act*. <www.coastal.ca.gov/laws/>. Consulté en ligne le 26 janvier 2023.
- Carlson, D., 2020. « Natural infrastructure for coastal flood protection in Boundary Bay, BC ». *Presentation by West Coast Environmental Law at the Nature-Based Climate Solutions Summit*. Summit Report, 54. En ligne : <sjsidavidson1.files.wordpress.com/2017/12/85b33-climate-summit-summary-report-v6.pdf>.
- Chávez, V., A. Uribe-Martínez, E. Cuevas, R.E. Rodríguez-Martínez, B.I. van Tussenbroek, V. Francisco, M. Estévez, L.B. Celis, L.V. Monroy-Velázquez, R. Leal-Bautista, L. Álvarez-Filip, M. García-Sánchez, L. Masia et R. Silva, 2020. « Massive Influx of Pelagic Sargassum spp. on the Coasts of the Mexican Caribbean 2014–2020: Challenges and Opportunities ». *Water* (10), 1–24. En ligne : <doi.org/10.3390/w12102908>.
- Chávez, V., D. Lithgow, M. Losada et R. Silva-Casarin, 2021. « Coastal green infrastructure to mitigate coastal squeeze ». *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience* 2(1) : 1–12. En ligne : <doi.org/10.1186/s43065-021-00026-1>.
- Chen, W.L, P. Muller, R.C. Grabowski et N. Dodd, 2022. « Green nourishment: an innovative nature-based solution for coastal erosion ». *Frontiers in Marine Science* 8 : 814589. En ligne : <doi.org/10.3389/fmars.2021.814589>.
- City of Surrey, 2022. *Mud Bay Nature-based Foreshore Enhancements*. <www.surrey.ca/services-payments/water-drainage-sewer/flood-control-and-prevention/coastal-flood-adaptation-projects/mud-bay>. Consulté le 2 septembre 2022.
- Coastal First Nations, 2010. *Forest Carbon Credits – Economic Revenue for Forest Conservation*. En ligne : <coastalfirstnations.ca/wp-content/uploads/2017/06/CFN-Carbon-Credit-info-brochure-.pdf>.

- Colombie-Britannique, 2020. *Hazard, risk and vulnerability analysis (HRVA). For local authorities and First Nations*. Emergency Management BC. En ligne : <www2.gov.bc.ca/assets/gov/public-safety-and-emergency-services/emergency-preparedness-response-recovery/local-government/hrva/guides/companion_guide_to_the_hrva.pdf>
- Colombie-Britannique, 2022. *The Dike Maintenance Act*. <www.bclaws.gov.bc.ca/civix/document/id/complete/statreg/00_96095_01>. Consulté en ligne le 26 janvier 2023.
- Costanza, R., O. Pérez-Maqueo, M. Luisa Martínez, P. Sutton, S.J. Anderson et K. Mulder, 2008. « The Value of Coastal Wetlands for Hurricane Protection ». *Source* 37(4) : 241–248. En ligne : <www.robertcostanza.com/wp-content/uploads/2017/02/2008_J_Costanza_HurricaneProtection.pdf>.
- de Looff, H., T. Welp, N. Snider et R. Wilink, 2021. « Chapter 7: Adaptive Management ». Dans *International Guidelines on Natural and Nature-Based Features for Flood Risk Management*, dir. publ. : T.S. Bridges, J.K. King, J.D. Simm, M.W. Beck, G. Collins, Q. Lodder et R.K. Mohan. U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS. En ligne : <hdl.handle.net/11681/41946>.
- de Schipper, M.A., S. de Vries, G. Ruessink, R.C de Zeeuw, J. Rutten, C. van Gelder-Maas et M.J.F. Stive, 2016. Initial spreading of a mega feeder nourishment : observations of the Sand Engine pilot project. *Coastal Engineering* 111: 23–38. En ligne : <[doi:10.1016/j.coastaleng.2015.10.011](https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2015.10.011)>.
- de Vries, J., D. Reed, S.K. McKay, T. Bouma, S.E. Cunniff, B. Grasmeyer, P. Mason, A. Nicholson, P. Quinn et J.M. Smith, 2021. Chapitre 4 : « Planning and implementing NNBF using a systems approach ». Dans : *Natural and Nature-Based Features Guidelines*, dir. publ. : T.S. Bridges, J.K. King, J.D. Simm, M.W. Beck, G. Collins, Q. Lodder et R.K. Mohan. U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS. Department of the Army, Washington DC. En ligne : <dx.doi.org/10.21079/11681/41946>.
- Dean, R, 2002. *Beach Nourishment Theory and Practice*. Hackensack, NJ: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. ISBN 9789810215484.
- Dean, R.G., et R.A. Dalrymple, 2010. *Coastal Processes with Engineering Applications*. Cambridge UK : Cambridge University Press. En ligne : <doi.org/10.1017/CBO9780511754500>.
- DHI, 2022a. *Co-benefits of nature-based solutions: a practical synthesis*. Commission de coopération environnementale.
- DHI, 2022b. *Nature-based solutions to address flooding in coastal cities: summary workshop*. Commission de coopération environnementale.
- DHI, 2022c. *Monitoring the efficacy of nature-based solutions: a practical synthesis*. Commission de coopération environnementale.
- Diez, J.J., M.D. Esteban, R. Paz, J.S. Lopez-Gutierrez, V. Negro et J.V. Monnot, 2011. « Urban Coastal Flooding and Climate Change ». *Journal of Coastal Research* 64:205–209. Szczecin, Pologne. ISSN 0749-0208. En ligne : <<https://www.jstor.org/stable/26482162>>.
- Doberstein, B., J. Fitzgibbons et C. Mitchell, 2019. Protect, accommodate, retreat or avoid (PARA): Canadian community options for flood disaster risk reduction and flood resilience.” *Natural Hazards* 98: 31–50. En ligne : <doi.org/10.1007/s11069-018-3529-z>.
- Doswald, N., S. Janzen, U. Nehren, K. Santamaria, M.J. Vervest, J. Sans, L. Edbauer, S. Chavda, S. Sandholz, F. Renaud, V. Ruiz, L. Narvaez, S. Yang, D. Mohil, D. Uzoski, N. Gerner et C. Grey, 2021. *Nature-Based Solutions for Disaster Risk Reduction*. Words into Action Guideline Series.

- Bureau des Nations Unies pour la réduction des risques de catastrophe (UNDRR). En ligne : www.preventionweb.net/files/74082_naturebasedsolutionsfordrr20210624c.pdf.
- Duarte, C.M., I.J. Losada, I.E. Hendriks, I. Mazarrasa et N. Marbà, 2013. « The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation ». *Nat. Clim. Change* 3 : 961–968. En ligne : doi.org/10.1038/nclimate1970.
- Earth Security, 2021. *The Blended Finance Playbook For Nature-Based Solutions*. En ligne : www.convergence.finance/resource/the-blended-finance-playbook-for-nature-based-solutions/view.
- Eger, A.M., C. Layton, T.A. McHugh, M. Gleason et N. Eddy, 2022. *Kelp Restoration Guidebook: Lessons Learned from Kelp Projects Around the World*. The Nature Conservancy, Arlington, VA, USA. En ligne : kelpforestalliance.com/TNC-KFA-Kelp-Guidebook-2022.pdf.
- Environment Agency, 2022. *Shoreline Management Plans*. Gouvernement du Royaume-Uni. En ligne : www.gov.uk/government/publications/shoreline-management-plans-smps/shoreline-management-plans-smps.
- Eyquem, J.L, 2021. *Rising Tides and Shifting Sands: Combining Natural and Grey Infrastructure to Protect Canada's Coastal Communities*. Intact Centre on Climate Adaptation, Université de Waterloo. En ligne : www.intactcentreclimateadaptation.ca/wp-content/uploads/2021/12/UoW_ICCA_2021_12_Coastal_Protection_Grey_NbS.pdf.
- Federal Highway Administration, 2018. *Nature-Based Solutions for Coastal Highway Resilience: An Implementation Guide*. En ligne : www.fhwa.dot.gov/environment/sustainability/resilience/ongoing_and_current_research/green_infrastructure/implementation_guide/fhwahep19042.pdf.
- FEMA, 2016. *Guidance for Flood Risk Analysis and Mapping — Coastal Water Levels*. Federal Emergency Management Agency, États-Unis. En ligne : www.fema.gov/sites/default/files/2020-02/Coastal_Water_Levels_Guidance_May_2016.pdf.
- FEMA, 2021. *The Southern Flow Corridor Flood Reduction and Habitat Restoration Project*. Federal Emergency Management Agency, États-Unis. En ligne : www.fema.gov/case-study/southern-flow-corridor-flood-reduction-and-habitat-restoration-project. Consulté le 20 octobre 2022.
- FEMA, 2022. *Building Resilient Infrastructure and Communities*. Federal Emergency Management Agency, États-Unis. En ligne : www.fema.gov/grants/mitigation/building-resilient-infrastructure-communities. Consulté le 18 janvier 2023.
- Florida Department of Environmental Protection, 2021. *Project GreenShores*. floridadep.gov/rcp/aquatic-preserve/content/project-greenshores. Consulté le 22 octobre 2022.
- Ford, J.D., N. Couture, T. Bell et D.G. Clark, 2018. « Climate change and Canada's north coast: research trends, progress, and future directions ». *Environmental Reviews*. 26:82–92. En ligne : doi.org/10.1139/er-2017-0027.
- Gailani, J., P. Whitfield, E. Murphy, J. de Vries, G. Thomson, W. Mears et D. Szimanski, 2021. « Chapter 11: Islands ». Dans *International Guidelines on Natural and Nature-Based Features for Flood Risk Management*, dir. publ. : T.S. Bridges, J.K. King, J.D. Simm, M.W. Beck, G. Collins, Q. Lodder et R.K. Mohan. U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS. En ligne : dx.doi.org/10.21079/11681/41946.
- Gedan, K.B., M.L. Kirwan, E. Wolanski, E.B. Barbier et B.R. Silliman, 2011. « The present and future role of coastal wetland vegetation in protecting shorelines: answering recent challenges to the paradigm ». *Climatic Change*. 106, 7–29. En ligne : [doi:10.1007/s10584-010-0003-7](https://doi.org/10.1007/s10584-010-0003-7).

- Ghanbari, M., M. Arabi, S. Kao, J. Obeysekera et W. Sweet, 2021. « Climate Change and Changes in Compound Coastal Riverine Flooding Hazard Along the U.S. Coasts ». *Earth's Future* 9. En ligne : <doi.org/10.1029/2021EF002055>.
- GIEC, 2007. *Impacts, adaptation and vulnerability*, Dans : *Climate Change 2007. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate*, M.L. Change et coll. (dir. publ.). Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, États-Unis. En ligne : <www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ar4_wg2_full_report.pdf>.
- GIEC, 2012. *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, C.B. Field et coll. (dir. publ.). Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, États-Unis, 582 p. En ligne : <www.ipcc.ch/report/managing-the-risks-of-extreme-events-and-disasters-to-advance-climate-change-adaptation/>.
- GIEC, 2022. *Climate Change 2022 : Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (dir. publ.). Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, États-Unis, 3056 p., doi:10.1017/9781009325844. En ligne : <<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>> .
- Gijsman, R., E.M. Horstman, D. van der Wal, D.A. Friess, A. Swales et K.M. Wijnberg, 2021. « Nature-Based Engineering : A Review on Reducing Coastal Flood Risk with Mangroves ». *Frontiers in Marine Science* 8 : 1–26. En ligne : <doi.org/10.3389/fmars.2021.702412>.
- Godoy, E., 2022. *Mexico's blue carbon pioneers progress despite lack of state support*. Earth Journalism Network. July 24, 2022. Sinanché, Mexique. <earthjournalism.net/stories/mexicos-blue-carbon-pioneers-progress-despite-lack-of-state-support>. Consulté le 28 septembre 2022.
- Gray, D.H., 1995. « Influence of Vegetation on the Stability of Slopes ». Dans *Vegetation and Slopes: Stabilisation, Protection, and Ecology*, Proceedings of the International Conference, Oxford, UK, 29–30 September 1994, dir. publ. : D.H. Barker et T. Telford. American Society of Civil Engineers. London, UK; New York, NY, USA. Pages. 2–25. ISBN 0727720317. En ligne : <doi.org/10.1680/vasspae.20313.0002>.
- Green-Gray Community of Practice, 2020. *Practical guide to implementing green-gray infrastructure*. En ligne : <www.conservation.org/projects/global-green-gray-community-of-practice>.
- Hall, J.W., R.J. Dawson, P.B. Sayers, C. Rosu, J. B. Chatterton et R. Deakin, 2003. « A methodology for national-scale flood risk assessment ». *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water and Maritime Engineering*. 156, 3 : 235–247. En ligne : <doi.org/10.1680/wame.2003.156.3.235>.
- Hanley, M.E., S.P.G. Hoggart, D.J. Simmonds, A. Bichot, M.A. Colangelo, F. Bozzeda, H. Heurtefeux, B. Ondiviela, R. Ostrowski, M. Recio, R. Trude, E. Zawadzka-Kahlau et R.C. Thompson, 2014. « Shifting sands? Coastal protection by sand banks, beaches and dunes ». *Coastal Engineering* 87 : 136–146. En ligne : <dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.10.020>.
- Institute for Sustainable Infrastructure, 2022. « Verify a project ». <<https://sustainableinfrastructure.org/project-verification/verify-a-project/>>. Consulté en ligne le 25 janvier 2023.
- Jones, R.N., A. Patwardhan, S.J. Cohen, S. Dessai, A. Lammel, R.J. Lempert, M.M.Q. Mirza et H. von Storch, 2014. « Foundations for decision making ». Dans : *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*, Field, C.B., 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. publ.). Groupe d'spécialistes intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, États-Unis, p. 195–228. En ligne : <www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-Chap2_FINAL.pdf>.
- Jordan, P., et P. Fröhle, 2022. « Bridging the gap between coastal engineering and nature conservation? A review of coastal ecosystems as nature-based solutions for coastal protection ». *Journal of Coastal Conservation* 26(4). En ligne : <doi.org/10.1007/s11852-021-00848-x>.
- Journey, J.M., S. Talwar, B. Brodaric et N.L. Hastings, 2015. « Disaster resilience by design: a framework for integrated assessment and risk-based planning in Canada ». *Commission géologique du Canada, Dossier public 7551*, 336. En ligne : <doi.org/10.4095/296800>.
- Judge, J., S. Newkirk, K. Leo, W. Heady, M. Hayden, S. Veloz, T. Cheng, B. Battalio, T. Ursell et M. Small, 2017. *Case Studies of Natural Shoreline Infrastructure in Coastal California: A Component of « Identification of Natural Infrastructure Options for Adapting to Sea-Level Rise » (California's Fourth Climate Change Assessment)*. The Nature Conservancy, Arlington, VA. En ligne : <scc.ca.gov/files/2017/11/tnc_Natural-Shoreline-Case-Study_hi.pdf>.
- Kalloe, S.A., 2019. *Wave damping potential of woody riparian vegetation: Comparing terrestrial laser scanning with manual measuring techniques*. Thèse de maîtrise. Université de technologie de Delft, référentiel TU Delft. En ligne : <repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:6e9c1f7a-4ef9-48ef-bb97-796a9b74fe6b/datastream/OBJ/download>.
- Kalloe, S.A., B. Hofland, J.A.A. Antolinez et B.K. van Wesenbeeck, 2022. « Quantifying frontal-surface area of woody vegetation: a crucial parameter for wave attenuation ». *Front. Mar. Sci*, 9. En ligne : <doi.org/10.3389/fmars.2022.820846>.
- Kim, J., E. Murphy, I. Nistor, S. Ferguson et M. Provan, 2021. « Numerical analysis of storm surges on Canada's western Arctic coastline ». *Journal of Marine Science and Engineering* 9(3): 326. En ligne : <doi.org/10.3390/jmse9030326>.
- Kirwan, M.L., et J.P. Megonigal, 2013. « Tidal wetland stability in the face of human impacts and sea-level rise ». *Nature* 504 : 53–60. En ligne : <doi.org/10.1038/nature12856>.
- Levy, N., O. Berman, M. Yuval, Y. Loya, T. Treibitz, E. Tarazi et O. Levy, 2022. « Emerging 3D technologies for future reformation of coral reefs: Enhancing biodiversity using biomimetic structures based on designs by nature ». *Science of the Total Environment* 830 : 154749. En ligne : <doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154749>.
- Lodder, Q., C. Jeuken, R. Reinen-Hamill, O. Burns, R. Ramsdell III, J. de Vries, B. McFall, S. IJff, C. Maglio et R. Wilink, 2021. Chapitre 9, « Beaches and Dunes ». Dans : *Natural and Nature-Based Features Guidelines*, dir. publ. : T.S. Bridges, J.K. King, J.D. Simm, M.W. Beck, G. Collins, Q. Lodder et R.K. Mohan. U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS. En ligne : <dx.doi.org/10.21079/11681/41946>.
- Löfqvist, S., F. Kleinschroth, A. Bey, A. de Bremond, R. DeFries, J. Dong, F. Fleischman, S. Lele, D. Martin, P. Messerli, P. Meyfroidt, M. Pfeifer, S. Rakotonarivo, N. Ramankutty, V. Ramprasad, P. Rana, J. Rhemtulla, C. Ryan, I. Vieira, G. Wells et R. Garrett, 2022. « How social considerations improve the equity and effectiveness of ecosystem restoration ». *BioScience*, biac099. En ligne : <doi.org/10.1093/biosci/biac099>.
- Lokman, K., 2022. *How do you integrate co-benefits into a NBS value proposition? Living with water – case studies*. Présenté lors de l'atelier sur les avantages connexes des solutions fondées sur la nature,

dans le cadre de la Série d'ateliers de la Commission de coopération environnementale sur les solutions fondées sur la nature pour gérer les risques d'inondation côtière. En ligne :

<www.cec.org/events/nature-based-solutions-for-coastal-flooding-workshop-series-nature-based-solutions-NBS-co-benefits-workshop/>.

- Lowe, R.J., E. McLeod, B.G. Reguero, S. Altman, J. Harris, B. Hancock, R. ter Hofstede, E. Rendle, E. Shaver et J. M. Smith. 2021. Chapitre 12 : « Reefs ». Dans : *Natural and Nature-Based Features Guidelines*, dir. publ. : T.S. Bridges, J.K. King, J.D. Simm, M.W. Beck, G. Collins, Q. Lodder et R.K. Mohan. U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS. En ligne : <[dx.doi.org/10.21079/11681/41946](https://doi.org/10.21079/11681/41946)>.
- Martell, R., E. Mendoza, I. Mariño-Tapia, I. Odériz et R. Silva, 2020. « How Effective Were the Beach Nourishments at Cancun? » *Journal of Marine Science and Engineering* 8(6): 388. En ligne : <doi.org/10.3390/jmse8060388>.
- Maun, A., et D. Fahselt, 2009. Chapitre 13, « Dune systems in relation to rising seas ». Dans : *The Biology of Coastal Sand Dunes*. Oxford. En ligne : <doi.org/10.1093/oso/9780198570356.003.0018>.
- Mayakoba, 2020. *Mayakoba Sustentable*. En ligne : <viewer.joomag.com/mayakoba-sustentable-2020-revista2020/0429507001564016107?short>.
- MD County. 2010. *Miami-Dade County Beach Erosion Control Master Plan*. En ligne : <<https://www.miamidade.gov/environment/library/reports/beach-renourishment-doc.pdf>>.
- Menéndez, P., I.J. Losada, S. Torres-Ortega, S. Narayan et M.W. Beck, 2020. « The global flood protection benefits of mangroves ». *Nature Scientific Reports*, 10(1) : 1–11.
- MNAI, 2023. « Innovative, new, nature-based insurance product to help protect natural assets ». Municipal Natural Assets Initiative/Initiative des actifs naturels, <<https://mnai.ca/insurance-protect-natural-assets/>>. Consulté en ligne le 6 septembre 2023.
- Molnar, M., P. Olmstead, M. Mitchell, C. Raudsepp-Hearne et M. Anielski, 2021. Chapitre 5, « Services écosystémiques ». Dans : *Le Canada dans un climat en changement : Rapport sur les enjeux nationaux*. Gouvernement du Canada, Ottawa, Ontario. En ligne : <<https://changingclimate.ca/national-issues/fr/chapter/5-0/>>.
- Montgomery, J.M., K.R. Bryan, J.C. Mullarney et E.M. Horstman, 2019. « Attenuation of Storm Surges by Coastal Mangroves ». *Geophysical Research Letters* 46(5) : 2680–2689. En ligne : <doi.org/10.1029/2018GL081636>.
- Morris, R.L, T.M. Konlechner, M. Ghisalberti et S.E. Swearer, 2018. « From grey to green: Efficacy of eco-engineering solutions for nature-based coastal defence ». *Global Change Biology* 24(5) : 1827–1842. En ligne : <doi.org/10.1111/gcb.14063>.
- Murphy, Enda, T. Lyle, J. Wiebe, S. Hund, M. Davies et D. Williamson, 2020. *Coastal flood risk assessment guidelines for building and infrastructure design: supporting flood resilience on Canada's coasts*. Conseil national de recherches du Canada, Recherche en génie océanique, côtier et fluvial. En ligne : <publications.gc.ca/collections/collection_2021/cnrc-nrc/NR16-333-2020-eng.pdf>.
- Narayan, S., M.W. Beck, B.G. Reguero, I.J. Losadavan, B. Wesenbeeck, N. Pontee, J.N. Sanchirico, J.C. Ingram, G.M. Lange et K.A. Burks-Copes, 2016. « The effectiveness, costs and coastal protection benefits of natural and nature-based defences ». *PLoS ONE* 11(5). En ligne : <doi.org/10.1371/journal.pone.0154735>.
- Narayan, S., S. Hanson, R.J. Nicholls, D. Clarke, P. Willems, V. Ntegeka et J. Monbaliu, 2012. « A holistic model for coastal flooding using system diagrams and the Source-Pathway-Receptor (SPR)

- concept ». *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 12: 1431–1439. En ligne : <[doi:10.5194/nhess-12-1431-2012](https://doi.org/10.5194/nhess-12-1431-2012)>.
- Nations Unies, 2015. *Cadre de Sendai pour la réduction des risques de catastrophe 2015-2030*. Organisation des Nations Unies. En ligne : <https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030>>.
- Naturally Resilient Communities, 2022a. *Case study: South Cape May Meadows, Cape May Point, New Jersey*. <nrcsolutions.org/wp-content/uploads/2017/09/NRC_CaseStudies_CapeMayPoint_NJ.pdf>. Consulté le 28 juillet 2022.
- Naturally Resilient Communities, 2022b. *Case study: Pensacola, Florida*. <nrcsolutions.org/wp-content/uploads/2017/06/NRC_CaseStudies_Pensacola_FL.pdf>. Consulté le 20 octobre 2022.
- NOAA, 2022a. *Bipartisan Infrastructure Law*. National Oceanic and Atmospheric Administration. <www.noaa.gov/infrastructure-law>. Consulté le 19 janvier 2023.
- NOAA, 2022b. *National Coastal Resilience Fund*. National Oceanic and Atmospheric Administration. <<https://coast.noaa.gov/funding/bil/ncrf/overview.html/>>. Consulté le 25 janvier 2023.
- Nouvelle-Écosse, 2021. *Proposed Coastal Protection Act Regulations*. En ligne : <<https://novascotia.ca/coast/docs/part-2-detailed-guide-to-proposed-Coastal-Protection-Act-Regulations.pdf>>.
- O’Shaughnessy, K.A, S.J. Hawkins, A.J. Evans, M.E. Hanley, P. Lunt, R.C. Thompson, R.A. Francis et coll., 2019. « Design Catalogue for Eco-Engineering of Coastal Artificial Structures: A Multifunctional Approach for Stakeholders and End-Users ». *Urban Ecosystems* 23 : 431–443. En ligne : <doi.org/10.1007/s11252-019-00924-z>.
- OCDE, 2021. *Scaling Up Nature-based Solutions to Tackle Water-Related Climate Risks. Insights from Mexico and the United Kingdom*. Organisation de coopération et de développement économiques. Publications OCDE, Paris. En ligne : <doi.org/10.1787/736638c8-en>.
- Odell, R.E., B.R. Hall et P.C. Brooks, 2008. « Conceptual design and modeling of restored coastal wetlands ». *Intl. J. River Basin Management* 6(3): 283–295. En ligne : <www.doi.org/10.1080/15715124.2008.9635356>.
- Osborne, P., 2022. *Knowledge barriers & data gaps hindering NBS retrofitting*. Présentation lors de l’atelier sur la rénovation des infrastructures à l’aide de solutions fondées sur la nature, dans le cadre de la série d’ateliers de la Commission de coopération environnementale sur les solutions fondées sur la nature pour gérer les risques d’inondation côtière. En ligne : <www.cec.org/wp-content/uploads/2B_PhilOsborne_en.pdf>.
- Pathak, A., P. Glick, L.J. Hansen, L.E. Hilberg, J. Ritter et B.A. Stein, 2022. *Incorporating Nature-based Solutions Into Community Climate Adaptation Planning*. Washington, DC : National Wildlife Federation et EcoAdapt. En ligne : <www.nwf.org/-/media/Documents/PDFs/NWF-Reports/2022-NWF-EcoAdapt_Nature-based_Solutions>.
- Peterson C.H., et M.J. Bishop, 2005. « Assessing the Environmental Impacts of Beach Nourishment ». *BioScience* 55:(10) 887–896. En ligne : <[doi.org/10.1641/0006-3568\(2005\)055\[0887:ATEIOB\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2005)055[0887:ATEIOB]2.0.CO;2)>.
- Piercy, C.D, N. Pontee, S. Narayan, J. Davis et T. Meckley, 2021. Chapitre 10 : « Coastal Wetlands and Tidal Flats ». . Department of the Army, Washington DC. En ligne : <dx.doi.org/10.21079/11681/41946>.
- PNUD BIOFIN, 2021. « Mexico ». Programme des Nations Unies pour le développement, Initiative de financement de la biodiversité. <<https://www.biofin.org/fr/node/177>>. Consulté le 10 janvier 2023.

- PNUE, 2021. *State of finance for nature: tripling investments in nature-based solutions by 2030*. Programme des Nations Unies pour l'environnement, Nairobi. En ligne : [<wedocs.unep.org/xmlui/bitstream/handle/20.500.11822/36145/SFN.pdf >](http://wedocs.unep.org/xmlui/bitstream/handle/20.500.11822/36145/SFN.pdf).
- Point Blue Conservation Science, San Francisco Estuary Institute et County of Marin, 2019. *Sea-level Rise Adaptation Framework—A user guide to planning with nature as demonstrated in Marin County*. Point Blue Conservation Science (Contribution #2239), Petaluma, CA. San Francisco Estuary Institute (Publication #946), Richmond, CA. En ligne : [<https://www.sfei.org/sites/default/files/toolbox/Adaptation%20Framework%20for%20Marin%2090619%20low%20res.pdf >](https://www.sfei.org/sites/default/files/toolbox/Adaptation%20Framework%20for%20Marin%2090619%20low%20res.pdf).
- PQB News, 2022. *Artificial Spit Near New Qualicum Beach Roundabout Holds up Well as Waves Bash Waterfront*. Parkville Qualicum Beach News. [<https://www.pqbnews.com/news/artificial-spit-near-new-qualicum-beach-roundabout-holds-up-well-as-waves-bash-waterfront-1198882 >](https://www.pqbnews.com/news/artificial-spit-near-new-qualicum-beach-roundabout-holds-up-well-as-waves-bash-waterfront-1198882). Consulté le 12 janvier 2023.
- Qualicum Beach, 2022. *Beach Creek Estuary & Marine Spit*. [<https://qualicumbeach.com/beach-creek-estuary-and-marine-spit >](https://qualicumbeach.com/beach-creek-estuary-and-marine-spit). Consulté le 1^{er} décembre 2022.
- Quantified Ventures, 2022. *Environmental Impact Bonds*. [<www.quantifiedventures.com/what-is-an-environmental-impact-bond >](http://www.quantifiedventures.com/what-is-an-environmental-impact-bond). Consulté le 19 janvier 2023.
- Rabalais, N.N., R.E. Turner, R.J. Diaz et D. Justic, 2009. « Global change and eutrophication of coastal waters ». *ICES J. Marine Science* 66(7) 1528–1537. En ligne : [<doi.org/10.1093/icesjms/fsp047 >](https://doi.org/10.1093/icesjms/fsp047).
- Rahman, H.M.T., K. Sherren et D. van Proosdij, 2019. « Institutional innovation for nature-based coastal adaptation: Lessons from Salt Marsh restoration in Nova Scotia, Canada ». *Sustainability* 11 (23): 6735. En ligne : [<doi.org/10.3390/su11236735 >](https://doi.org/10.3390/su11236735).
- Raška, P., N. Bezak, C.S.S. Ferreira, Z. Kalantari, K. Banasik, M. Bertola, M. Bourke, A. Cerda, P. Davids, M. Madruga de Brito, R. Evans, D.C. Finger, R. Halbac-Cotoara-Zamfir, M. Housh, A. Hysa, J. Jakubinsky, M.K. Solomun, M. Kaufmann, S. Keesstra, E. Keles, S. Kohnova, M. Pezzagno, K. Potocki, S. Rufat, S. Seifollahi-Aghmiuni, A. Schindelegger, M. Sraj, G. Stankunavicius, J. Stolte, R. Stricevic, J. Szolgay, V. Zupanc, L. Slavikova et T. Hartmann, 2022. « Identifying barriers for nature-based solutions in flood-risk management: An interdisciplinary overview using spécialiste community approach ». *J Environ Management* 310 : 114725. En ligne : [<doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114725 >](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114725).
- Reed, Graeme, N. Brunet, D. McGregor, C. Scurr, T. Sadik, J. Lavigne et S. Longboat, 2022. « Toward Indigenous Visions of Nature-Based Solutions: An Exploration into Canadian Federal Climate Policy ». *Climate Policy*. vol. 22, n° 4, 514–533. En ligne : [<doi.org/10.1080/14693062.2022.2047585 >](https://doi.org/10.1080/14693062.2022.2047585).
- Reguero, B.G., F. Secaira, A. Toimil, M. Escudero, P. Díaz-Simal, M.W. Beck, R. Silva, C. Storlazzi et I.J. Losada, 2019. « The Risk Reduction Benefits of the Mesoamerican Reef in Mexico ». *Frontiers in Earth Science* 7. En ligne : [<doi.org/10.3389/feart.2019.00125 >](https://doi.org/10.3389/feart.2019.00125).
- RNCan, 2015. « Overview of Climate Change in Canada ». Gouvernement du Canada. Ressources naturelles Canada. [<www.nrcan.gc.ca/changements-climatiques/impacts-adaptation/overview-climate-change-canada/10321 >](http://www.nrcan.gc.ca/changements-climatiques/impacts-adaptation/overview-climate-change-canada/10321).
- Saunders-Hastings, P., M. Barnard et B. Doberstein, 2020. *Approches en matière de retrait planifié pour soutenir la résilience aux changements climatiques au Canada*. Ressources naturelles Canada, Ottawa, Canada. En ligne : [<https://ostrnrcan-dostrnrcan.canada.ca/entities/publication/07449104-951b-4570-80c6-a7cfb358a50 >](https://ostrnrcan-dostrnrcan.canada.ca/entities/publication/07449104-951b-4570-80c6-a7cfb358a50).

- Sayers, P., Y. Li, G. Galloway, E. Penning-Rowsell, F. Shen, K. Wen, Y. Chen et T. Le Quesne, *Flood Risk Management : A Strategic Approach*. UNESCO, Paris. En ligne : <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000220870>.
- Scheres, B., et H. Schüttrumpf, 2019. « Enhancing the ecological value of sea dikes ». *Water*, 11(8) : 1617. En ligne : doi.org/10.3390/w11081617.
- Semarnat-INECC, 2016. *Mexico's Climate Change Mid-Century Strategy*. Semarnat (ministère de l'Environnement et des Ressources naturelles) et INECC (Institut national de l'écologie et du changement climatique), Mexico, Mexique. unfccc.int/files/focus/long-term_strategies/application/pdf/mexico_mcs_final_cop22nov16_red.pdf.
- Shaw, G.R., et S.J. Dundas, 2021. *Socio-economic impacts of the Southern Flow Corridor Restoration Project : Tillamook Bay, Oregon*. Tillamook Estuaries Partnership, Garibaldi, OR. En ligne : ossfc.files.wordpress.com/2021/12/shawdundas_memooct2021_v3.pdf.
- Shepard, C.C., C.M. Crain et M.W. Beck, 2011. « The protective role of coastal marshes: A systematic review and meta-analysis ». *PLoS ONE* 6 (11) : 1–11. En ligne : doi.org/10.1371/journal.pone.0027374.
- Šile, U., D. Caković, F. Kuzmič et D. Stešević, 2017. « Trampling Impact on Vegetation of Embryonic and Stabilised Sand Dunes in Montenegro ». *Journal of Coastal Conservation* 21(1): 15–21. En ligne : www.jstor.org/stable/45046617.
- Silva Zuniga, M.C., G. Watson, G.G. Watkins, A. Rycerz et J. Firth, 2020. *Increasing Infrastructure Resilience with Nature-Based Solutions (NBS): A 12-Step Technical Guidance Document for Project Developers*. Banque interaméricaine de développement (BID), Washington. En ligne : dx.doi.org/10.18235/0002325.
- Simm, J.D., 2021. Chapitre 8 : « Introduction to NNBF in coastal systems ». Dans : *Natural and Nature-Based Features Guidelines*, dir. publ. : T.S. Bridges, J.K. King, J.D. Simm, M.W. Beck, G. Collins, Q. Lodder et R.K. Mohan. U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS. En ligne : dx.doi.org/10.21079/11681/41946.
- SNC-Lavalin Inc., 2018. *Design Basis for the Living Dike Concept*. Rapport rédigé pour l'association West Coast Environment Law. Document n° : 644868-1000-41EB-0001, Rev 1. En ligne : www.wcel.org/publication/design-basis-living-dike-concept.
- Spalding, M.D., et B.E. Brown, 2015. « Warm-water coral reefs and climate change ». *Science*, 350 (6262). En ligne : doi.org/10.1126/science.aad0349.
- Stewardship Centre for British Columbia, 2022a. *The Green Shores Guide to Expedited Process for Nature-based Shoreline Projects in BC*. En ligne : www2.gov.bc.ca/assets/gov/farming-natural-resources-and-industry/natural-resource-use/land-water-use/crown-land/crown-land-uses/greenshores_guide_to_foreshore.pdf.
- Stewardship Centre for British Columbia, 2022b. *Green Shores*. <https://stewardshipcentrebc.ca/green-shores-home/> Consulté en ligne le 25 janvier 2023.
- Strain, E.M.A., C. Olabarria, M. Mayer-Pinto, V. Cumbo, R.L. Morris, A.B. Bugnot, K.A. Dafforn et coll., 2018. « Eco-engineering urban infrastructure for marine and coastal biodiversity: which interventions have the greatest ecological benefit? » *Journal of Applied Ecology* 55 : 426–441. En ligne : doi.org/10.1111/1365-2664.12961.
- Suedel, B.C., L.A. Naylor, T. Meckley, C. Cairns, J. Bernier, E. Morgereth, W. Mears, C.D. Piercy et R. ter Hofstede, 2021. Chapitre 14 : « Enhancing structural measures for environmental, social, and engineering benefits ». Dans : *Natural and Nature-Based Features Guidelines*, dir. publ. : T.S. Bridges, J.K. King, J.D. Simm, M.W. Beck, G. Collins, Q. Lodder et R.K. Mohan. U.S. Army

- Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS. En ligne :
<[dx.doi.org/10.21079/11681/41946](https://doi.org/10.21079/11681/41946)>.
- Sutton-Grier, A.E., K. Wovk et H. Bamford, 2015. « Future of our coasts: The potential for natural and hybrid infrastructure to enhance the resilience of our coastal communities, economies and ecosystems ». *Environmental Science and Policy* 51 : 137–148. En ligne :
<doi.org/10.1016/j.envsci.2015.04.006>.
- Teutli-Hernández, C., J.A. Herrera-Silveira, D.J. Cisneros-de la Cruz, R. Román-Cuesta, 2020. *Mangrove Ecological Restoration Guide: Lessons Learned. Mainstreaming Wetlands into the Climate Agenda: A Multilevel Approach (SWAMP)*. CIFOR, CINVESTAV-IPN, UNAM-Sisal, PMC. En ligne : www.cifor.org/publications/pdf_files/Books/2020-Guide-SWAMP.pdf.
- The Nature Conservancy, 2022. *South Cape May Meadows is a globally renowned birders paradise*. <www.nature.org/en-us/get-involved/how-to-help/places-we-protect/south-cape-may-meadows/#link03>. Consulté le 19 octobre 2022.
- The White House, 2022. *Fact sheet: Biden-Harris Administration announces roadmap for nature-based solutions to fight climate change, strengthen communities, and support local economies*. En ligne : <<https://thewaterinstitute.org/media/in-the-news/fact-sheet-biden-harris-administration-announces-roadmap-for-nature-based-solutions-to-fight-climate-change-strengthen-communities-and-support-local-economies>>. Consulté le 4 janvier 2023.
- Tillamook Estuaries Partnership, 2021. *Southern Flow Corridor Project Supports Millions of Dollars in Community and Economic Benefits*. <www.tbnep.org/southern-flow-corridor-project-supports-millions-of-dollars-in-community-and-economic-benefits.php>. Consulté le 20 octobre 2022.
- UICN, 2020. *Standard mondial de l'UICN pour les solutions fondées sur la nature — Cadre accessible pour la vérification, la conception et la mise à l'échelle des SfN*. Première édition. Union internationale pour la conservation de la nature, Gland, Suisse. En ligne : <<https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2020-020-Fr.pdf>>.
- USACE, 2002. *Coastal Engineering Manual (CEM)*. EM 1110-2-1100. Washington, DC. En ligne : <www.publications.usace.army.mil/USACE-Publications/Engineer-Manuals/>.
- USACE, 2019a. *Guidelines for Landscape Planting and Vegetation Management at Levees, Floodwalls, Embankment Dams, and Appurtenant Structures*. U.S. Army Corps of Engineers. Technical Letter No. ETL 1120-2-583. Department of the Army, Washington DC. En ligne : <www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Users/182/86/2486/EP_1110-2-18.pdf?ver=bVt-L-DvQrASeFS6szPNaw%3D%3D>.
- USACE, 2019b. *Risk Assessment for Flood Risk Management Studies*. U.S. Army Corps of Engineers. ER 1105-2-101. Department of the Army, Washington DC. En ligne : <www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Users/182/86/2486/ER%201105-2-101_Clean.pdf>.
- USACE, 2021. *Capital Stock : Infrastructure Age*. U.S Army Corps of Engineers. En ligne : <<https://www.iwr.usace.army.mil/Missions/Value-to-the-Nation/Fast-Facts/Capital-Stock/Infrastructure-Age/>>. Consulté le 24 janvier 2023.
- van Alphen, J., L. Bourget, C. Elliott, K.I. Fujita, D. Riedstra, D. Rooke et K. Tachi, 2011. *Flood Management Approaches. As Being Practiced in Japan, Netherlands, United Kingdom and United States*. Institute for Water Resources Report No: 2011-R-08. U.S. Army Corps of Engineers, Alexandria. En ligne : <<http://resolver.tudelft.nl/uuid:c9995920-75a7-4e1a-ae6e-0f09d473e34e>>
- van Loon-Steensma, J.M, 2015. « Salt marshes to adapt the flood defences along the Dutch Wadden Sea coast ». *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 20(6): 929–948. En ligne : <doi.org/10.1007/s11027-015-9640-5>.

- van Loon-Steensma, J.M., et P. Vellinga, 2013. « Trade-offs between biodiversity and flood protection services of coastal salt marshes » ». *Current opinion in Environmental Sustainability* 5 : 320–326. En ligne : < doi.org/10.1016/j.cosust.2013.07.007>.
- van Loon-Steensma, J.M., H.A. Schelfhout et P. Vellinga, 2014. « Green adaptation by innovative dike concepts along the Dutch Wadden Sea coast ». *Environmental Science & Policy* 44 : 108–125. En ligne : <doi.org/10.1016/j.envsci.2014.06.009>.
- Vouk, I., B. Pilechi, M. Provan et E. Murphy, 2021. *Nature-based Solutions for Coastal and Riverine Flood and Erosion Risk Management*. Association canadienne de normalisation. En ligne : <www.csagroup.org/wp-content/uploads/CSA-Group-Research-Nature-Based-Solutions-for-Coastal-and-Riverine-Flood-and-Erosion-Risk-Management.pdf>.
- West Coast Environmental Law, 2022, juin. « Frequently asked questions: provincial jurisdiction of British Columbia over coastal and ocean matters » . <www.wcel.org/sites/default/files/publications/2020-06-faq-provincialjurisdiction-coastal-updated.pdf>. Consulté le 21 septembre 2022.
- Wilmink, R.J.A., Q.J. Lodder et P. Sørensen, 2017. « Assessment of the design and behavior of nourishments in the North Sea region. Towards an NSR guideline for nourishments ». *Coastal Dynamics* 4 : 801–809. <vb.northsearegion.eu/public/files/repository/20171117131215_CoastalDynamics2017paper43Wilminketal.pdf>.
- Wilson, J., et G. Lamont, 2021. *Concept designs for neighbourhood-scale coastal adaptation measures in Royston and Qualicum Beach, B.C.* Stewardship Centre for B.C. Northwest Hydraulic Consultants. Nanaimo. En ligne : <www.stewardshipcentrebc.ca/PDF_docs/greenshores/Resources/NHCCConceptDesigns21.pdf>
- Wilson, J., I. Nistor, M. Mohammadian, A. Cornett, P. Falkenrich et G. Lamont, 2020. « Nature-based coastal protection using large woody debris ». *Coastal Engineering* 36. En ligne : <<https://doi.org/10.9753/icce.v36v.management.8>>.