COMMISSION
DE COOPÉRATION
ENVIRONNEMENTALE

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

Suivi de l'efficacité : méthodes et indicateurs proposés

Série de documents d'orientation :

Avantages connexes

Suivi de l'efficacité

Adaptation des infrastructures existantes

Citer comme suit :

> CCE (2025), *Suivi de l'efficacité : Méthodes et indicateurs proposés – Solutions fondées sur la nature pour réduire les risques d'inondation côtière*, Montréal, Canada, Commission de coopération environnementale, xiii + 84 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 de la CCE ou 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 : 978-2-89700-367-8

Available in English – ISBN : 978-2-89700-366-1

Disponible en español – ISBN : 978-2-89700-368-5

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

QA387

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

Liste des abréviations et acronymes ..... **v**

Résumé ..... **vi**

Sommaire ..... **vi**

Préface ..... **xi**

Remerciements ..... **xii**

1 Introduction à la méthode proposée **1**
1.1 Objectifs et portée 2
1.2 Principes directeurs 3
1.3 Principales définitions 4
1.4 Lectures complémentaires 4

2 Méthode de suivi proposée **6**
2.1 Processus de suivi 6
2.2 Pensée systémique dans le suivi 7
2.3 Méthode générale 8
2.3.1 Méthode BACI *8*
2.3.2 Approche des conditions de référence *10*
2.3.3 Autres méthodes *12*
2.3.4 Considérations méthodologiques générales *13*

3 Indicateurs de performance et techniques de suivi **14**
3.1 Aperçu des catégories de performance 16
3.2 Indicateurs et techniques de gestion des risques d'inondation 22
3.2.1 Mesures de performance de base *22*
3.2.2 Mesures de performance complémentaires *26*
3.3 Indicateurs et techniques sur le plan environnemental 28
3.3.1 Mesures de performance de base *28*
3.3.2 Mesures de performance complémentaires *35*
3.4 Indicateurs et techniques sur le plan social 39
3.4.1 Mesures de performance de base *39*
3.4.2 Mesures de performance complémentaires *43*
3.5 Indicateurs et techniques sur le plan économique 44
3.5.1 Mesures de performance de base *45*
3.5.2 Mesures de performance complémentaires *46*

4 Considérations particulières pour les écosystèmes et le type de SFN **50**

4.1 Plages et dunes 50
4.2 Zones humides et estrans.....53
4.3 Îles… 58
4.4 Forêts côtières et zones boisées 62
4.5 Éléments submergés 63
4.6 Éléments hybrides.....66
4.7 Discussion complémentaire sur les techniques.....68

5 Considérations relatives à l'analyse des données, à l'accès à celles-ci et à leur diffusion 70

6 Possibilités et orientations futures 72

7 Conclusions.....74

Bibliographie 76

Liste des tableaux

Tableau 1 – Exemple d'objectifs fondamentaux décomposés en mesures de performance qui sont directement liées à des indicateurs de performance sélectionnés dans le plan de suivi 15
Tableau 2 – Mesures de performance classées par catégorie de performance et objectifs de projet pour différents types de SFN 18
Tableau 3 – Mesures de performance GRI de base avec indicateurs de performance correspondants et techniques de suivi proposées 23
Tableau 4 – Mesures de performance complémentaires de la GRI avec indicateurs de performance correspondants et techniques de suivi proposées 27
Tableau 5 – Mesures de performance de base sur le plan environnemental avec indicateurs de performance correspondants et techniques de suivi proposées 31
Tableau 6 – Liste des méthodes avec indicateurs de performance 34
Tableau 7 – Mesures de performance complémentaires sur le plan environnemental avec indicateurs de performance correspondants et techniques de suivi proposées 36
Tableau 8 – Mesures de performance de base sur le plan social avec indicateurs de performance correspondants et techniques de suivi proposées 41
Tableau 9 – Mesures de performance complémentaires sur le plan social avec indicateurs de performance correspondants et techniques de suivi proposées 44
Tableau 10 – Mesures de performance de base sur le plan économique avec indicateurs de performance correspondants et techniques de suivi proposées 46
Tableau 11 – Mesures de performance complémentaires sur le plan économique avec indicateurs de performance correspondants et techniques de suivi proposées 47
Tableau 12 – Considérations et conséquences possibles de la sélection de techniques dans le cadre d'un programme de suivi des marais côtiers 69

Liste des figures

Figure 1 – Cadre de suivi.....6
Figure 2 – Vue aérienne oblique du site de réalignement de la digue gérée de Converse sur l'isthme de Chignectou 11
Figure 3 – Exemples d'analyses spatiales et statistiques pour les plans de suivi BACI, BA, CI et ACR. 12
Figure 4 – État sans végétation après l'aménagement (première année, à gauche) et état avec végétation (quatrième année, à droite).....34
Figure 5 – Comptes écosystémiques et relations entre eux 49
Figure 6 – Système de plages et de dunes avant (2006) et après (2011) la restauration....52
Figure 7 – Nouvelle promenade sur les dunes pour accéder à la plage 52
Figure 8 – Installation d'un nouveau ponceau en 2005 57
Figure 9 – Marais de Cheverie 15 ans après la restauration 57
Figure 10 – Plan du site de Poplar Island 61
Figure 11 – Site Bronx Kill : composantes du rivage et emplacements des points de suivi63
Figure 12 – Couverture d'herbiers marins dans les quatre baies en 2001, 2006, 2010 et 2018 65
Figure 13 – Croquis et photo de la structure de biomimétisme des dunes.....67

Liste des abréviations et acronymes

ACR	approche des conditions de référence
ADCP	profileur de courant à effet Doppler
BACI	avant-après–contrôle-impact (de l'anglais BACI, *before-after control-impact*)
CBWES	*CB Wetlands and Environmental Specialists* (spécialistes des zones humides et de l'environnement de CB)
CCE	Commission de coopération environnementale
CDT	sonde CDT (conductivité, température, profondeur)
CH_4	méthane
CO_2	dioxyde de carbone
DHI	DHI Water and Environment Inc.
FAIR	données trouvables, accessibles, interopérables et réutilisables
GPS RTK	système mondial de positionnement cinématique en temps réel
GRI	gestion des risques d'inondation
LHM	laisse de haute mer
MNE	modèle numérique d'élévation
NO_2	oxyde de diazote
O_2	oxygène
ONG	organisation non gouvernementale
pH	potentiel d'hydrogène
RCBA	Réseau canadien de biosurveillance aquatique
SFN	solutions fondées sur la nature
SIG	systèmes d'information géographique
SL	sonar à balayage latéral
SMART	spécifique, mesurable, atteignable, réaliste, temporellement défini
UICN	Union internationale pour la conservation de la nature
UNAM	Université nationale autonome du Mexique
YSI	*Yellow Springs Instruments* (Instruments Yellow Springs)

Résumé

La gestion des risques d'inondation (GRI) est une préoccupation majeure dans les zones urbaines et périurbaines côtières, en particulier dans le contexte de l'élévation du niveau de la mer provoquée par les changements climatiques. Les solutions fondées sur la nature (SFN) peuvent satisfaire de nombreux objectifs de gestion des risques d'inondation, tout en offrant des avantages connexes sur le plan social, économique et environnemental. Toutefois, l'incertitude quant à leur efficacité limite leur adoption et leur mise en œuvre. Le suivi des SFN, pour montrer les succès et les enseignements tirés, est l'un des outils dont disposent les personnes qui prennent les décisions pour gérer et lever les incertitudes relatives aux SFN.

Le présent document soutient l'adoption des SFN dans les collectivités côtières du Canada, du Mexique et des États-Unis en fournissant aux personnes qui prennent les décisions des renseignements pratiques et des conseils sur le suivi de ces solutions. Il comprend des pratiques exemplaires en matière de conception des programmes de suivi ainsi que des considérations pour faciliter la sélection des mesures, des indicateurs de performance et des méthodes de suivi. Il fournit également des conseils relatifs à certains types de SFN et écosystèmes, ainsi que des études de cas illustrant la mise en œuvre de programmes de suivi au Canada, au Mexique et aux États-Unis. Enfin, des possibilités de travaux futurs y sont aussi indiquées.

Sommaire

Le suivi est une composante essentielle de tous les projets de gestion des risques d'inondation (GRI), notamment les projets comprenant des solutions fondées sur la nature (SFN). Le présent rapport passe en revue les méthodes et techniques précises utilisées pour élaborer des programmes de suivi de projets SFN dans les zones côtières. Le suivi est essentiel pour déterminer si un projet atteint ou non ses objectifs de performance et pour éclairer la gestion adaptative. Les recommandations présentées ici se fondent sur une revue exhaustive de la littérature internationale et sur les résultats d'ateliers de spécialistes organisés dans le cadre de ce projet.

Étapes du suivi
En général, le suivi doit être considéré comme un processus continu qui commence avant la mise en œuvre des projets SFN et qui évalue leur performance par rapport aux résultats escomptés ou aux critères de performance indiqués. Les principales étapes des programmes de suivi sont généralement les suivantes.

- Cadrage : déterminer l'ampleur et la portée du plan de gestion adaptative, prioriser les mesures à prendre, définir les titulaires de droits et les parties prenantes, et élaborer des stratégies de financement. C'est au cours de cette étape que doit commencer un engagement précoce et significatif.
- Planification : déterminer les paramètres de préoccupation, établir des mesures de performance, faire l'inventaire des réseaux de suivi existants, cerner les lacunes dans les données, et déterminer les ressources et le personnel potentiels pour exécuter le programme de suivi.
- Conception : élaborer un programme de suivi (y compris un suivi des conditions de base) avant la mise en œuvre du projet, déterminer la fréquence de suivi qui convient à chaque mesure de performance ainsi que la méthode appropriée, établir des protocoles de collecte et de gestion des données.
- Mise en œuvre : exécuter des programmes de suivi, en les adaptant aux conditions sur le terrain, le cas échéant.

- Production de rapports : examiner, analyser et présenter les données, communiquer les constatations à l'équipe de projet (et à l'entrepreneur durant les étapes d'aménagement et d'exploitation), et informer les autres parties prenantes.
- Évaluation : à l'aide des résultats du suivi, évaluer la performance des SFN, proposer des modifications à apporter aux SFN (gestion adaptative) au besoin, et réévaluer et adapter le programme de suivi en fonction de ces renseignements.

Un programme de suivi doit être conçu durant l'étape de cadrage du projet, de manière à permettre l'évaluation de la faisabilité globale du programme, à éclairer la conception grâce aux données provenant du suivi initial, et à établir les conditions de base pour des comparaisons ultérieures. Les activités de suivi doivent se poursuivre pendant toute la durée du projet et inclure la collecte de données historiques, de base, de conformité et opérationnelles. De plus, il est recommandé d'effectuer un suivi après des événements majeurs (p. ex. : après une tempête) afin de vérifier la résilience du projet SFN aux événements perturbateurs.

La collecte de données opérationnelles est particulièrement importante dans le cas de la gestion adaptative des SFN pour vérifier l'atteinte des objectifs de performance de GRI et la concrétisation des avantages connexes. La gestion adaptative est essentielle au succès à long terme des SFN et permet l'amélioration continue du projet SFN dans son ensemble et du programme de suivi lui-même. Le suivi est crucial pour obtenir les données nécessaires à l'évaluation de la performance des SFN, à l'établissement de seuils et à la détermination du moment où des interventions seront requises. En outre, le suivi opérationnel à long terme fournit des données et des connaissances pour d'autres projets.

Méthode générale de suivi

Les programmes de suivi suivent généralement la méthode avant-après–contrôle-impact (BACI) ou l'approche des conditions de référence (ACR). Ces méthodes comprennent un ou plusieurs sites qui servent de référence afin de comparer directement les indicateurs de performance clés du projet SFN avec le même ensemble d'indicateurs de performance du ou des sites de référence.

Les objectifs fondamentaux, mesures de performance et indicateurs de performance jouent tous un rôle important dans les programmes de suivi et, aux fins du présent rapport, ils sont définis comme suit :

- Les **objectifs fondamentaux** sont ce que le projet tente de réaliser à son niveau le plus élémentaire;
- Les **mesures de performance** sont des objectifs mesurables qui sont propres au site et aux défis qu'il pose;
- Les **indicateurs de performance** sont des éléments mesurables ou observables du projet SFN qui indiquent la progression du système vers le but et les objectifs du projet.

Il faut sélectionner des indicateurs de performance pour atteindre les objectifs et les mesures de performance propres au projet. En général, ils doivent :

- être scientifiquement fondés et respecter les critères SMART (spécifiques, mesurables, atteignables, réalistes, temporellement définis);
- être pratiques et simples, mais satisfaire les exigences techniques;
- être établis à une échelle appropriée (spatiale et temporelle) qui tient compte de la variabilité de l'indicateur à mesurer, des caractéristiques régionales, des changements climatiques et de la morphologie urbaine;

- être établis à une échelle appropriée (spatiale et temporelle) qui s'aligne sur différents contextes décisionnels et principes politiques et différentes obligations en matière de production de rapports;
- indiquer clairement et utiliser des conditions de référence et des évaluations de base;
- faciliter l'évaluation rapide des trajectoires et la gestion adaptative;
- être fondés sur une optique transdisciplinaire;
- utiliser des indicateurs courants ou standards (si possible) pour comparer l'efficacité des SFN entre les sites et assurer la transférabilité et l'évolutivité des résultats.

Mesures et indicateurs de performance, et techniques de suivi

Les mesures et indicateurs de performance sont répartis dans les catégories suivantes : GRI, plan environnemental, plan social et plan économique. **Les mesures de performance de base sont résumées ci-dessous.** Il pourrait être nécessaire d'inclure dans les programmes des mesures supplémentaires ou optionnelles propres au projet.

- Gestion des risques d'inondation (GRI)
  - Réduction de la zone inondable pour un événement donné
  - Réduction de l'exposition aux risques d'inondation pour un événement donné
  - Réduction des effets des vagues dans les zones cibles
  - Maintien de la stabilité des éléments structuraux
  - Amélioration de la résilience des infrastructures ou des mesures d'urgence en cas de défaillance
- Plan environnemental
  - Rétablissement d'un régime hydrologique plus naturel
  - Amélioration de la résilience de l'écosystème
  - Amélioration ou maintien des caractéristiques et de la connectivité de l'habitat essentiel dans un site
  - Amélioration de la biodiversité et de l'utilisation de l'habitat (flore et faune)
  - Séquestration de carbone
- Plan social
  - Amélioration de la sécurité et de la tranquillité d'esprit
  - Connectivité avec les espaces verts et les systèmes naturels
  - Améliorations esthétiques
  - Renforcement de l'engagement communautaire et de l'intendance de l'environnement
  - Perception favorable du public
  - Espaces culturels, religieux ou spirituels
  - Réduction de la pauvreté
  - Participation des peuples autochtones ou de groupes marginalisés, et intendance
  - Équité et inclusion
  - Avantages supplémentaires en matière d'adaptation aux changements climatiques et d'atténuation de ces derniers
- Plan économique
  - Réduction des coûts en capital
  - Réduction des coûts d'entretien et d'exploitation
  - Conséquences moindres des inondations sur les collectivités
  - Amélioration des moyens de subsistance dans les secteurs de la pêche, de l'agriculture ou de l'artisanat
  - Possibilités d'emplois locaux (p. ex. : tourisme)

Pour chacune des catégories ci-dessus, le présent rapport propose et examine en détail des listes de mesures de performance supplémentaires (ou optionnelles) qui pourraient convenir à certains projets, sans toutefois constituer des mesures de base.

Il présente également des études de cas pour certaines SFN afin d'illustrer comment les différentes méthodes et mesures de suivi sont incluses et ajustées en fonction des contextes propres aux projets.

La sélection des indicateurs de performance dépend d'un ensemble des mesures propres au projet, ainsi que du type de SFN, du climat, de la conception du programme de suivi, du but du projet, de l'accès à l'expertise et à l'équipement, et des contraintes budgétaires. De nombreux indicateurs de performance comptent plusieurs méthodes de suivi appropriées potentielles. Le présent document examine les compromis possibles en matière de coûts, de précision ou d'intensité et de superficie.

Considérations particulières relatives aux écosystèmes et au type de SFN

Les écosystèmes avec lesquels les SFN interagissent et dont elles font partie intégrante sont un facteur déterminant dans la sélection des indicateurs de performance et des techniques de suivi connexes. Le présent document donne un aperçu des considérations à prendre en compte quand on élabore des plans de suivi pour une gamme d'écosystèmes et de types de SFN. Ces considérations particulières sont généralement regroupées ainsi : plages et dunes; zones humides et estrans; îles; forêts côtières et zones boisées; éléments submergés; et éléments hybrides.

Analyse des données, accès aux données et diffusion

Tout programme de suivi doit comprendre la production de rapports et l'échange d'information afin de promouvoir les SFN et d'étendre les avantages des projets SFN. Les méthodes d'analyse des données doivent être documentées et facilement reproductibles. Dans la mesure du possible, les fichiers et méthodes de traitement des données doivent être publiés. Les données doivent être mises à la disposition du public (dans la mesure du possible) et être réutilisables. Les métadonnées (y compris les détails sur les méthodes de mesure et d'analyse) doivent être incluses dans toutes les données afin de garantir leur utilisabilité dans l'avenir. Les rapports doivent comprendre des éléments clés standardisés, comme un aperçu clair du but et du calendrier du projet, la description des sites et du contexte historique pertinent, une description de toutes les méthodes, de tous les protocoles et de toutes les analyses, les résultats, une discussion sur les enseignements tirés et les métadonnées. Le document intitulé *Suivi de l'efficacité* contient des recommandations et des pratiques exemplaires complémentaires relatives à l'analyse des données, à l'accès à celles-ci et à leur diffusion.

Comme les programmes de suivi produisent des données susceptibles d'intéresser plusieurs personnes et groupes (au-delà de l'équipe de projet même), la gestion de données doit se faire de manière à ce que les ensembles de données soient faciles d'accès, à utiliser et à interpréter pour d'autres personnes. Heureusement, il existe des protocoles établis d'archivage et d'échange de données que peuvent adopter les partisans des SFN, comme la méthode FAIR (données trouvables, accessibles, interexploitables et réutilisables) (Wilkinson et coll., 2016).

Possibilités et orientations futures

Les probabilités d'adoption des SFN à des fins de GRI augmentent à mesure que s'accumulent les preuves scientifiques de leurs succès. Toutefois, les équipes de scientifiques et d'ingénierie qui conçoivent et évaluent les SFN doivent rendre leurs résultats accessibles et compréhensibles pour le public afin de le sensibiliser. Par exemple, il serait possible de s'adresser au public sur les médias sociaux, en préparant des exposés de politique ou d'autres résumés de recherche en langage clair, et en travaillant avec des membres de la collectivité sur des programmes de suivi.

La participation des membres de la collectivité au suivi des SFN constitue un excellent moyen de promouvoir l'adhésion du public aux SFN, de le sensibiliser aux avantages des projets SFN, de

susciter un sentiment de possession et d'appartenance, et de renforcer les capacités locales de suivi. Plusieurs des indicateurs clés indiqués ci-dessus se prêtent au suivi à l'aide de techniques simples qui peuvent être appliquées à grande échelle et à peu de frais moyennant une formation minimale. Les membres de la communauté ont de plus en plus d'occasions de participer en alimentant des plateformes d'observation de la nature de sources ouvertes, comme iNaturalist, eBird ou CoastSnap. Les partisans de projets SFN pourraient expressément intégrer ces outils dans les programmes de suivi afin d'encourager une plus grande participation.

Les avancées technologiques, comme les réseaux de capteurs et les systèmes d'aéronefs télépilotés (drones), mettent également certaines techniques de suivi à la portée des groupes communautaires. Toutefois, certains indicateurs clés pour le suivi des SFN sont encore difficiles à mettre en œuvre sans équipement coûteux ou sans l'aide de spécialistes. Dans ces cas, la mise en relation de membres de la collectivité avec des spécialistes pourrait améliorer la participation communautaire pour un suivi efficace.

Enfin, s'il existe de nombreux protocoles de suivi appropriés pour toutes sortes de situations en matière de SFN, leur coût peut limiter leur mise en œuvre, surtout pour les groupes communautaires. Plus de recherches sont nécessaires pour mettre au point des solutions de suivi peu coûteuses et accessibles pour de nombreux indicateurs qui exigent actuellement des compétences techniques et des dépenses élevées. En outre, les gouvernements doivent remplacer les modèles de financement à forte intensité de capital (p. ex. : limités à la conception ou à l'aménagement, avec suivi minimal après la mise en œuvre) par des modèles de financement de projets à long terme qui incluent des activités sur tout le cycle de vie et une gestion adaptative.

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*;
- *Suivi de l'efficacité*;
- *Suivi de l'efficacité : Méthodes et indicateurs proposés* (le présent document).

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 :

- Danika Van Proosdij, professeure au Département de géographie et d'études environnementales et directrice, *TransCoastal Adaptations : Centre for Nature-Based Solutions* (Adaptations transcôtières : Centre sur les solutions fondées sur la nature), Université Saint Mary's;
- Jennie Graham, vice-présidente et spécialiste principale de la restauration, *CB Wetlands and Environmental Specialists* (CBWES, spécialistes des zones humides et de l'environnement de CB);
- Jeremy Lundholm, écologiste principal, CBWES;
- Jocelyn Kickbush, écologiste de la restauration, CBWES.

Nous remercions DHI et l'Université nationale autonome du Mexique (UNAM) pour leur contribution et leur révision, tout particulièrement les personnes suivantes :

- Jessica Wilson, gestionnaire de projet et ingénieure des travaux maritimes, DHI;
- Jan van Smirren, océanographe principal, DHI;
- Christian Appendini, conseiller externe, DHI et professeur à l'UNAM;
- Danker Kolijn, responsable des solutions marines et côtières (Amériques), DHI.

Nous remercions tout spécialement le comité directeur de la CCE, qui a fourni de précieux conseils et renseignements 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 chargé 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, *United States Department of State* (département d'État des États-Unis).

Nous remercions le comité ad hoc de spécialistes, qui a réalisé un examen technique et fourni des conseils sur la méthode et les indicateurs proposés dans le présent rapport :

- Xavier Flores Vidal, Université autonome de Basse-Californie;
- Porfirio Álvarez, *Consorcio de Instituciones del Golfo de México y Caribe* (Consortium d'institutions du golfe du Mexique et des Caraïbes);
- Horacio Limón, consultant en économie de l'environnement;

- Phil Osborne, *Northwest Hydraulic Consultants* (Consultants en hydraulique Northwest);
- Pete Zuzek, Zuzek Inc.;
- Michelle Molnar, *Municipal Natural Assets Initiative* (Initiative pour les actifs naturels des municipalités);
- Colleen Mercer Clarke, scientifique interdisciplinaire, architecture du paysage/adaptation côtière;
- Joanna Eyquem, Centre Intact d'adaptation au climat, Université de Waterloo;
- Cole Delisle, *Kahnawake Environment Protection Office* (Bureau de protection de l'environnement de Kahnawake);
- Candice D. Piercy, *Engineer Research and Development Center* (Centre de recherche et de développement du génie) de l'armée américaine;
- Bhaskaran Subramanian, *Climate Program Office* (Bureau du programme climatologique) de la NOAA;
- Marguerite Pelletier et D. Dale Werkema Jr., *Environmental Protection Agency* (EPA, Agence de protection de l'environnement) des États-Unis.

1 Introduction à la méthode proposée

Les collectivités des zones côtières de faible élévation sont de plus en plus exposées aux risques d'inondation côtière, notamment à cause de l'augmentation des densités de population et des effets des changements climatiques (Bush et Lemmen, 2019; Environmental Protection Agency [EPA, Agence de protection de l'environnement], 2017; Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC, Institut national de l'écologie et des changements climatiques], 2019). Les tempêtes et les inondations qu'elles causent, de même que l'érosion peuvent entraîner des conséquences économiques, sociales et écologiques considérables (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [GIEC], 2022; Moudrak et coll., 2018). Des régions partout au Canada, au Mexique et aux États-Unis subissent des types de tempêtes très différentes – tempêtes extratropicales, fronts froids et cyclones tropicaux, entre autres – qui sont susceptibles de causer de graves inondations côtières. Par exemple, l'ouragan Delta qui a touché terre près de Puerto Morelos, au Mexique, le 7 octobre 2020, a privé d'électricité un tiers de la population. On estime que cet ouragan a causé environ 185 millions de dollars de dommages au pays (National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, Administration océanique et atmosphérique nationale), 2020). Plus récemment, en octobre 2023, l'ouragan Otis a touché terre dans le sud du Mexique, causant d'immenses dégâts et au moins 27 morts (Williams, 2023). En septembre 2022, le typhon Merbok et deux ouragans majeurs, Fiona et Ian, ont également causé aux États-Unis et au Canada certains des plus importants dégâts de l'histoire récente, dont des pertes de vie. Le typhon Merbok a frappé la côte ouest de l'Alaska le 17 septembre 2022, provoquant des inondations dévastatrices, d'importantes pertes d'infrastructures et une interruption de la saison de chasse essentielle à la subsistance des communautés autochtones (Thoman, 2022). L'ouragan Fiona a touché terre le 24 septembre 2022 dans le Canada atlantique, et a causé pour 800 millions de dollars canadiens de dommages assurés, modifié radicalement les côtes et endommagé les infrastructures (Bureau d'assurance du Canada [BAC], 2023). Port aux Basques, à Terre-Neuve-et-Labrador, a été dévasté, des maisons, des moyens de subsistance et des habitants ayant été emportés par la mer (*Canadian Broadcasting Corporation* [CBC, Société Radio-Canada], 2022). L'ouragan Ian a quant à lui touché terre en Floride, aux États-Unis, seulement quatre jours plus tard, forçant l'évacuation de 2,5 millions de Floridiens et tuant 89 personnes (Livingston, 2022).

La gestion des risques d'inondation (GRI) est essentielle pour protéger les zones urbaines et rurales du Canada, du Mexique et des États-Unis contre les inondations et l'érosion. Dans de nombreuses régions d'Amérique du Nord, la GRI s'est toujours appuyée fortement sur des infrastructures grises, comme des digues, des levées et des ouvrages longitudinaux. Ces dernières ont parfois connu des échecs catastrophiques (p. ex. : la rupture des levées lors de l'ouragan Katrina, en 2005, à La Nouvelle-Orléans) ou ont entraîné des conséquences socioéconomiques ou environnementales négatives inattendues (Bridges et coll., 2021). Par exemple, les infrastructures protectrices (comme les murs de protection) peuvent avoir des effets négatifs sur la biodiversité côtière et accroître l'érosion dans les zones adjacentes dépourvues de protection. En revanche, les solutions fondées sur la nature (SFN) sont de plus en plus reconnues à l'international comme assurant des fonctions de protection tout en procurant des avantages connexes supplémentaires sur le plan social, économique et environnemental, si elles sont conçues de manière appropriée et adaptées aux conditions environnementales locales (Bridges et coll., 2021; Union internationale pour la conservation de la nature [UICN], 2020; Shiao et coll., 2020). Or, les données probantes sont limitées en ce qui concerne les avantages connexes que procurent les SFN et l'efficacité de celles-ci à accomplir des fonctions de protection, comparativement aux infrastructures d'ingénierie conventionnelles (Kumar et coll., 2021; Dumitru et coll., 2021). C'est ce qui explique les incertitudes à leur égard et les obstacles à leur adoption (Kumar et coll., 2021; Bridges et coll., 2021). Le document intitulé *Suivi de l'efficacité*

explique plus en détail ces obstacles. Une gestion adaptative et un suivi efficace sont essentiels pour réduire ces incertitudes.

La gestion adaptative est une méthode structurée et itérative qui permet de continuellement modifier et réviser des mesures de gestion (comme les activités d'entretien) afin de tenir compte des conditions changeantes (dont celles dues aux changements climatiques) et des résultats variables du projet (Bridges et coll., 2021). Il s'agit d'un thème intégral et transversal pour la mise en œuvre des SFN (Bridges et coll., 2021; Silva Zuniga et coll., 2020; Banque mondiale, 2017). Un suivi régulier et à long terme constitue la base d'une gestion adaptative efficace et de la future mise en œuvre des SFN.

Le suivi est un processus continu qui surveille à la fois le processus de mise en œuvre (c'est-à-dire ce qui se passe et à quel moment dans le cycle du projet) et la performance des SFN par rapport aux résultats escomptés ou aux critères de performance (Skodra et coll., 2021). La performance peut être définie comme la mesure dans laquelle « les SFN relèvent un défi nommé ou atteignent un objectif précis dans un lieu, à un moment et dans un contexte socioéconomique donné » [*traduction*] (Raymond et coll., 2017, dans Skodra et coll., 2021, 49). Le suivi permet d'évaluer les changements par rapport, ou comparativement aux conditions de base ou de référence, ou les changements vers certains objectifs ou seuils. Il est une source essentielle d'information sur l'efficacité de tout projet de GRI, y compris les SFN. Il fournit la base factuelle pour les projets SFN en cours et à venir.

Le présent document vise à soutenir l'adoption des SFN dans les collectivités côtières en fournissant aux personnes prenant les décisions des renseignements pratiques et des conseils relatifs au suivi de l'efficacité et de l'incidence des SFN. Il comble en outre les multiples lacunes dans les données et lève des obstacles cernés précédemment. Ce document a été rédigé par TransCoastal Adaptations : Centre for Nature-Based Solutions (Adaptations transcôtières : Centre sur les solutions fondées sur la nature) de l'Université Saint Mary's et CB Wetlands and Environmental Specialists (CBWES, spécialistes des zones humides et de l'environnement de CB). Il fait partie d'une série de documents préparés par DHI Water and Environment Inc. (DHI) pour la Commission de coopération environnementale (CCE) destinée à être consultée dans son intégralité. Cette série comprend les documents suivants :

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

Le présent document diffère du rapport *Suivi de l'efficacité* en ce qu'il fournit des méthodes plus détaillées en matière de suivi des SFN.

1.1 Objectifs et portée

DHI a organisé une série d'ateliers intersectoriels au printemps 2022 dans le cadre d'un projet de la CCE visant à soutenir la mise en œuvre élargie des SFN pour gérer les risques d'inondation côtière dans les communautés nord-américaines (DHI, 2022). Cette série d'ateliers comprenait sept séances qui ont réuni 95 spécialistes du Canada, du Mexique et des États-Unis. Deux de ces séances ont porté spécifiquement sur le suivi de l'efficacité des SFN. Les personnes participantes ont pris part à une session de remue-méninges pour cerner les lacunes dans les données ainsi que les possibilités et obstacles liés au suivi des SFN.

Le présent document aborde les écarts des savoirs cernés durant les ateliers, résume l'information existante et fournit des guides pratiques pour planifier, évaluer et mettre en œuvre des programmes de suivi constructifs concernant les SFN employées pour gérer les risques d'inondation dans les

collectivités côtières. Il fait partie d'un ensemble de documents d'orientation destinés à aider les personnes prenant les décisions à mettre en œuvre les SFN pour gérer les risques d'inondation côtière en Amérique du Nord.

Plus précisément, ce document vise à :

- résumer les principes directeurs et les objectifs du suivi;
- fournir les pratiques exemplaires pour concevoir des programmes de suivi;
- établir des indicateurs de performance de base et supplémentaires (ou optionnels) pour le suivi, à partir de références internationales existantes;
- résumer les considérations propres aux différents types de SFN et d'écosystèmes;
- résumer les principales considérations liées à l'analyse des données de suivi, à l'accès à celles-ci et à leur diffusion;
- résumer les principales considérations techniques pour les plans de suivi, dont les indicateurs, les méthodes, les différents milieux physiques et les échelles temporelles et spatiales;
- fournir des études de cas relatives à la conception et à la mise en œuvre des plans de suivi et à leur utilité dans l'évaluation de l'efficacité, de la performance et de la résilience des SFN;
- combler les lacunes et écarter les obstacles relevés lors de la précédente série d'ateliers intersectoriels, dans la mesure du possible.

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 service et le suivi des SFN en vue de réduire les risques d'inondation dans les collectivités côtières. 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 un examen exhaustif d'une documentation de plus en plus abondante sur les SFN.

1.2 Principes directeurs

Le suivi vise à déterminer si un projet est efficace ou non, et dans quelle mesure. L'efficacité peut être définie comme « le degré de réalisation des objectifs et la mesure dans laquelle les problèmes visés sont résolus. Contrairement à l'efficience, l'efficacité est déterminée sans référence aux coûts » [*traduction*] (Raymond et coll., 2017, 6).

Le document *Evaluating the Impact of Nature-Based Solutions: A Handbook for Practitioners* (Évaluation de l'incidence des solutions fondées sur la nature : guide pour la communauté de pratique) (Dumitru et Wendling, 2021) présente trois éléments essentiels d'évaluations de la performance bien conçues et de l'effet des SFN, qui reposent sur une analyse approfondie d'études de cas en Europe. Ces éléments essentiels prévoient :

1. une évaluation de l'effet qui répond à une question concrète;
2. l'élaboration d'une solide méthode qui équilibre la compréhension de la complexité et de la diversité des résultats des SFN, dont les compromis, et la faisabilité par rapport aux ressources disponibles et au contexte socioéconomique particulier;
3. la création d'une équipe d'évaluation transdisciplinaire et multisectorielle en fonction des types de SFN et des résultats recherchés.

Leur capacité à procurer des avantages connexes sur le plan social, économique et environnemental, en plus d'avantages liés à la GRI, constitue un élément clé des SFN. Il est donc essentiel que les protocoles de suivi comprennent des indicateurs de performance couvrant les quatre catégories d'avantages interconnectés. Les synergies et les compromis entre différentes catégories d'effets des SFN doivent également être examinés. En outre, compte tenu des lacunes dans les données sur les

effets à long terme des SFN, les programmes de suivi doivent durer aussi longtemps que possible et inclure les déservices (p. ex. : apport réduit en sédiments aux rivages en aval) dans l'évaluation des SFN (Dumitru et coll., 2020). Le chapitre 2 du rapport de 2021 de la Commission européenne, Direction générale de la recherche et de l'innovation, *Evaluating the Impact of Nature-Based Solutions: A Handbook for Practitioners*, contient de l'information plus détaillée sur ce sujet (Dumitru et Wendling, 2021).

Par ailleurs, un certain nombre de principes directeurs doivent être pris en compte lors de l'élaboration et de la mise en œuvre d'un plan de suivi des SFN (Skodra et coll., 2021). Les plans et indicateurs doivent adhérer aux principes suivants :

- être scientifiquement fiables et respecter les critères **SMART** (spécifiques, mesurables, atteignables, réalistes, temporellement définis);
- être **pratiques** et simples, mais répondre aux exigences techniques;
- se dérouler à une **échelle appropriée** (spatiale et temporelle) qui tient compte de la variabilité de l'indicateur à mesurer, des caractéristiques régionales, des changements climatiques et de la morphologie urbaine;
- se dérouler à une échelle appropriée (spatiale et temporelle) qui **s'aligne sur** différents contextes décisionnels, des principes politiques et des **obligations en matière de production de rapports**;
- indiquer clairement et utiliser les **conditions de référence** et les évaluations **de base**;
- faciliter l'évaluation rapide des trajectoires et de la gestion adaptative;
- se fonder sur une approche **transdisciplinaire**;
- utiliser des indicateurs **courants ou standards** (si possible) pour faciliter la comparaison entre sites et assurer la **transférabilité** et l'**évolutivité** des résultats.

1.3 Principales définitions

Les objectifs fondamentaux, les mesures de performance et les indicateurs de performance jouent tous un rôle important dans les programmes de suivi et, aux fins du présent document, sont définis comme suit :

- **Objectifs fondamentaux :** ce que le projet tente de réaliser à son niveau le plus élémentaire (p. ex. : diminuer les conséquences des tempêtes);
- **Mesures de performance :** objectifs mesurables qui sont propres au site et aux défis qui s'y posent (p. ex. : réduire le risque d'inondation d'un événement donné);
- **Indicateurs de performance :** éléments mesurables ou observables du projet SFN qui indiquent la progression du système vers les buts et objectifs du projet (p. ex. : étendue ou zone maximale d'inondation).

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. D'autres références clés propres à des environnements côtiers particuliers figurent au chapitre 4 du présent document.

- *Evaluating the Impact of Nature-Based Solutions: A Handbook for Practitioners* (Évaluation de l'incidence des solutions fondées sur la nature : guide pour la communauté de pratique), Commission européenne (Dumitru et Wendling, 2021)
- *Increasing Infrastructure Resilience with Nature-based Solutions (NbS): A 12-Step Technical Guidance Document for Project Developers* (Améliorer la résilience des infrastructures avec des solutions fondées sur la nature [SFN] : document d'orientation technique en 12 étapes pour les promoteurs de projet), Banque interaméricaine de développement (BID) (Silva Zuniga, 2020)
- *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 la gestion des risques d'inondation), *United States Army Corps of Engineers* (Corps du génie de l'armée des États-Unis) (Bridges et coll., 2021)
- *Nature-Based Solutions for Coastal and Riverine Flood and Erosion Risk Management* (Solutions fondées sur la nature pour la gestion des risques d'inondation et d'érosion côtières et riveraines), Association canadienne de normalisation et Conseil national de recherches du Canada (Vouk et coll., 2021)
- *An overview of monitoring methods for assessing the performance of nature-based solutions against natural hazards* (Vue d'ensemble des méthodes de suivi pour évaluer l'efficacité des solutions fondées sur la nature contre les risques naturels) (Kumar et coll., 2021)
- *Introducing Indicators: A First Look At Using Indicators To Measure Adaptation Progress* (Présentation des indicateurs : premier regard sur l'utilisation d'indicateurs pour mesurer les progrès en matière d'adaptation), ICLEI – Gouvernements locaux pour le développement durable (Conseil international pour les initiatives écologiques communales [ICLEI], 2022)

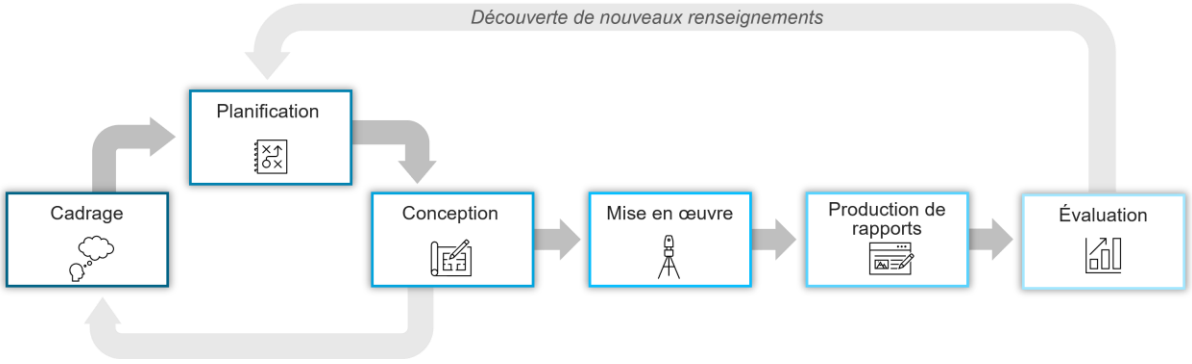
2 Méthode de suivi proposée

2.1 Processus de suivi

Comme indiqué dans le document *Suivi de l'efficacité*, les projets SFN comptent généralement cinq grandes étapes : 1) cadrage; 2) planification; 3) conception; 4) mise en œuvre; et 5) exploitation. Ces cinq étapes constituent un processus cyclique, et une réévaluation et des mises à jour continues du plan sont nécessaires pendant l'élaboration du projet. De la même façon, le suivi comporte six étapes primordiales, présentées dans la figure 1 et décrites ci-dessous (De Looff et coll., 2021). Comme pour le cycle des SFN, le processus de suivi est itératif.

- Cadrage : déterminer l'ampleur et la portée du plan de suivi et de gestion adaptative, hiérarchiser les mesures à prendre, définir les titulaires de droits et les parties prenantes, et élaborer des stratégies de financement. C'est au cours de cette étape que doit s'amorcer un engagement précoce et significatif.
- Planification : déterminer les paramètres d'intérêt, établir des mesures de performance, faire l'inventaire des réseaux de suivi existants, cerner les lacunes dans les données, et déterminer les ressources et le personnel potentiels pour exécuter le programme de suivi.
- Conception : élaborer un programme de suivi qui comprend un suivi des conditions de base préalable à la mise en œuvre du projet, déterminer la fréquence de suivi convenable à chaque mesure de performance et déterminer les méthodes appropriées, et établir des protocoles de collecte et de gestion des données.
- Mise en œuvre : exécuter le ou les programmes de suivi et les adapter, au besoin, selon les conditions sur le terrain.
- Production de rapports : examiner, analyser et présenter les données, communiquer les conclusions à l'équipe de projet et à l'entrepreneur·euse pendant les étapes d'aménagement et d'exploitation, et informer les autres parties prenantes.
- Évaluation : à l'aide des résultats du suivi, évaluer la performance des SFN, proposer des modifications à apporter aux SFN (gestion adaptative) au besoin, et réévaluer et adapter le programme de suivi en fonction des renseignements découverts.

Figure 1 – Cadre de suivi



Le suivi n'est souvent inclus qu'à l'étape d'exploitation des projets de GRI (souvent pour déterminer la conformité). Or, pour les projets SFN, le suivi doit absolument commencer dès le début du projet, lors des étapes de cadrage et de planification (avant la mise en œuvre), et se poursuivre à long terme. Il convient d'intégrer dès le début la conception complète du programme de suivi dans le cycle de vie du projet. Des ressources et un budget suffisants pourront ainsi être alloués aux activités de suivi et de

gestion adaptative, et des définitions et un langage de travail communs pourront être élaborés. En outre, les données de base sont essentielles pour déterminer la faisabilité d'un projet et quelle méthode SFN conviendrait le mieux à un site particulier. Le suivi précoce influera sur ce que l'on conçoit et comment on le conçoit, en plus de guider la planification du projet (comme le moment de mise en œuvre de chaque étape) et la façon de le mettre en œuvre. Le succès global du projet pourrait être compromis sans ces connaissances précoces. Cela pourrait être particulièrement crucial quand un projet SFN comporte des enjeux, comme la présence d'habitats d'espèces menacées. Il est alors nécessaire de faire preuve de sensibilité lorsque du travail est effectué durant certains stades vie (p. ex. : la saison de nidification). D'un point de vue temporel, spatial et méthodologique, la cohérence entre les données de base et les données post-aménagement est primordiale pour évaluer l'efficacité des projets, tout comme pour comprendre en quoi les changements climatiques pourraient modifier les conditions de base. Par conséquent, pour assurer une plus grande rigueur scientifique et obtenir les renseignements les plus utiles, le suivi des conditions de base doit commencer avant la mise en œuvre, tant sur le site du projet que sur le site de référence.

L'intégration complète du suivi tout au long du cycle de vie du projet est également importante pour éclairer la gestion adaptative. Définie comme « apprendre par la pratique » (Thom, 2000; PWA et Faber, 2004), la gestion adaptative est fondamentale dans la gestion des SFN pour réduire l'incertitude dans la conception des projets. Elle confère aux projets une mesure de souplesse, et leur permet d'évoluer dans le temps en fonction des conditions environnementales changeantes (de Looff et coll., 2021) et de corriger les situations imprévues ou indésirables (Thom, 1997). Il arrive que la performance d'un projet s'écarte de la plage acceptable (plage déterminée au cas par cas et comparée au site de référence correspondant). La gestion adaptative prévoit la mise en place d'un plan pour remettre le projet sur la bonne voie. Pour que la gestion adaptative soit efficace, le suivi doit (Thom, 2000) :

1. mesurer les conditions du système au moyen d'indicateurs sélectionnés;
2. évaluer les progrès réalisés par rapport aux objectifs et aux indicateurs de performance;
3. déterminer les mesures à prendre.

Les mesures appropriées à prendre comprennent l'inaction, des mesures correctives ou la modification des objectifs (Thom, 2000). Le document intitulé *Suivi de l'efficacité* traite plus en détail de la gestion adaptative.

2.2 Pensée systémique dans le suivi

La conception d'un programme de suivi (et d'un plan de gestion adaptative) doit nécessairement prendre en compte de façon holistique le rôle du site au sein du système global, dans le contexte des objectifs généraux d'un projet. Les zones côtières sont l'interface entre les systèmes terrestres et aquatiques; elles sont très dynamiques. En général, ces zones ont une importance d'un point de vue social, culturel, économique et biologique. À ce titre, les systèmes côtiers sont intrinsèquement complexes et interconnectés. Il est important de prendre en compte non seulement les boucles de rétroaction à l'intérieur d'un système, mais aussi celles qui y sont adjacentes. Par exemple, lorsqu'on réaligne des digues gérées pour restaurer un marais côtier, il est essentiel de comprendre les processus physiques sous-jacents qui créent et maintiennent les fonctions souhaitées de cette zone humide. La mise en œuvre d'un projet de réalignement de digues gérées dans un système estuarien doit prendre en compte les effets potentiels provenant des zones en amont ou dirigés vers elles. Par exemple, des infrastructures critiques pourraient-elles être affectées par une hydrologie plus naturelle? À l'inverse, des facteurs potentiels en amont, comme le démantèlement d'un barrage, pourraient-ils entraîner un apport en eau douce plus important? Pour un projet de la sorte, le programme de suivi, de même que

l'application de la gestion adaptative, devront prioriser le suivi des fonctions des zones humides et des structures d'intérêt ou préoccupantes, ainsi que l'apport en eau douce.

Il est important de noter que cette approche holistique ne s'applique pas seulement sur le plan écologique, mais aussi sur les plans social et culturel. La façon d'utiliser la zone du projet ainsi que les aspects socialement et culturellement importants peuvent aussi profondément modifier la conception, le suivi et l'application de la gestion adaptative. Par exemple, si un projet s'attaque à la dégradation d'un système dunaire, il est essentiel d'examiner comment et pour quelles activités les gens utilisent les dunes (circulation à pied ou véhicules tout-terrain, etc.). S'il s'agit d'une importante zone de loisirs pour la communauté locale, susceptible de stimuler le tourisme et l'activité économique dans la région, peut-être n'est-il pas réaliste de vouloir restreindre complètement l'accès au public. En effet, comme les dunes sont particulièrement sensibles à l'activité humaine, la prise en compte incorrecte de cette utilisation pourrait compromettre un projet de restauration pourtant bien conçu sur le plan écologique. À défaut de restreindre complètement l'accès, il faudra peut-être inclure des mesures de sensibilisation du public (p. ex. : des panneaux) et des structures pour contenir ou diriger l'activité humaine (p. ex. : des promenades, des clôtures) dans la conception, le budget et les objectifs du projet. Ces considérations détermineront également ce qui doit faire l'objet d'un suivi (p. ex. : l'activité humaine et l'intégrité des promenades) et la manière d'appliquer la gestion adaptative (p. ex. : la nécessité d'un volet de sensibilisation du public).

Aborder les projets de manière holistique et utiliser cette optique pour déterminer l'objet du suivi et la manière d'appliquer la gestion adaptative permet l'évolution naturelle du site. Il en résulte des conditions environnementales optimales et l'optimisation des ressources requises aux étapes de conception, de mise en œuvre et d'entretien du projet. Rappelons que la gestion adaptative ne vise pas à reproduire un système historique, mais plutôt à permettre au paysage d'évoluer naturellement en équilibre et en phase avec les conditions écologiques présentes et futures.

2.3 Méthode générale

Comme indiqué dans la section 2.1, le suivi doit être incorporé dans le cycle complet du projet SFN et peut comprendre un suivi des données historiques, de base, de conformité et opérationnelles (à long terme). À l'étape de conception et de sélection des indicateurs de performance du programme de suivi, la sélection sera « propre au projet et influencée par les objectifs du projet, l'échelle, le risque connexe, le degré d'innovation, le budget, les directives politiques et les facteurs logistiques » [*traduction*] (DHI, 2024a). Comme indiqué ci-dessus, la conception du programme de suivi et la sélection des indicateurs de performance connexes doivent avoir lieu le plus tôt possible dans le cycle de vie du projet, au cours des étapes de cadrage et de planification. Si les indicateurs de performance (voir chapitre 3) peuvent varier d'un projet à l'autre (à l'exception des indicateurs de base), il importe de déterminer et de corriger les causes sous-jacentes de la dégradation des écosystèmes et des agents de stress pour que soit couronnée de succès la mise en œuvre de tout projet SFN. Pour répondre à ces besoins et aux normes scientifiques de base, il est recommandé d'adopter l'une de deux méthodes générales de suivi :

- Avant-après–contrôle-impact (BACI);
- Approche des conditions de référence (ACR).

2.3.1 Méthode BACI

La méthode BACI est utile dans les cas où les sites de traitement et les sites témoins ne peuvent être choisis de manière aléatoire, ce qui est le plus souvent le cas avec les projets SFN. Dans de nombreux projets SFN, le lieu de traitement correspond souvent à une zone d'intérêt ou de préoccupation

humaine (comme des rivages érodés, d'importantes infrastructures menacées par les effets des changements climatiques, ou des sites visés par un accès limité et la propriété foncière). La méthode BACI évalue les effets des perturbations naturelles ou anthropiques sur un écosystème tout en permettant une conception expérimentale solide sur le plan statistique (Conner et coll., 2016; Smokorowski et Randall, 2017). La méthode BACI se compose de deux parties : avant-après, et contrôle-impact. Elle peut ainsi isoler efficacement les effets du projet ou du traitement de la variabilité naturelle, ce qui en fait l'un des modèles les plus favorables pour les programmes de suivi des effets sur l'environnement (Smokorowski et Randall, 2017).

L'échantillonnage avant-après fournit des renseignements sur l'évolution temporelle du processus SFN par rapport à l'état historique. Il consiste à collecter des données de suivi de base avant l'étape de mise en œuvre d'un projet SFN afin de déterminer les conditions *avant*, puis *après* la mise en œuvre de la SFN. Il sera ainsi possible de déterminer les changements dans le système par rapport aux conditions de base.

L'échantillonnage contrôle-impact requiert un site ou une zone de référence (c.-à-d. un site ou une zone témoin), que l'on compare ensuite à la zone ou au site de traitement. Il est ainsi possible de distinguer les effets des tendances environnementales sous-jacentes (comme l'élévation du niveau de la mer ou l'acidification des océans), de la variabilité naturelle et des processus stochastiques. Les résultats de l'analyse des données doivent être le plus précis possible. Idéalement, le suivi du site de traitement et du site témoin devrait commencer en même temps, avant la mise en œuvre de la SFN. Il devrait aussi se poursuivre sur la même durée après la mise en œuvre. De plus, le prélèvement des échantillons devrait se faire à la même fréquence, en utilisant les mêmes méthodes et selon les mêmes calendriers. Par exemple, si l'échantillonnage pour le suivi des conditions de base au site de traitement se déroule de 2022 à 2028, l'échantillonnage au site témoin doit se dérouler durant la même période. Si les échantillons de base ont été prélevés le 3 septembre, le prélèvement des échantillons témoins devrait idéalement avoir lieu à la même date ou aussi près de cette date que possible. Idéalement, le suivi devrait aussi avoir lieu à la même date lors de chaque année subséquente. Toutefois, advenant l'existence de données historiques pour le site témoin, elles pourraient être utilisées pour définir l'état initial du site et ainsi permettre des économies de temps et d'argent en évitant l'échantillonnage durant la première année au site de traitement. De même, un échantillonnage moins fréquent serait acceptable au site témoin, encore une fois pour économiser temps et argent (p. ex. : tous les deux ans, tandis que le suivi au site de traitement a lieu tous les ans). Ces options exigent un examen minutieux des données disponibles et une connaissance de la variabilité inhérente du système de contrôle. En ajoutant davantage de sites témoins, il sera possible de déterminer plus précisément la cause des effets, car l'analyse des tendances à partir des données sera plus approfondie. Cependant, cela dépendra de la portée du projet (ou du financement, de la main-d'œuvre, de l'environnement, etc.). Les études de cas 2 et 3 présentent des programmes de suivi qui utilisent des modèles BACI.

Il existe plusieurs façons d'analyser statistiquement les données, selon le projet, mais toutes comprennent une certaine forme d'analyse de la variance. Green (1979) et Hurlbert (1984) donnent un aperçu des analyses statistiques de base. De plus en plus de travaux soutiennent l'utilisation de tests statistiques complémentaires, la méthode précise dépendant des données disponibles et des préférences en matière de présentation des données (Conner et coll., 2016; Stewart-Oaten et coll., 1986; Underwood, 1991). Le chapitre 5 aborde d'autres considérations relatives à l'analyse des données, à l'accès à celles-ci et à leur diffusion.

2.3.2 Approche des conditions de référence

Le concept de l'approche des conditions de référence (ACR) ressemble à la partie contrôle-impact (CI) de la méthode BACI, qui porte principalement sur l'évaluation biologique. Il est toutefois possible d'étendre ces concepts pour y ajouter d'autres indicateurs environnementaux, sociaux, économiques ou de GRI. Cette approche tient compte de la diversité des biotes et des caractéristiques environnementales en définissant « les conditions de référence » à partir de plusieurs sites reconnus pour présenter diverses expressions de « bonnes conditions ». Il s'agit ensuite de comparer ces conditions de référence (définies en fonction de nombreux sites) au site de traitement. La manière et l'ampleur selon lesquelles ce site diffère par rapport aux conditions de référence servent à mesurer l'effet des agents de stress sur l'écosystème. Une principale différence distingue la méthode BACI de l'ACR : dans le cas de cette dernière, les effets se sont déjà produits, donc il ne peut y avoir d'échantillonnage « avant l'impact ». Cette situation n'étant pas idéale, il convient d'utiliser la méthode BACI autant que possible. Autre différence importante : l'ACR porte principalement sur la faune, et tout échantillonnage physique et chimique porte avant tout sur son rapport avec la faune (généralement des invertébrés). Dans le cas de la méthode BACI, la faune peut être un indicateur optionnel. Bowman et Somers (2005) décrivent clairement et en détail les étapes de l'ACR, ainsi que les analyses statistiques appropriées à utiliser lorsque cette approche est choisie. Bien qu'elle soit traditionnellement axée sur l'eau douce, elle a été appliquée ces dernières années à un ensemble élargi d'écosystèmes (Herlihy et coll., 2019). En théorie, l'ACR permet de comparer tous les indicateurs de performance (dont les indicateurs sociaux, économiques et environnementaux) en résumant les conditions de référence pour chacun à l'aide de données provenant de plusieurs sites (voir l'étude de cas 1).

Étude de cas 1 – Approche des conditions de référence au marais Converse

Restauration du marais Converse — Rivière Mésagouèche
Approche des conditions de référence au marais Converse — (Nouvelle-Écosse), Canada

Le réalignement de la digue du marais Converse et la restauration des marais salés ont été entrepris en raison de l'érosion qui affectait à la fois les zones humides de la zone intertidale et une digue qui protégeait les terres agricoles et les routes le long de l'embouchure de la rivière Mésagouèche (partie supérieure de la baie de Fundy, en Nouvelle-Écosse et au Nouveau-Brunswick, au Canada). Étant donné l'augmentation des coûts d'entretien et de réparation de la digue, et la menace d'inondation des terres adjacentes, il a été décidé que la meilleure solution pour ce site consistait à restaurer les marais salés suivant le réalignement de la digue gérée.

La collecte des données de base sur l'historique du site, les attributs géospatiaux, l'hydrologie, les sols et sédiments, et la végétation s'est déroulée en 2017 et 2018. La nouvelle digue de 150 m a été achevée à l'automne 2018, et l'ancienne digue a été rompue en décembre 2018 (Bowron et coll., 2019).

La condition de référence pour le programme de suivi a été tirée d'une base de données régionale sur les conditions des habitats des marais côtiers, y compris de nombreux sites de référence pour plusieurs projets conçus selon la méthode BACI. Chaque site de référence était représenté par des parcelles reproduites couvrant les principaux gradients d'élévation présents sur chaque site. Pour déterminer les parcelles de référence appropriées de la base de données à comparer avec les parcelles du site d'étude de Converse, on a sélectionné des sites appartenant à la même classe morphologique (c.-à-d. la classe des marais salés des rivières à marée). À partir de ces sites de référence, les parcelles ont été choisies en fonction de l'élévation, de la fréquence des inondations et de l'hydropériode, de sorte que les plages de données pour chaque variable des parcelles de référence concordent le plus possible avec celles des parcelles du site d'étude. La taille des parcelles et les méthodes d'échantillonnage de la base de données de référence étaient identiques à celles utilisées dans le programme de suivi du site d'étude, de manière à permettre des comparaisons directes. Les parcelles de référence ont été utilisées pour comparer la couverture végétale et la composition en espèces végétales au fil du temps sur le site d'étude de Converse avec la gamme de valeurs trouvées dans les parcelles de référence.

Le site est toujours en transition trois ans après le réalignement de la digue, mais en voie de restauration. Le rétablissement des inondations causées par les marées a entraîné le retrait de communautés agricoles ainsi que des taux de sédimentation d'abord élevés; ils ont diminué au cours des années suivantes à mesure que les sédiments se déposaient et se consolidaient. En tout, 74 % de la superficie du site a été converti en sol nu au cours de la première année de restauration, proportion qui avait diminué à 40 % au cours de la troisième année (figure 2). Dans certaines parties du site de Converse, la végétation dans les parcelles de suivi commence à correspondre à la composition et la diversité des espèces dans les parcelles de référence (Bowron et coll., 2022).

Figure 2 – Vue aérienne oblique du site de réalignement de la digue gérée de Converse sur l'isthme de Chignectou

Source : Photo prise le 25 juillet 2021 (environ deux ans et demi après la restauration), par Samantha Lewis, CBWES, à l'aide d'un drone DJI Phantom 4.

2.3.3 Autres méthodes

Les méthodes de suivi BACI et ACR constituent des pratiques exemplaires, mais il faut aussi reconnaître que d'autres méthodes peuvent servir lorsque les répercussions du projet sont bien comprises, au cours de certaines étapes du cycle de vie du projet, ou lorsque les ressources ou les calendriers sont limités. Des évaluations rapides, des suivis de la conformité ou des conceptions « avant-après » (BA) ou « contrôle-impact » (CI) pourraient être nécessaires, par exemple lorsqu'un développement intense exclut un suivi approprié ou lorsque le calendrier du projet impose une collecte limitée de données de base (comme dans le cas d'interventions d'urgence).

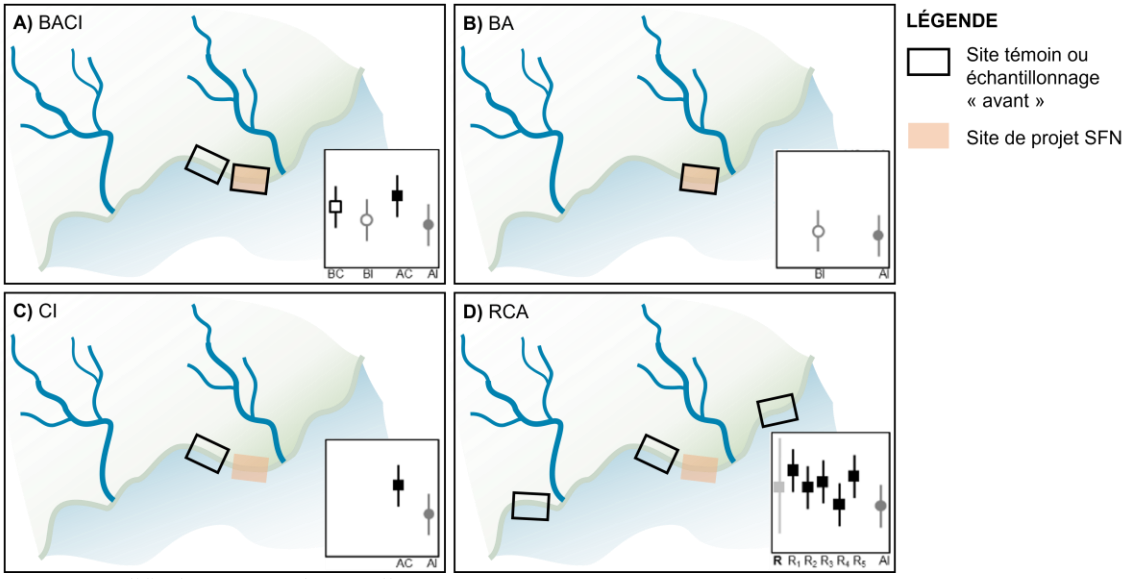
Les évaluations rapides sont utiles pour effectuer une étude préliminaire des conditions d'un site. La méthode de cette évaluation dépendra des objectifs du projet. L'objectif est d'enregistrer les observations sur le terrain afin d'avoir une compréhension plus approfondie que ce qui peut être réalisé en bureau, mais sans dépenser beaucoup de ressources sur un site qui pourrait ne pas être viable. Dans le cas d'un site viable, un suivi plus poussé serait alors nécessaire.

Le suivi de la conformité, qui peut comprendre le suivi de l'aménagement, les levés de l'ouvrage fini et une partie ou la totalité des protocoles de suivi à long terme, a lieu pendant la mise en œuvre du projet, comme indiqué dans le document intitulé *Suivi de l'efficacité*. Cette forme de suivi garantit la conformité aux plans de conception et aux exigences réglementaires, et éclaire toute modification à la conception ou mesure de gestion adaptative requise. Enfin, le suivi de la conformité peut servir de point de départ à un suivi à long terme.

Les méthodes BA et CI sont décrites ci-dessus comme faisant partie de la méthode BACI, mais il convient de noter que, lorsqu'elles sont utilisées individuellement, elles comportent des limites. Il est très difficile de déterminer dans quelle mesure les changements observés sont dus au « bruit de fond » naturel de l'environnement en évolution (qui devrait varier de plus en plus en raison des changements climatiques) ou à la mise en œuvre du projet.

La figure 3 illustre comment les modèles de suivi BACI, BA, CI et ACR peuvent être aménagés et l'analyse statistique abordée.

Figure 3 – Exemples d'analyses spatiales et statistiques pour les plans de suivi BACI, BA, CI et ACR.



Source : Modifié d'après Douglas et coll., 2019

Note : Les parcelles de données sont des données hypothétiques montrant comment comparer les sites témoins et de traitement ou les périodes d'échantillonnage. Les points gris représentent les sites de traitement et les points noirs, les sites témoins. Les points vides représentent les sites avant l'impact et les points pleins, les sites après l'impact.

2.3.4 Considérations méthodologiques générales

Quelle que soit la méthode de suivi retenue pour un projet, la qualité du concept expérimental et des techniques d'échantillonnage aura une incidence considérable sur les résultats. L'adage « à données inexactes, résultats erronés » s'applique également au concept expérimental et à l'échantillonnage sur le terrain. Si un certain degré d'erreur est inévitable (p. ex. : deux personnes différentes échantillonnant la même chose auront des techniques, des résultats ou des jugements légèrement différents), la pratique exemplaire veut que les erreurs potentielles soient cernées et que des moyens de réduire leur incidence à toutes les étapes du projet soient prévus. Par exemple, choisir la saison ou le moment où l'échantillonnage a lieu sans comprendre correctement le système pourrait entraîner un biais d'échantillonnage. Si l'échantillonnage d'une zone vise à déterminer la diversité des espèces et leur utilisation, et que l'échantillonnage coïncide avec la période de migration d'une espèce particulière de poisson, les résultats seront faussés. Ils montreront que l'espèce migratrice est la plus abondante à utiliser cette zone, alors qu'en réalité, une espèce résidente pourrait être la plus abondante sur l'ensemble de l'année. Cette dernière hypothèse sera vérifiée en procédant à l'échantillonnage plusieurs fois à cet endroit au cours de la campagne sur le terrain et sur plusieurs années.

Lors de la détermination du nombre de points d'échantillonnage, il pourrait être utile de faire une analyse de puissance (un calcul officiel qui indique le nombre d'échantillons requis pour détecter une différence statistiquement significative). Pour qu'elle soit statistiquement pertinente, cette analyse peut porter tant sur le nombre de répétitions d'un seul lieu d'échantillonnage au fil du temps que sur le nombre d'échantillons dans une zone (Brooks et coll., 2002). Dans le cas de vastes sites, il peut être utile d'utiliser des transects permanents (généralement espacés de façon régulière, sauf s'il est important de surveiller un élément d'intérêt), ou de diviser le site en zones d'habitat avec des transects ou des points d'échantillonnage aléatoires, selon la taille des zones. Chaque zone d'habitat doit compter suffisamment de points d'échantillonnage pour permettre l'analyse statistique des données. Or, dans de nombreux écosystèmes, les zones n'ont pas de limites claires, surtout vues du sol : il peut donc être difficile de les délimiter et d'en assurer le suivi. L'espacement, qu'il s'agisse d'emplacements aléatoires ou de transects, peut également poser des problèmes d'accès aux stations ou de sécurité lors du travail sur le terrain, ce qui doit être pris en compte durant l'aménagement des stations de suivi. D'autres considérations environnementales propres à une région (p. ex. : la neige et la glace en hiver) pourraient avoir une incidence sur l'accès ou augmenter le risque de perdre des équipements installés depuis longtemps.

La fréquence de la collecte des données est un autre élément important à prendre en compte lors de la conception d'un programme de suivi. De nombreux facteurs peuvent guider ce choix, mais les objectifs, le budget et les ressources du projet ainsi que le climat sont souvent les plus importants. En outre, l'ampleur et le taux de variation d'un indicateur de performance peuvent également être pris en considération. Par exemple, certains indicateurs de performance peuvent progresser lentement et à une ampleur qui réduit la capacité à détecter les changements de manière fiable (p. ex. : l'élévation dans un environnement de micromarées). D'autres indicateurs peuvent changer rapidement et radicalement (p. ex. : la position du rivage après une grosse tempête) et exigent donc une plus grande fréquence d'échantillonnage (voir la section 4.4 du document intitulé *Suivi de l'efficacité*). En outre, la fréquence de la collecte des données doit tenir compte de l'adéquation entre le travail requis pour collecter les données et l'information qu'elles peuvent fournir pour orienter la gestion adaptative.

Pour l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN), les SFN doivent nécessairement « relever les défis sociétaux de manière efficace et adaptative et bénéficier simultanément aux personnes et à la nature » [*traduction*] (Cohen-Shacham et coll., 2016, 19). Toutefois, les effets potentiels des SFN sur les résultats environnementaux, sociaux et économiques demeurent mal compris. En particulier, bien souvent, les effets socioéconomiques ne sont pas systématiquement évalués. C'est pourquoi il est essentiel d'intégrer des mesures et indicateurs de performance socioéconomiques dans les programmes de suivi. C'est également pourquoi l'inclusion d'équipes multidisciplinaires et multisectorielles dans le processus de conception et d'évaluation est si importante (Dumitru et coll., 2021). Le document intitulé *Suivi de l'efficacité* contient de plus amples renseignements sur les rôles et responsabilités en matière de suivi.

Après la sélection d'une approche de suivi (à l'étape de planification), les étapes suivantes consistent à déterminer les indicateurs de performance et les méthodes (aux étapes de planification et de conception). Le chapitre 3 présente les objectifs fondamentaux, les mesures de performance et les indicateurs de performance couramment utilisés dans les plans de suivi des SFN, en s'appuyant sur les sources identifiées à la section 1.4 et sur d'autres documents pertinents.

3 Indicateurs de performance et techniques de suivi

On choisit les indicateurs de performance d'un programme de suivi en fonction de leur relation avec le but primordial et les objectifs fondamentaux du projet (déterminés en collaboration avec les titulaires de droits et les parties prenantes) (Neckles et coll., 2015). Les objectifs fondamentaux se composent de mesures de performance (au cours de l'étape de planification du processus de suivi), qui indiquent comment atteindre ces objectifs. Ensemble, ces éléments déterminent quels indicateurs de performance sont appropriés pour atteindre les mesures.

Les solutions fondées sur la nature (SFN) pour les projets de gestion des risques d'inondation (GRI) reposent sur les conditions biophysiques et écologiques qui sont créées pour procurer des avantages en matière de GRI. Ainsi, de nombreux indicateurs de performance critiques pour les projets de GRI portant sur des systèmes écologiques (inhérents aux SFN) sont des facteurs de contrôle physiques ou des paramètres de réponse écologique (Neckles et Dionne, 2000; Neckles et coll., 2002). Les facteurs de contrôle physiques comprennent l'élévation, la morphologie, l'hydrodynamique, les caractéristiques du sol et l'hydrologie. Les paramètres biologiques comprennent les communautés végétales et l'utilisation par la faune. Les indicateurs de performance pour d'autres avantages connexes comprennent des paramètres sociaux, comme l'utilisation, l'esthétique et le mieux-être communautaire, et des mesures économiques, comme l'analyse coûts-avantages. Si les mesures de performance sont des objectifs mesurables, ce sont toutefois les indicateurs de performance qu'il faut mesurer et échantillonner pour déterminer si ces objectifs sont atteints.

Dans le cas d'un projet hypothétique de GRI qui porte sur la restauration de l'habitat de poissons (c.-à-d. un marais côtier) par le réalignement d'une digue gérée. Les objectifs fondamentaux pourraient être de : 1) restaurer la plaine inondable et la connectivité pour améliorer la gestion des inondations; 2) restaurer les processus côtiers pour améliorer la santé et la fonction écologiques du système; 3) maintenir la diversité biologique typique du type d'écosystème (viabilité). Ces trois objectifs fondamentaux se composent de mesures de performance, chacune comptant ses propres indicateurs de performance. Le tableau 1 illustre brièvement comment les objectifs fondamentaux de ce projet théorique de GRI portant sur la restauration de l'habitat de poissons éclairent les mesures et les indicateurs de performance potentiels.

Tableau 1 – Exemple d'objectifs fondamentaux décomposés en mesures de performance qui sont directement liées à des indicateurs de performance sélectionnés dans le plan de suivi

Objectifs fondamentaux	Mesures de performance	Indicateurs de performance
Atténuer les effets des tempêtes	Réduction de la zone inondable pour un événement donné	Niveau maximal d'inondation, durée de l'inondation (hydropériode), étendue ou zone maximale d'inondation, indice de danger, fréquence des inondations, caractéristiques des vagues, mesures de la morphologie de fond
	Réduction des effets des vagues dans les zones cibles	Atténuation des effets des vagues
	Réduction de l'exposition aux risques d'inondation pour un événement donné	Prévention des dommages matériels (infrastructures, habitations, entreprises)
Santé et fonctions écologiques	Restauration d'une hydrologie et d'un régime des marées naturels	Amplitude des marées, hydropériode, fréquence des inondations, salinité
	Restauration de la dynamique sédimentaire	Changement positif de l'élévation de la surface des marais, restauration des processus naturels (perturbations dues aux tempêtes et submersion)
	Amélioration de la qualité de l'eau	Salinité, température, pH et oxygène dissous concordant avec les données du site de référence
Maintenir la diversité biologique	Amélioration des communautés végétales naturelles des marais côtiers et expansion dans les hautes terres adjacentes	Proportion de couverture par espèce, augmentation de la superficie, abondance et densité des halophytes, comparaison avec le site de référence
	Augmentation ou maintien des communautés naturelles de poissons	Composition des communautés de poissons, abondance relative par espèce
	Optimisation de la production primaire de la végétation indigène	Composition, hauteur et densité des espèces

Les protocoles de suivi et d'évaluation comprennent une gamme d'indicateurs pour mesurer le succès de l'adaptation, y compris les adaptations fondées sur les écosystèmes (ou SFN), surtout en ce qui concerne les avantages et avantages connexes relatifs à la résilience (Rizvi et coll., 2014). En général, il existe deux types d'indicateurs : les indicateurs fondés sur les processus (c.-à-d. les indicateurs d'intrants et d'extrants) et les indicateurs fondés sur les performances (c.-à-d. la mesure des résultats et des effets) (Ritzi et coll., 2014). Les indicateurs fondés sur les performances sont également appelés indicateurs fondés sur les effets (ICLEI, 2022) ou indicateurs fondés sur les résultats (Pearce-Higgins et coll., 2022).

Les indicateurs fondés sur les processus servent à suivre ou à mesurer les progrès réalisés dans l'atteinte d'une cible ou d'un objectif particulier (ICLEI, 2022; Pearce-Higgins et coll., 2022). Ils permettent de suivre l'évolution et la mise en œuvre d'approches d'adaptation (Ritzi et coll., 2014). Ils peuvent être particulièrement utiles pour les horizons à court et à moyen terme en apportant de la flexibilité et en indiquant les besoins potentiels de gestion adaptative (ICLEI, 2022; Ritzi et coll., 2014).

Les indicateurs fondés sur les résultats (c.-à-d. fondés sur les effets ou les performances) servent à mesurer le succès ou l'efficacité des politiques, activités, projets et programmes d'adaptation (ICLEI, 2022; Ritzi et coll., 2014). Ils sont généralement utilisés sur des périodes plus longues, et le résultat ou le succès d'une mesure ne peut être évalué qu'une fois cette mesure mise en œuvre ou achevée. Par exemple, durant une tempête, un rivage vivant entièrement végétalisé qui parvient à réduire l'érosion ou à dissiper l'énergie des vagues représente un résultat positif pour un projet SFN. Cependant, pour de nombreux indicateurs écologiques ou environnementaux, il peut être difficile de cerner un indicateur de résultat. Certaines personnes définissent le succès comme la persistance des espèces, le fonctionnement des écosystèmes ou encore des services écosystémiques dans le contexte des changements climatiques (Pearce-Higgins et coll., 2022).

Les indicateurs fondés sur les processus et ceux fondés sur les résultats, les effets ou les performances ont en commun plusieurs des mêmes considérations de sélection que les objectifs fondamentaux et les indicateurs de performance présentés dans le présent document. Ces considérations comprennent les critères SMART (spécifiques, mesurables, atteignables, réalistes, temporellement définis), l'établissement de conditions de base et la fixation d'objectifs réalisables (Ritzi et coll., 2014; ICLEI, 2022).

3.1 Aperçu des catégories de performance

En général, les indicateurs de performance se répartissent en quatre catégories interconnectées; elles sont présentées dans le document intitulé *Avantages connexes* (extraites de Bridges et coll., 2021; Shiao, 2020) et énumérées ci-dessous :

- Gestion des risques d'inondation, ou GRI (section 2.2);
- Avantages connexes sur le plan environnemental (section 2.3);
- Avantages connexes sur le plan social (section 2.4);
- Avantages connexes sur le plan économique (section 2.5).

Ces quatre catégories sont dynamiques et interconnectées. Dans la pratique, de nombreux indicateurs de performance peuvent être associés à plus d'une catégorie, les objectifs du projet dictant à la fois la technique de mesure et l'interprétation des résultats. Un programme de suivi efficace et effectif comprend souvent des indicateurs qui ont une double fonction. Ils permettent d'évaluer les progrès réalisés dans l'atteinte de plusieurs objectifs, à l'aide d'une seule mesure. Le tableau 2 résume les mesures de performance potentielles, qui sont communément adoptées pour de nombreux programmes de suivi en Amérique du Nord, organisées à la fois en fonction de l'écosystème (type de rivage) et de la catégorie de performance. Des mesures de performance potentielles (c.-à-d. des objectifs propres au projet) sont déterminées pour chaque catégorie de performance. Par exemple, les éléments structuraux peuvent faire l'objet de mesures pour toutes les SFN abordées afin de déterminer leur stabilité (et parfois, confirmer la conformité au permis) en tant que mesure de GRI; pour leur part, la superficie et la couverture végétales (composante potentielle d'une SFN) permettent de déterminer la valeur de l'habitat sur le plan environnemental.

Les sections ci-dessous abordent les mesures et indicateurs de base (c.-à-d. primaires ou nécessaires) et complémentaires (c.-à-d. secondaires ou optionnels) qu'il faut prendre en compte pour aborder chacune des quatre catégories susmentionnées. **Les mesures et indicateurs de base sont considérés comme les plus critiques dans la majorité des types de SFN, et réalisables dans toutes sortes de contextes. Des indicateurs complémentaires peuvent être inclus pour satisfaire aux objectifs propres au projet.** Les indicateurs complémentaires sont également recommandés pour les sites plus complexes, ceux où la SFN en question n'a pas été largement employée dans cet environnement auparavant, ou pour éclairer toute mise en œuvre d'une SFN ou toute recherche sur une SFN dans l'avenir.

Les sections ci-dessous abordent les types de techniques qui peuvent être utilisées pour mesurer les indicateurs de performance sur le plan quantitatif ou qualitatif. Toute mesure qui s'applique à plus de la moitié de l'écosystème visé sera classée comme une mesure de base dans la section 3.2, bien qu'il soit possible de l'omettre dans le cas de sites ou de rivages où elle n'est pas essentielle ou pas applicable. En outre, il se peut que des indicateurs de performance (p. ex. : l'élévation de la surface) soient associés à plusieurs mesures de performance différentes. Par conséquent, il peut arriver que des indicateurs de performance soient classés à la fois comme des indicateurs de base et complémentaires.

Les techniques en question sont des versions modifiées de celles issues d'un atelier de la *National Wildlife Federation* (Fédération nationale de la faune) tenu en 2017 (MARCO, 2017), qui a établi un cadre de suivi exhaustif fondé sur la science participative pour les éléments naturels et fondés sur la nature. Ces techniques sont divisées en méthodes pour spécialistes, ou en méthodes pour la science participative (qui sont aussi applicables dans des communautés aux ressources limitées). Il faut cependant reconnaître que les deux méthodes présentent des différences considérables en matière de difficulté et exigent différents niveaux de connaissances, de financement et de ressources. Les méthodes de science participative se servent souvent d'approximations plutôt que de mesures directes et nécessitent généralement un renforcement des capacités et une formation afin d'en exploiter tout le potentiel. Ces méthodes peuvent aussi être jumelées à des technologies à haute résolution pour qu'elles soient plus précises. Par exemple, les membres de la collectivité peuvent photographier une zone inondée et fournir un repère temporaire de l'étendue de l'inondation. Ce repère peut ensuite faire l'objet d'un levé à l'aide d'un système de positionnement géospatial (GPS) de haute précision après le retrait des eaux, puis être saisi dans un logiciel de cartographie afin de délimiter et de calculer avec précision la zone inondée. Ces techniques s'appuient également sur les conclusions de la série d'ateliers intersectoriels sur les SFN organisés par DHI au nom de la CCE, au printemps 2022, et sur le document intitulé *Avantages connexes*. Un examen exhaustif des méthodes de suivi réalisé par Kumar et coll. (2021) a permis d'obtenir des matériels complémentaires. Pour certains indicateurs, il n'existe actuellement aucune technique de science participative connue, un manquement que de futurs travaux devraient prendre en compte.

Tableau 2 – Mesures de performance classées par catégorie de performance et objectifs de projet pour différents types de SFN (✓ mesure de base; ? mesure complémentaire; – sans objet)

Catégorie de performance	Objectifs fondamentaux du projet	Mesure de performance	Éléments submergés	Zones humides et estrans	Forêts côtières et zones boisées	Plages et dunes	Îles	Éléments hybrides
Gestion des risques d'inondation	Réduire les effets des tempêtes	Réduction de la zone inondable pour un événement donné	–	✓	✓	✓	✓	✓
		Réduction des effets des vagues dans une zone cible	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		Réduction de l'exposition aux risques d'inondation pour un événement donné	–	✓	✓	✓	✓	✓
	Maintenir l'intégrité et la performance structurale	Maintien de la stabilité des éléments structuraux	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Améliorer la résilience du système	Plus grande résilience des infrastructures ou des mesures d'urgence en cas de défaillance	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Plan environnemental	Améliorer la valeur de l'habitat	Rétablissement d'un régime hydrologique plus naturel	–	✓	✓	✓	–	✓
		Amélioration ou maintien des caractéristiques vitales et de la connectivité de l'habitat au sein d'un site	✓	?	?	✓	✓	✓
		Amélioration de la biodiversité et de l'utilisation de l'habitat	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		Amélioration de la connectivité de l'habitat avec les habitats adjacents	?	?	?	?	?	?
		Amélioration de la résilience de l'écosystème	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Catégorie de performance	Objectifs fondamentaux du projet	Mesure de performance	Éléments submergés	Zones humides et estrans	Forêts côtières et zones boisées	Plages et dunes	Îles	Éléments hybrides
		Productivité du sol	?	?	?	?	?	?
	Atténuer les effets des changements climatiques et séquestrer le carbone	Réduction de la pollution	−	?	?	−	−	−
		Réduction des émissions de carbone	?	?	?	?	?	?
		Séquestration de carbone	✓	✓	✓	?	✓	✓
		Capacité tampon (composition chimique de l'eau)	?	?	−	−	?	?
		Régulation du microclimat	−	?	?	?	?	?
	Améliorer la qualité des eaux de surface et des eaux souterraines	Réduction de la charge sédimentaire	✓	✓	?	?	?	?
		Réduction des nutriments	✓	?	?	−	?	?
		Alimentation et réserve de la nappe souterraine	−	?	?	?	?	?
		Habitat aquatique approprié	✓	✓	?	?	?	?
		Élimination des toxines et des agents pathogènes	?	?	?	−	?	?
Plan social	Améliorer la santé et le mieux-être	Plus grande sécurité et tranquillité d'esprit	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		Connectivité avec les espaces verts et les systèmes naturels	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		Réduction du bruit	−	?	?	?	?	?
		Sécurité alimentaire	?	?	?	−	?	?

Catégorie de performance	Objectifs fondamentaux du projet	Mesure de performance	Éléments submergés	Zones humides et estrans	Forêts côtières et zones boisées	Plages et dunes	Îles	Éléments hybrides
	Équité et justice	Inclusion et équité	?	?	✓	✓	✓	✓
		Réduction de la pauvreté	?	?	✓	✓	✓	✓
	Esthétique et intendance de l'environnement	Améliorations esthétiques	?	?	✓	✓	✓	✓
		Renforcement de l'engagement communautaire et de l'intendance de l'environnement	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		Perception du public favorable au projet	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Alignement sur le patrimoine et les valeurs culturelles et religieuses	Espaces culturels, religieux ou spirituels	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		Amélioration de la participation et de l'intendance de la part des peuples autochtones ou de groupes marginalisés	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		Recherche de nourriture, cueillette et utilisations traditionnelles	✓	✓	✓	?	✓	✓
		Restauration des utilisations historiques	?	?	?	?	?	?
	Utilisation récréative et éducation	Espaces de loisirs et de rassemblement plus vastes	–	?	?	✓	✓	?
		Occasions d'éducation ou d'étude scientifique	?	?	?	?	?	?
	Avantages complémentaires – adaptation aux changements climatiques et leur atténuation	Adaptation à la mauvaise qualité de l'air ou atténuation de celle-ci	–	✓	✓	–	–	–
		Adaptation aux chaleurs extrêmes ou atténuation de celles-ci	–	✓	✓	–	–	–

Catégorie de performance	Objectifs fondamentaux du projet	Mesure de performance	Éléments submergés	Zones humides et estrans	Forêts côtières et zones boisées	Plages et dunes	Îles	Éléments hybrides
Plan économique	Avantages pécuniaires	Réduction des coûts en capital	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		Réduction des coûts d'entretien et d'exploitation	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		Réduction des coûts pour infrastructures adjacentes (évitement de pertes dues aux inondations)	?	?	?	?	?	?
		Baisse des primes d'assurance contre les inondations	?	?	?	?	?	?
		Augmentation de l'évaluation foncière/ valeur de la propriété	?	?	?	?	?	?
		Augmentation des recettes fiscales	?	?	?	?	?	?
	Effets positifs sur l'économie et les communautés locales	Amélioration des moyens de subsistance dans les secteurs de la pêche, de l'agriculture ou de l'artisanat	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		Possibilités d'emplois locaux	?	?	?	?	?	?
		Possibilités d'écotourisme	?	?	?	?	?	?
		Baisse du coût de la vie	?	?	?	?	?	?
		Diminution des conséquences d'inondations pour les communautés	✓	✓	✓	✓	✓	✓

3.2 Indicateurs et techniques de gestion des risques d'inondation

La GRI est une préoccupation majeure pour les zones urbaines et périurbaines côtières, surtout si l'on tient compte de l'élévation du niveau de la mer provoquée par les changements climatiques. Dans le cadre de l'évaluation de la performance des SFN aux fins de la GRI, les indicateurs sélectionnés doivent permettre de mesurer l'efficacité de la solution pour réduire le risque d'inondation (performance du système) ainsi que l'état physique de la structure au fil du temps (performance de la structure) (Science and Resilience Institute, 2020; Bridges et coll., 2021).

3.2.1 Mesures de performance de base

Le tableau 2 décrit les objectifs fondamentaux des mesures de performance GRI. Ces objectifs sont les suivants : 1) réduire les effets des tempêtes, 2) maintenir l'intégrité et la performance structurales; 3) améliorer la résilience du système. Les mesures de performance de base pour atteindre ces trois objectifs fondamentaux (énumérées dans le tableau 3) sont les suivantes :

- Réduction de la zone inondable pour un événement donné;
- Réduction de l'exposition aux risques d'inondation pour un événement donné;
- Réduction des effets des vagues dans les zones cibles;
- Maintien de la stabilité des éléments structuraux;
- Plus grande résilience des infrastructures ou des mesures d'urgence en cas de défaillance.

Le tableau 3 présente des indicateurs de performance, soit les facteurs à mesurer et à suivre pour confirmer l'atteinte des mesures de base ci-dessus, ainsi que les techniques de mesure potentielles. Ces indicateurs comprennent :

- Niveau maximal des crues et profondeur maximale de l'eau;
- Étendue ou zone maximale de l'inondation;
- Hydropériode (durée de l'inondation);
- Indice de danger (profondeur-vitesse);
- Fréquence des inondations;
- Caractéristiques des vagues;
- Mesures de la morphologie de fond;
- Dommages évités aux biens (infrastructures, habitations, entreprises);
- Atténuation des vagues;
- Élévation et localisation des éléments (levé);
- Mesures (dimensions) des éléments;
- Intégrité structurale des matériaux;
- Caractéristiques des sédiments.

La profondeur de l'eau ou le niveau des crues ainsi que l'étendue et la durée des inondations sont des facteurs essentiels pour comprendre le littoral et les conséquences des inondations et des ondes de tempête. La laisse de haute mer ordinaire et le niveau moyen des eaux sont des éléments essentiels de processus côtiers, comme l'érosion et la distribution des composants biotiques, notamment la végétation et les poissons. De nombreux protocoles d'évaluation des risques d'inondation s'appuient également sur la laisse de haute mer (LHM), la pleine mer supérieure, grande marée, les prévisions d'ondes de tempête et la montée ou le déferlement des vagues. Ces indicateurs sont donc essentiels pour la plupart des projets de GRI. Il y a néanmoins des exceptions, par exemple la « réduction des effets des vagues », qui pourrait ne pas être cruciale ou envisageable pour tous les projets (p. ex. :

ceux qui visent à créer des plaines inondables dans les parties supérieures d'un estuaire), mais qui est une mesure de base pour beaucoup d'autres indicateurs. En plus des caractéristiques des vagues, il pourrait également importer de mesurer l'atténuation des vagues lorsque la dissipation de l'énergie ou le contrôle de l'érosion figure comme objectif primaire. Il est possible de déduire les effets des vagues en mesurant leur hauteur : directement, en mesurant le volume de débordement ou par surveillance vidéo; ou indirectement, par l'évaluation des dommages ou d'autres indicateurs appropriés.

La réduction de l'exposition des biens (infrastructures, habitations, entreprises, etc.) aux risques d'inondation et de tempête constitue une mesure de base cruciale. Des indicateurs, comme le nombre de biens non endommagés après une tempête grâce à la mise en œuvre de la SFN, doivent être considérés comme des indicateurs de base. Ils peuvent être facilement mesurés à l'aide de données pré- et post-tempête (p. ex. : imagerie aérienne, levés topographiques, cartographie municipale). D'autres indicateurs peuvent être considérés, comme les pertes de vies humaines, l'incidence sur l'accès aux services et les conséquences sur la qualité de vie, comme des indicateurs complémentaires. Il est également possible de combiner certains indicateurs pour créer des indices de danger complémentaires. Par exemple, les matrices profondeur-vitesse servent couramment à indiquer des niveaux croissants de risque d'inondation, et elles peuvent être adaptées ou modifiées pour tenir compte des différences dans le risque (p. ex. : le risque pour un adulte par rapport à un enfant).

Les indicateurs de base relatifs aux éléments structuraux et de stabilisation du littoral de la SFN (voir ci-dessus) comprennent l'élévation ou la position de la SFN, les dimensions de la SFN et de ses composantes, l'intégrité structurale, les caractéristiques des sédiments et le taux d'évolution du rivage. Ces indicateurs permettent d'établir les conditions initiales de la SFN et de suivre sa résilience dans le temps. La direction et l'ampleur des changements dépendent fortement du type de SFN mis en œuvre. Par exemple, le changement d'élévation devrait être positif pour les structures où l'on s'attend à une accrétion de sédiments (p. ex. : zones humides et îles), et conforme aux modèles prévus si l'on s'attend à une perte au fil du temps (p. ex. : plages où une recharge en sable est prévue). De plus, le suivi des éléments structuraux est important pour les décisions de gestion adaptative, avec l'espoir que les dimensions resteront stables, diminueront à un rythme prévu (p. ex. : détérioration des éléments d'infrastructure grise) ou s'amélioreront avec le temps (p. ex. : développement des éléments d'infrastructure verte).

Tableau 3 – Mesures de performance GRI de base avec indicateurs de performance correspondants et techniques de suivi proposées

Mesure de performance	Indicateur de performance	Techniques	
		Techniques pour spécialistes	Techniques pour membres de la collectivité
Réduction de la zone inondable pour un événement donné	Niveau maximal des crues et profondeur maximale de l'eau	Consignation des niveaux des eaux (HOBO, YSI)	Appli pour téléphone intelligent Entretiens avec la communauté et mémoires générationnelles Mire parlante pour mesurer le niveau des eaux et LHM consignés manuellement
	Étendue ou zone maximale de l'inondation	Zone de marais et porosité	Évaluation de la zone de marais Entretiens avec la communauté et mémoires générationnelles
		Imagerie aérienne ou cinématique en temps réel (RTK) (LHM/laisse de crue)	Photos géolocalisées prises avec un téléphone cellulaire

Mesure de performance	**Indicateur de performance**	**Techniques**	
		Techniques pour spécialistes	**Techniques pour membres de la collectivité**
	Hydropériode (durée de l'inondation)	Enregistrement du niveau des eaux et système d'information géographique (SIG)	Observation des LHM ordinaires et de la durée des inondations
		Volume d'eau (modèle de changement hydrodynamique)	Photos géolocalisées prises avec un téléphone cellulaire
	Fréquence des inondations	Enregistrement du niveau des eaux à long terme	Limnigraphe (mire parlante – enregistrement manuel ou enregistreur à bande)
		Réalisation répétée de levés RTK des laisses de crue	Entretiens avec la communauté et mémoires générationnelles
		Prise répétée d'images satellite à haute résolution (p. ex. : Sentinel)	Photos géolocalisées prises avec un téléphone cellulaire
	Caractéristiques des vagues	Bouées météorologiques et océanographiques de mesure des vagues, profileur de courant à effet Doppler (ADCP)	Soumissions au *Local Environmental Observer* (LEO, observateur local de l'environnement)
		Capteurs de pression des vagues	Observation (p. ex. : vidéos) du trafic maritime et des tempêtes, mesures du fetch sur Google Earth, observation visuelle ou automatisée des échelles limnimétriques verticales sur des cordes teintes, preuves anecdotiques fournies par des pêcheurs sportifs ou des plaisanciers
	Indice de danger (profondeur-vitesse)	Profileur de courant (ADCP, vélocimètre acoustique Doppler)	Débits avec dissolution
		Volume d'eau (modèle de changement hydrodynamique)	Vidéo à intervalles
		Enregistrement du niveau des eaux	Limnigraphe (mire parlante – enregistrement manuel ou enregistreur à bande)
	Mesures de la morphologie de fond	Sonar latéral – morphologie de fond	s.o.
Réduction des effets des vagues dans les zones cibles	Atténuation des vagues	Modèles de hauteur de vague	Mouvement des matériaux de substitution
		Capteurs de pression en réseau (ADCP ou enregistreurs de vagues)	
		Montée des vagues	
Réduction de l'exposition aux risques d'inondation pour un événement donné	Prévention des dommages matériels (infrastructures, habitations, entreprises)	Proportion de réduction des dommages matériels (bâtiments, infrastructures) attribuée aux caractéristiques naturelles et fondées sur la nature	Comparaison d'images Google Earth et Google Street View et de données en libre accès (p. ex. : OpenStreetMap)

Mesure de performance	**Indicateur de performance**	**Techniques**	
		Techniques pour spécialistes	**Techniques pour membres de la collectivité**
Maintien de la stabilité des éléments structuraux	Élévation et localisation des éléments (levés)	GPS RTK; modèle numérique d'élévation (MNE) dérivé de données de détection et de télémétrie par la lumière (lidar)	Photo aérienne par drone uniquement, sans points de contrôle
		Documents sur l'état des travaux finis	
		Drones aériens avec points de contrôle	
		Bathymétrie/sonar latéral	Photos géolocalisées prises lors de promenades en kayak ou de randonnées
	Mesures (dimensions) des éléments	Imagerie aérienne	Photographies en plan large
		Photogrammétrie des éléments	Photographies avant et après la tempête
			Position par rapport à la pleine mer moyenne ou à la basse mer moyenne
			Position par rapport à un élément naturel existant
			Distance d'arrimage (mesure la distance jusqu'aux repères fixes)
			Distance par rapport à l'emplacement initial
			Structures GPS fondées sur les plans des travaux finis
			Accumulation d'eau
			Mesure de la distance tampon ou des distances de recul
Amélioration de la résilience des infrastructures ou des mesures d'urgence en cas de défaillance	Intégrité structurale des matériaux	Levés d'étude – niveau laser	Photographies de la structure ou de la ligne de balanes
			Taille, poids, longueur, volume
			Intégrité relative (éléments manquants, proportion d'éléments manquants, perte de sol, débordement)
		Photogrammétrie	Levés par quadrat
	Mesures (dimensions) des éléments	RTK ou balayage laser de la structure	Mesure de la taille des matériaux
			Observation de l'état des matériaux
		Imagerie aérienne	Évaluation visuelle des dommages
	Caractéristiques des sédiments	Taille des particules de sédiments (compteur de Coulter ou diffraction laser)	Analyse de la texture des sédiments
			Taille des roches/granulométrie
			Taille, poids, longueur, volume

Source : adapté de MARCO, 2017

3.2.2 Mesures de performance complémentaires

D'autres indicateurs relatifs à la GRI pourraient être importants, selon la nature du projet SFN. Pour atteindre les trois objectifs fondamentaux susmentionnés, il convient de prendre en considération les mesures complémentaires suivantes (énumérées dans le tableau 4) :

- Réduction de l'exposition aux risques d'inondation pour un événement donné;
- Réduction de l'érosion;
- Amélioration de la gestion des sédiments (approvisionnement et rétention).

Le tableau 4 présente les indicateurs de performance, soit les facteurs à mesurer et à suivre pour confirmer l'atteinte des mesures de base, ainsi que leurs techniques de mesure potentielles. Ces indicateurs comprennent :

- Pertes de vies humaines;
- Incidence sur l'accès aux services;
- Conséquences sur la qualité de vie;
- Vitesse ou débit;
- Mesures de la morphologie de fond;
- Taux d'évolution de la position du rivage dans le temps;
- Changements d'élévation au fil du temps;
- Caractéristiques supplémentaires des sédiments.

La sélection d'indicateurs de performance complémentaires (tableau 4) dépend du type de SFN mise en œuvre, des objectifs du projet et de la disponibilité des ressources (instruments et personnel compétent). La réduction des pertes de vies humaines, l'incidence sur l'accès aux services et les conséquences sur la qualité de vie sont également des indicateurs relatifs à la réduction de l'exposition aux risques d'inondation. Il peut être plus difficile d'attribuer directement ces indicateurs à la SFN mise en œuvre. Le suivi peut comprendre l'utilisation répétée de techniques d'enquête communautaire, la comparaison des statistiques de l'état civil des services de santé ou des comptes rendus des médias. Les systèmes d'information géographique (SIG) peuvent servir à repérer les routes inondées et à mesurer la longueur inondée et la durée des inondations qui affectent l'accès aux services essentiels.

Les indicateurs qui portent sur les objectifs de réduction des ondes de tempête et d'inondations, comme les mesures de débit, de vitesse et de morphologie de fond dans les zones intertidales ou littorales, pourraient exiger des techniques plus intensives et sont particulièrement importants pour les projets complexes ou de grande envergure. Le taux d'évolution du rivage peut être mesuré à court ou à long terme selon l'objectif du projet. Les indicateurs peuvent être évalués directement, à l'aide d'équipements *in situ* et de méthodes de modélisation; ou indirectement, en surveillant les structures qui servent à réduire l'énergie, dont la morphologie de fond (bathymétrie).

Les indicateurs de prévention de l'érosion au-delà des mesures nommées ci-dessus pourraient inclure des méthodes spécialisées ou complexes de mesure du changement d'élévation et des caractéristiques supplémentaires des sédiments, comme la masse volumique apparente, la granulométrie et la portance. Ces caractéristiques sont importantes pour la stabilité du littoral comme pour la capacité des composantes biotiques à s'établir et à proliférer.

Tableau 4 – Mesures de performance complémentaires de la GRI avec indicateurs de performance correspondants et techniques de suivi proposées

Mesure de performance	Indicateur de performance	Techniques	
		Techniques pour spécialistes	**Techniques pour membres de la collectivité**
Réduction de l'exposition aux risques d'inondation pour un événement donné	Pertes de vies humaines	Statistiques de l'état civil, d'organismes communautaires ou de santé publique	Notices nécrologiques, statistiques de l'état civil, rapports des médias
	Incidence sur l'accès aux services	Analyse SIG des routes inondées et des différences dans les temps d'attente pour accéder aux services essentiels, rapports communautaires, statistiques sur l'accès aux services (p. ex. : visites à l'hôpital, etc.), sondages avant et après, enquêtes d'opinion, groupes de discussion	Comptes rendus des médias, médias sociaux, comptes rendus visuels des routes inondées
	Conséquences sur la qualité de vie	Sondages avant et après auprès des ménages, enquêtes communautaires, groupes de discussion	Médias sociaux, entretiens avec la communauté
Réduction de la zone inondable pour un événement donné	Mesures de la morphologie de fond – dimensions et mouvement	Sonar latéral – morphologie de fond	Photos géolocalisées prises avec un téléphone cellulaire, avec un objet inclus dans la photo pour l'échelle (p. ex. : une règle ou un carnet)
		Levés aériens à basse altitude – topographie 3D	
Réduction de l'érosion	Taux d'évolution de la position du rivage dans le temps	GPS RTK	Station de mesure de l'érosion côtière – mesures répétées de la distance entre deux repères perpendiculaires au rivage (pour garder une ligne droite) et le rivage ou le bord du marais
		Imagerie aérienne, SIG	Google Earth
		Levés d'étude	S.o.
		Levé par drone (mesure de l'évolution d'éléments dans le temps et l'espace)	Soumission/transmission de photos à intervalle et géolocalisées prises avec un téléphone
Amélioration de la gestion des sédiments (approvisionnement et rétention)	Changements d'élévation au fil du temps	MNE, profil d'élévation le long du transect (GPS RTK), modèles de transport des sédiments	Niveau laser par rapport au repère
			Vidéos ou images de drones à usage récréatif
		Appareil de mesure de l'élévation des sédiments (SET)	Horizons argileux feldspathiques

Mesure de performance	Indicateur de performance	Techniques	
		Techniques pour spécialistes	**Techniques pour membres de la collectivité**
		Photographies	Photographies (avant et après la tempête)
		Horizons repères	Mire et tachéomètre
			Horizons feldspathiques (mesure l'accrétion des sédiments)
			Repère permanent (p. ex. : tige d'acier)
			Application mobile ou Web recueillant les données GPS du téléphone
		Levé topographique par drone (3D), lidar, bathymétrie dérivée de données satellites	Vidéos ou images de drones à usage récréatif
		Sonar de surface pour levés à proximité du rivage	Mouvement de la surface sédimentaire par rapport au repère permanent
	Caractéristiques supplémentaires des sédiments	Masse volumique apparente	Remplissage de récipients au volume connu
		Portance (stabilité)	
		Sonar latéral – type de grain (p. ex. : lidar)	
		Levé GPS RTK	

Source : adapté de MARCO, 2017

3.3 Indicateurs et techniques sur le plan environnemental

3.3.1 Mesures de performance de base

Le tableau 2 décrit les objectifs fondamentaux des avantages connexes sur le plan environnemental. Ces objectifs sont les suivants : 1) améliorer la valeur de l'habitat; 2) atténuer les changements climatiques et séquestrer le carbone; 3) améliorer la qualité des eaux de surface et des eaux souterraines. Les mesures de performance de base (énumérées dans le tableau 5) pour atteindre ces trois objectifs fondamentaux sont les suivantes :

- Rétablissement d'un régime hydrologique plus naturel;
- Amélioration ou maintien des caractéristiques vitales et de la connectivité de l'habitat au sein d'un site;
- Amélioration de la biodiversité et de l'utilisation de l'habitat (flore et faune);
- Amélioration de la résilience de l'écosystème;
- Séquestration de carbone.

Le tableau 5 présente des indicateurs de performance, ainsi que leurs techniques de mesure potentielles, et comprend :

- Niveau des eaux;
- Étendue de l'inondation;
- Hydropériode (taux, fréquence et durée moyenne des inondations);
- Dimensions et géolocalisation des éléments clés de l'habitat (dunes, récifs, herbiers de zostères, etc.);
- Proportion de couverture de la flore et diversité/composition des espèces;
- Proportion de couverture des taxons sessiles;
- Santé de la flore et de la faune (état et survie);
- Taux de persistance et de récupération après une tempête;
- Abondance ou densité des espèces indicatrices;
- Densité ou hauteur des plantes;
- Stocks de carbone;
- Accumulation nette de carbone dans la biomasse;
- Accumulation nette de carbone dans le sol.

Les littoraux se définissent par leur interface eau-sol, donc les variables hydrologiques sont d'importants indicateurs environnementaux. L'élévation et la position relative d'éléments terrestres ou submergés peuvent être un important indicateur de succès de projets dans le cadre desquels les élévations ont été augmentées pour créer des habitats ou améliorer la protection côtière (tableaux 3 et 5); la superficie des terres à une certaine élévation ou au-dessus de celle-ci est également une mesure utile de la performance d'une SFN (tableau 3) (Wijsman et coll., 2021). La profondeur de l'eau ainsi que l'ampleur, la fréquence et la durée des inondations sont des indicateurs hydrologiques pertinents tant pour la GRI que pour les aspects écologiques des projets SFN.

Le suivi des changements d'élévation au fil du temps est crucial pour la santé écologique de la plupart des projets SFN en zones côtières (Wijsman et coll., 2021). En effet, l'élévation détermine les composantes biotiques et les habitats susceptibles d'occuper la zone. Étant donné l'évolution rapide des littoraux à cause des changements, une vérification visuelle de l'érosion ou des changements dans les modèles d'écoulement pourrait être particulièrement importante au cours des premières étapes du projet, afin d'éclairer la gestion adaptative. Le choix d'une technique de suivi dépend à la fois de la fréquence du suivi et de l'ampleur du changement. Le suivi annuel des profils d'élévation à l'aide de données de levés, de données lidar ou d'autres modèles d'élévation est une composante courante du suivi des SFN dans les zones côtières (tableau 5). Par ailleurs, les processus de transport et d'accumulation des sédiments sont liés aux changements d'élévation. Le suivi du mouvement des sédiments peut se faire par des observations visuelles ou par le calcul du changement volumétrique (c.-à-d. le MNE différentiel) dérivé de données lidar ou d'autres modèles d'élévation au fil du temps. Dans le cadre de projets à forte accumulation de sédiments, l'accrétion peut être mesurée directement à l'aide d'horizons repères et d'appareils de mesure de l'élévation des sédiments (tableau 5), qui permettent de différencier les processus de surface et souterrains et de détecter les changements à une résolution plus précise (mm à cm) qu'avec les autres techniques. Ces techniques sont généralement répétées annuellement durant les étapes liminaires d'élaboration d'un projet SFN.

La végétation est un autre indicateur de performance fondamental pour de nombreuses fonctions écologiques clés dans les projets SFN (tableau 2). En effet, les plantes sont un élément important de la protection du littoral, de la résilience et de la protection contre l'érosion. La couverture végétale et l'abondance des plantes servent d'indicateurs du succès global des SFN axées sur les plantes. La couverture représente simplement la surface couverte par tout type de végétation (Wijsman et coll., 2021), généralement exprimée en proportion. Des proportions élevées de couverture végétale indiquent souvent d'importantes fonctions, telles que la stabilité du substrat et la réduction des taux d'érosion. La plus simple mesure d'abondance des espèces est une valeur de couverture (proportion)

pour chaque espèce ou pour un sous-ensemble d'espèces dominantes ou considérables. Il est important de déterminer l'abondance et la diversité relatives des différentes espèces végétales, y compris des espèces envahissantes, qui peuvent avoir un effet négatif durable sur les systèmes. Les inventaires de végétation permettent d'identifier les espèces au sein d'un système.

Un inventaire exhaustif d'espèces végétales se fait en relevant toutes les espèces végétales présentes sur le site ou toutes les espèces présentes dans les parcelles ou les transects échantillonnés. Il est alors possible de calculer au moyen d'un tel inventaire la richesse spécifique (nombre d'espèces détectées dans chaque zone) ou d'autres paramètres de la biodiversité. Selon le contexte du site, une synthèse des données d'abondance des plantes en catégories fonctionnelles d'espèces aidera l'évaluation des indicateurs d'état du site ou d'intégrité écologique (p. ex. : les halophytes, soit des plantes tolérantes au sel, peuvent être des indicateurs clés du rétablissement de la végétation des marais salins). En outre, les relevés de la flore et de la faune avant et après une tempête (persistance, survie, rétablissement) et la santé au fil du temps peuvent agir comme indicateurs de la résilience de l'écosystème.

Comme les indicateurs de végétation changent avec le temps, en particulier dans un site récemment restauré, les suivis répétés deviennent extrêmement importants. La plupart des programmes prévoient un suivi annuel de la végétation; dans le cas de projets SFN où la création d'habitats est une priorité, les programmes de suivi comprennent souvent des comparaisons avec un ou plusieurs sites de référence (Graham et coll., 2021). Ces comparaisons permettent d'évaluer dans quelle mesure les différents indicateurs d'habitats créés ou restaurés dans le cadre de la SFN correspondent à ceux de sites naturels de référence.

Pour les projets SFN comportant des habitats submergés, comme des récifs d'huîtres ou herbiers de zostères, les indicateurs de couverture, d'abondance relative des espèces et de richesse d'organismes sessiles submergés sont également souvent utiles et suivent des protocoles semblables à ceux utilisés pour la végétation. Ils peuvent également être divisés en différents groupes fonctionnels susceptibles d'indiquer la performance des SFN (p. ex. : couverture de filtreurs). De même, la couverture relative des différents types de substrats peut être importante dans les zones submergées et terrestres : le suivi du varech, des débris, du béton ou d'autres couvertures de surface pourrait être pertinent en fonction du contexte régional de la SFN (Wijsman et coll., 2021).

Les SFN en zones côtières, en particulier celles qui comprennent la création de zones humides, peuvent favoriser la séquestration et le stockage du carbone bleu. Dans les cas où les évaluations du carbone bleu importent, les principales mesures de performance pourraient inclure la densité de carbone organique (par unité de surface) et le taux d'accumulation (par surface, par année) (Howard et coll., 2014). Les principaux indicateurs de performance pourraient comprendre les stocks de carbone (une évaluation de la quantité de carbone que retient actuellement l'écosystème) de même que les taux de séquestration (une mesure du taux d'accumulation du carbone provenant de l'atmosphère ou d'autres sources) (tableau 5) (Howard et coll., 2014). Pour évaluer pleinement le rôle des SFN dans la dynamique du carbone, il est important de quantifier les quantités nettes de carbone ou d'équivalents en dioxyde de carbone (CO_2), car le bilan global du carbone ou des gaz à effet de serre doit tenir compte des pertes dues à la décomposition ou à l'érosion. Dans les habitats où dominent les plantes herbacées, on cible plutôt les stocks de carbone souterrains et les taux d'accumulation, car la biomasse aérienne ne représente pas un puits de carbone stable, étant donné qu'elle est remplacée chaque année. Toutefois, dans les habitats comportant des plantes ligneuses (p. ex. : marais à mangroves ou zones arbustives côtières), il est important d'évaluer les stocks de carbone de surface et souterrains (tableau 5).

Tableau 5 – Mesures de performance de base sur le plan environnemental avec indicateurs de performance correspondants et techniques de suivi proposées

Mesure de performance	Indicateur de performance	Techniques	
		Techniques pour spécialistes	**Techniques pour membres de la collectivité**
Rétablissement d'un régime hydrologique plus naturel	Niveau des eaux	Consignation du niveau des eaux	Application pour téléphone intelligent
	Étendue de l'inondation	Zone de marais et porosité	Évaluation de la zone de marais
		Imagerie aérienne ou GPS RTK (LHM/laisse de crue)	Photos géolocalisées prises avec un téléphone cellulaire
	Hydropériode (taux, fréquence et durée moyenne des inondations)	Volume d'eau (modèle de changement hydrodynamique)	Observation des LHM
		Consignation du niveau des eaux et SIG	Photos géolocalisées prises avec un téléphone cellulaire
Amélioration ou maintien des caractéristiques vitales et de la connectivité de l'habitat au sein d'un site	Dimensions, géolocalisation et élévation des éléments clés de l'habitat (et changement d'élévation en raison de la sédimentation; couverture par des débris)	Levé aérien géolocalisé (drone)	Mesure de la hauteur, de la longueur, de la largeur et de l'inclinaison des éléments à l'aide d'un ruban à mesurer et d'un niveau laser simple ou d'un clinomètre
		GPS RTK	
		Modélisation numérique	Levé à l'aide d'un ruban à mesurer
		Balayage laser 3D (éléments submergés)	Mesure des caractéristiques des éléments submergés (hauteur, longueur, largeur, rugosité) à l'aide d'une chaîne de mesure ou de photographies
		Levé au sonar (sonar latéral monté sur kayak ou bateau)	Échosondage (fréquence unique) à partir d'un kayak ou d'un bateau
		Niveaux laser	Niveaux laser
		MNE, profil d'élévation le long du transect (GPS RTK), modèles de transport des sédiments	Niveau laser par rapport au repère
			Vidéos ou photos prises avec un drone à usage récréatif
		Appareil de mesure de l'élévation des sédiments (RSET)	Horizons argileux feldspathiques
Amélioration de la biodiversité et de l'utilisation de	Proportion de couverture végétale	GPS RTK	Relevé par quadrats
		Orthomosaïque géolocalisée à l'aide d'un drone	Google Earth ou équivalent

Mesure de performance	Indicateur de performance	Techniques	
		Techniques pour spécialistes	**Techniques pour membres de la collectivité**
l'habitat (flore et faune)	Diversité des espèces	Diversité de Shannon et autres mesures d'absence, d'abondance et de richesse	Méthodes par transect ou quadrat pour la richesse et le dénombrement des espèces Détection de la présence ou de l'absence de groupes d'organismes ou de guildes Bioblitz à l'aide de téléphones cellulaires pour la prise de photos et l'identification (p. ex. : iNaturalist) Carottes benthiques Pêche à la senne, à l'épuisette ou au tamis Enquêtes réalisées auprès de pêcheurs, d'ornithologues, etc.
	Proportion de couverture des taxons sessiles	Imagerie aérienne (identification, diversité, couverture)	Observation photographique
		Relevé des organismes benthiques	Relevé du Réseau canadien de biosurveillance aquatique (RCBA)
	Abondance ou densité des espèces indicatrices	Indice d'intégrité biologique ou variations biologiques	S.o.
		Étiquetage acoustique ou satellite	S.o.
	Augmentation de la taille de la population au fil du temps	Croissance, reproduction et survie de la faune et de la flore (p. ex. : relevés des ressources florales)	S.o.
	Densité ou hauteur des plantes	Analyse d'images	Échantillonnage de parcelles (nombre de tiges), mesure des hauteurs à l'aide d'un ruban à mesurer
Amélioration de la résilience de l'écosystème	Santé de la flore et de la faune (état et survie d'une saison à l'autre)	Relevés par quadrats et évaluations de l'état de santé – densité, santé (p. ex. : spécimens en santé, perturbés ou mourants); taux annuel de survie des espèces marquées par GPS RTK (plantes)	Prise répétée de photos géomarquées et de photographies de relevés par quadrats, et comparaisons répétées avec la référence de santé

Mesure de performance	Indicateur de performance	Techniques	
		Techniques pour spécialistes	**Techniques pour membres de la collectivité**
	Persistance et récupération après une tempête	Réalisation répétée de levés aériens à basse altitude ou par quadrats avant et après une tempête, et de mesures de la proportion de couverture et des spécimens individuels	Prise répétée de photos géomarquées, de photographies de relevés par quadrats et de mesures du pourcentage de couverture
Séquestration de carbone	Stocks de carbone	Mesures de la biomasse	Teneur en matières organiques (p. ex. : perte au feu) et masse volumique apparente
		Stock actuel (couverture et conversion végétales)	
	Accumulation nette de carbone dans la biomasse	Modification de la biomasse souterraine ou aérienne	
	Accumulation nette de carbone dans le sol	Modification du carbone organique du sol	
		Matière organique et conversion	
		Datation au plomb 210 pour obtenir un taux de séquestration (P)	

Source : adapté de MARCO, 2017

Étude de cas 2 – Réalignement de la digue et restauration du marais côtier

Marais de Belcher Street
Réalignement de la digue et restauration du marais côtier

Marais de Belcher Street
(Nouvelle-Écosse)
Canada

Ce projet consistait à reconstruire une digue défaillante plus loin à l'intérieur des terres de manière à restaurer l'hydrologie des marées devant la nouvelle digue (figure 4) (Graham et coll., 2021). L'évaluation de base a été réalisée en 2017. Situé près du point d'influence des marées le plus éloigné à l'intérieur des terres, le long de la rivière Jijuktu'kwejk (Cornwallis), ce site était principalement composé de pâturages abandonnés et de végétation de zone humide d'eau douce avant le réalignement. La reconstruction de la digue a eu lieu au printemps 2018. Élaboré selon la méthode BACI, le programme de suivi comportait plusieurs indicateurs de base (tableau 6), principalement des indicateurs environnementaux et de GRI. Suivant la restauration de l'hydrologie des marées, la végétation s'est rétablie rapidement après l'afflux initial de grandes quantités de sédiments. Parmi les enseignements tirés, citons l'importance des effets de l'équipement lourd sur les sédiments au cours des travaux de réalignement : le compactage des sédiments a entraîné une érosion que des mesures de gestion adaptative (creusage de canaux pour diriger l'écoulement et installation d'éléments de rivage vivant) ont permis de corriger.

Figure 4 – État sans végétation après l'aménagement (première année, à gauche) et état avec végétation (quatrième année, à droite)

Tableau 6 – Liste des méthodes avec indicateurs de performance

Catégorie	Indicateurs de performance	Méthode d'échantillonnage	Fréquence d'échantillonnage
Géospatial	Dimension de l'élément d'habitat vital	SASE orthomosaïque, modèle numérique de surface (MNS), instrument topographique G8 GNSS RTK	Au besoin
	Élévation et emplacement de l'élément	Modèle numérique d'élévation (MNE), instrument topographique G8 GNSS RTK	Annuelle
	Carte de l'habitat	Photographie aérienne à basse altitude, données sur la végétation	Annuelle
Hydrologie	Hydropériode, niveau de l'eau	Limnigraphes automatisés (intervalles de 5 minutes)	Période d'au moins 29 jours
	Ampleur de l'inondation	MNE, signal de marée	Annuelle
Sols et sédiments	Changement de l'élévation au fil du temps	RSET (Rod Surface Elevation Table), horizons repères	Annuelle
	Caractéristiques des sédiments	Masse volumétrique apparente, contenu de matière organique, type de sédiment, contenu en eau	Annuelle
Végétation	% de couverture par les plantes	Par transect, méthode « point intercept » (parcelles de 1 m^2)	Annuelle
	Diversité des espèces		
	Abondance des espèces indicatrices		
Marches hivernales	Conditions hivernales	Marches hivernales structurées et documentation photo	Annuelle

3.3.2 Mesures de performance complémentaires

D'autres indicateurs environnementaux relatifs aux fonctions écologiques pourraient être importants, selon la nature du projet SFN. Le tableau 2 décrit des mesures de performance complémentaires (énumérées dans le tableau 7) nécessaires pour atteindre ces objectifs fondamentaux. Ces mesures comprennent :

- Amélioration de la connectivité de l'habitat avec les habitats adjacents;
- Amélioration de la biodiversité et de l'utilisation de l'habitat (en matière de productivité de la végétation);
- Amélioration de la biodiversité et de l'utilisation de l'habitat (en matière d'utilisation par la faune);
- Productivité du sol;
- Réduction de la pollution (amélioration de la qualité de l'air);
- Réduction des émissions de gaz à effet de serre;
- Capacité tampon (composition chimique de l'eau);
- Régulation du microclimat;
- Réduction de la charge sédimentaire;
- Réduction des nutriments;
- Alimentation et réserve de la nappe souterraine;
- Habitat aquatique approprié;
- Élimination des toxines et des agents pathogènes.

Le tableau 7 présente les indicateurs de performance complémentaires, ainsi que leurs techniques de mesure potentielles. Ils comprennent :

- Amélioration de l'accès des organismes sessiles aux différents habitats;
- Hauteur et nombre de tiges des plantes (par unité de surface);
- Floraison ou production de fruits;
- Densités de population;
- Succès de nidification (oiseaux);
- Habitats benthiques (poissons);
- Qualité de l'eau (poissons);
- Concentrations de nutriments dans le sol;
- Mesures des concentrations de gaz CO_2, CH_4 et N_2O;
- pH de l'eau;
- Concentrations de CO_2 dans l'eau;
- Carbonate;
- Oxygène dissous;
- Santé des mollusques;
- Température (air, sol et eau);
- Concentration totale de matières ou de sédiments en suspension;
- Concentrations de nutriments dans l'eau;
- Nombre d'incidents distincts de contamination;
- Vitesse de recharge de la nappe souterraine;
- Capacité d'emmagasinement;
- Taux de bactéries dans l'eau;
- Concentrations tissulaires.

La connectivité des habitats pourrait être un facteur important de la résilience à long terme des populations d'organismes mobiles qui utilisent les sites SFN (Wijsman et coll., 2021). La valeur de la SFN peut augmenter si le site est relié à d'autres habitats de haute qualité. Les mesures permettant de déterminer la connectivité à l'échelle du paysage peuvent être aussi simples qu'évaluer l'étendue des habitats naturels par rapport aux infrastructures artificielles adjacentes au site; un habitat naturel adjacent plus important laisse supposer une plus grande connectivité (Sowińska-Świerkosz et García, 2021).

Un échantillonnage complémentaire de la biodiversité pourrait être indiqué lorsque la création d'un habitat vise des espèces rares. De nombreux projets SFN cherchent à créer ou à améliorer des habitats pour oiseaux nicheurs. Ces projets requièrent habituellement une série d'indicateurs portant sur les densités d'oiseaux, le succès de nidification ou d'autres variables. Dans ces cas, le suivi a généralement lieu chaque année et doit adhérer à des protocoles conçus pour réduire le plus possible les perturbations ou les préjudices causés aux populations nicheuses. Les poissons font également partie de nombreux programmes de suivi afin d'évaluer dans quelle mesure les SFN fournissent ou améliorent l'habitat pour ces populations. Tout comme l'échantillonnage des populations d'oiseaux, l'échantillonnage des poissons se fait généralement au moyen d'une procédure de remise en liberté, mais on peut prendre en compte plusieurs autres indicateurs de l'habitat des poissons (superficie des différents habitats benthiques, profondeur et débit de l'eau, qualité de l'eau, température, etc.) (Braun et coll., 2019). L'évaluation de la qualité de l'eau peut inclure l'échantillonnage du pH, de l'oxygène et des nutriments dissous, de la concentration de sédiments en suspension, de la salinité ou d'autres paramètres et peut constituer un important indicateur dans les situations où ces paramètres peuvent être des facteurs limitants pour les organismes aquatiques (tableau 7).

Les autres indicateurs de performance relatifs à la végétation incluent la hauteur et le nombre de tiges des plantes (par unité de surface) (tableau 7). Ces variables peuvent être importantes pour comprendre la santé et la productivité globales des communautés végétales, mais elles sont aussi d'importants déterminants de la capacité de la végétation à modérer la hauteur et l'énergie des vagues (Denny, 2021). L'échantillonnage de ces variables prend généralement plus de temps que les estimations de la couverture, de sorte qu'il faut peser avec soin la décision d'inclure un échantillonnage plus détaillé des plantes. La floraison et la production de fruits peuvent également constituer un important indicateur de la performance du système dans les cas où les objectifs du projet comprennent l'habitat d'espèces floristiques rares. La floraison est également importante si la SFN est adjacente à des terres agricoles et peut soutenir les pollinisateurs. Le suivi de la floraison est possible grâce à des méthodes peu coûteuses, comme une estimation visuelle de la couverture, de la composition taxinomique ou de la richesse spécifique, et il peut aussi être effectué avec des photos.

Tableau 7 – Mesures de performance complémentaires sur le plan environnemental avec indicateurs de performance correspondants et techniques de suivi proposées

Mesure de performance	Indicateur de performance	Techniques	
		Techniques pour spécialistes	Techniques pour membres de la collectivité
Amélioration de la connectivité de l'habitat avec les habitats adjacents	Amélioration de l'accès des organismes sessiles aux différents habitats	Analyse SIG des habitats environnants	Google Earth ou équivalent

Mesure de performance	Indicateur de performance	Techniques	
		Techniques pour spécialistes	**Techniques pour membres de la collectivité**
Amélioration de la biodiversité et de l'utilisation de l'habitat (en matière de productivité de la végétation)	Hauteur et nombre de tiges des plantes (par unité de surface)	Mesure de la hauteur et dénombrement des tiges	Mesure de la hauteur et dénombrement des tiges
	Floraison ou production de fruits	Estimation visuelle de la couverture Composition taxinomique ou richesse spécifique Observation photographique (photographie aérienne à haute résolution et à basse altitude)	Estimation visuelle de la couverture Composition taxinomique ou richesse spécifique Observation photographique
Amélioration de la biodiversité et de l'utilisation de l'habitat (en matière d'utilisation par la faune)	Densités de population, succès de nidification (oiseaux), habitats benthiques (poissons) Qualité de l'eau (poissons)	Relevés des espèces (p. ex. : remise en liberté) RCBA (invertébrés), relevés des organismes benthiques	Observation visuelle eBird RCBA Observation photographique
Productivité du sol	Concentrations de nutriments dans le sol	Analyse des éléments nutritifs du sol (laboratoire gouvernemental ou commercial)	Trousses d'analyse de sol pour les nutriments de base
Réduction de la pollution (amélioration de la qualité de l'air)	Indice de la qualité de l'air	Suivi continu (en temps réel et automatisé), suivi non continu (distinct et manuel), moniteurs mobiles	Moniteurs mobiles
	Ozone troposphérique (O_3); matière particulaire fine ($PM_{2,5}$); monoxyde de carbone (CO); dioxyde de soufre (SO_2); soufre réduit total (SRT); oxydes d'azote (NO_x); composés organiques volatils (COV)		
Réduction des émissions de gaz à effet de serre	Mesures des concentrations de gaz CO_2, CH_4 et N_2O	Analyseur de gaz à effet de serre portable avec chambres automatisées	Chambres statiques artisanales, extraction du gaz à la seringue, échantillon envoyé au laboratoire d'analyse

Mesure de performance	Indicateur de performance	Techniques	
		Techniques pour spécialistes	**Techniques pour membres de la collectivité**
Capacité tampon (composition chimique de l'eau)	pH de l'eau	Mesure de la conductivité, de la température et de la profondeur (CTP)	Mesure de la CTP
	Concentrations de CO_2 dans l'eau		
	Carbonate		
	Oxygène dissous		
	Santé des mollusques	Relevés des mollusques	Relevés des mollusques
Régulation du microclimat	Température (air et sol)	Station météorologique en temps réel ou sonde de température	Station météorologique
Réduction de la charge sédimentaire	Concentration totale de matières ou de sédiments en suspension	Analyse d'échantillons d'eau pour déterminer les matières en suspension totales Échantillonneur d'eau automatique	Évaluation de la limpidité de l'eau (p. ex. : disparition du disque de Secchi) Trousse d'échantillonnage à envoyer par la poste (p. ex. : chlorophylle A)
Réduction des nutriments	Concentrations de nutriments dans l'eau	Échantillonnage de l'eau (à grande échelle)	Observation de la prolifération d'algues
		Capacité de filtration des mollusques (à petite échelle)	Mesures de la densité et de la taille des huîtres
		Mesures de la charge en éléments nutritifs (avant-après ou contrôle-référence)	Trousse d'échantillonnage à envoyer par la poste
		Réduction modélisée fondée sur la littérature ou les protocoles approuvés	*Aucune connue*
		Modélisation de la charge en azote (p. ex. : utilisation du sol dans les bassins hydrographiques)	*Aucune connue*
		Multimètres (p. ex. : YSI)	Multimètres (p. ex. : YSI)
	Nombre d'incidents distincts de contamination	Fréquence ou volume des épisodes de surverses	Signalement des décharges de débordements d'égouts ou des problèmes d'infrastructure d'égout Signalement de la mortalité de poissons ou d'animaux
Alimentation et réserve de la nappe souterraine	Vitesse de recharge de la nappe souterraine	Analyse des hydrogrammes et des fluctuations de la nappe phréatique	*Aucune connue*

Mesure de performance	Indicateur de performance	Techniques	
		Techniques pour spécialistes	**Techniques pour membres de la collectivité**
	Capacité d'emmagasinement	Calcul ou analyse de la réserve de la nappe souterraine	*Aucune connue*
Habitat aquatique approprié	Oxygène dissous	Mesure de la CTP (échantillonnage direct de l'eau)	Mesure de la CTP (échantillonnage direct de l'eau)
	pH de l'eau		
	Température de l'eau		
Élimination des toxines et des agents pathogènes	Taux de bactéries dans l'eau	Échantillonnage des coliformes fécaux ou des entérocoques	Trousse d'échantillonnage à envoyer par la poste Signalement des fermetures de plages
	Concentrations tissulaires	Échantillons de tissus de la végétation (substances toxiques) Analyse des métaux lourds dans les poissons ou sédiments	Soumission d'échantillons de plantes Soumission de poissons pêchés

Source : adapté de MARCO, 2017

3.4 Indicateurs et techniques sur le plan social

3.4.1 Mesures de performance de base

Le tableau 2 décrit les objectifs fondamentaux des avantages connexes sur le plan social. Ces objectifs sont les suivants : 1) améliorer la santé et le mieux-être; 2) esthétique et intendance de l'environnement; 3) équité et justice; 4) alignement sur les valeurs culturelles et religieuses; 5) utilisation récréative et éducation; 6) adaptation et résilience aux changements climatiques. Les mesures de performance de base (énumérées dans le tableau 8) pour atteindre ces six objectifs fondamentaux sont les suivantes :

- Amélioration de la sécurité et de la tranquillité d'esprit;
- Connectivité avec les espaces verts et les systèmes naturels;
- Améliorations esthétiques;
- Renforcement de l'engagement communautaire et de l'intendance de l'environnement;
- Perception du public favorable au projet;
- Espaces culturels, religieux ou spirituels;
- Réduction de la pauvreté;
- Participation et intendance des peuples autochtones ou des groupes marginalisés;
- Inclusion et équité;
- Avantages complémentaires en matière d'adaptation et de résilience aux changements climatiques.

Le tableau 8 présente les indicateurs de performance, ainsi que leurs techniques de mesure potentielles, et comprend :

- Perception du public;
- Santé physique;
- Santé mentale et mieux-être;
- Sentiment d'appartenance;
- Valeur culturelle ou tribale;
- Utilisation des médias sociaux;
- Nouvelles;
- Population vivant dans la pauvreté;
- Données démographiques (sexe, ethnicité et âge);
- Changement d'attitude envers l'abandon ou la décharge de déchets;
- Taux d'utilisation;
- Engagement communautaire;
- Connectivité.

Les avantages connexes sur le plan social sont une composante fondamentale des SFN. L'adoption et la perception sociale des SFN sont donc cruciales pour comprendre la performance de la solution. Les mesures de la connaissance, de la sensibilisation et de l'engagement peuvent servir au suivi des progrès réalisés dans l'atteinte de certains objectifs de communication (Harley et van Minnen, 2009). Ces indicateurs sont utiles pour évaluer l'intérêt de la communauté envers les SFN et son adoption de celles-ci. En outre, les avantages des SFN en matière d'atténuation des changements climatiques ne sont pas répartis uniformément entre groupes sociodémographiques. Par conséquent, la sélection de mesures de base appropriées pour les indicateurs de performance constitue un élément crucial de la conception des programmes de suivi et d'évaluation des SFN (Dumitru et coll., 2020). Ces indicateurs peuvent varier en fonction des valeurs de la communauté. En outre, les SFN peuvent favoriser la cocréation d'espaces publics durables en améliorant les espaces verts, en renforçant le lien entre les personnes et la nature, en favorisant la cohésion sociale et en améliorant le mieux-être général des personnes (Wendling et coll., 2021; Dumitru et coll., 2020). Les indicateurs de performance de base sont liés à l'incidence directe du projet sur la communauté. Ils peuvent comprendre des sondages sur la perception qui permettent de comparer les objectifs de performance prévus pour le projet à la perception du public par rapport aux résultats escomptés. Cela peut être réalisé à l'aide de sondages ou de groupes de discussion (tableau 8) et servir d'orientation pour cibler les campagnes de sensibilisation ou adapter les communications et les messages publics. Les principales méthodes utilisées sont les sondages, les groupes de discussion et les assemblées communautaires. D'autres mesures indirectes consistent à suivre les médias sociaux, les médias et les entretiens avec des leaders de confiance au sein de la communauté. Le document intitulé *Avantages connexes* contient plus d'information sur ce sujet, tout comme le guide *Evaluating the Impact of Nature-Based Solutions: Appendix of Methods* (Évaluation de l'incidence des solutions fondées sur la nature : annexe des méthodes) de Dumitru et Wendling (2021).

Pour accroître la probabilité d'une gestion durable et juste, un projet SFN réussi doit intégrer de manière respectueuse et appropriée les communautés, les cultures et les systèmes de connaissances qu'un changement de méthode de gestion pourrait bousculer (p. ex. : l'abandon d'infrastructures grises au profit des SFN) (van Proosdij et coll., 2021). Cela comprend les considérations d'équité, d'inclusion, et de plus forte participation et intendance par les peuples autochtones et groupes marginalisés. On peut considérer ces mesures comme des mesures de performance de base. Les indicateurs de performance comprennent des variables sociodémographiques (p. ex. : le revenu, la race, le sexe, le genre, la langue, la citoyenneté, l'âge et les capacités) qui peuvent être extraites de

recensements. Toutefois, les données statistiques pourraient ne pas être disponibles à l'échelle requise pour des zones de moindre envergure. Le personnel local d'administration, de planification, de développement communautaire ou d'organismes de services connaît la communauté; il peut souvent partager ses connaissances locales par l'intermédiaire d'entretiens semi-structurés et de sondages (van Proosdij et coll., 2021).

Tableau 8 – Mesures de performance de base sur le plan social avec indicateurs de performance correspondants et techniques de suivi proposées

Mesure de performance	Indicateur de performance	Techniques	
		Techniques pour spécialistes	Techniques pour membres de la collectivité
Amélioration de la sécurité et de la tranquillité d'esprit	Perception du public sur la sécurité	Sondages avant et après, groupes de discussion, enquêtes d'opinion et entretiens	Sondages et enquêtes d'opinion en ligne, entretiens
	Médias d'information – rapports favorables	Suivi automatisé du fil de nouvelles, y compris les répercussions des tempêtes; analyse du contenu	Nombres de rapports des médias
	Médias sociaux – messages positifs	Analyse automatisée du suivi des médias sociaux	Mentions « j'aime » dans les médias sociaux de groupes communautaires
	Santé mentale et mieux-être	Sondages avant et après, groupes de discussion, enquêtes d'opinion et entretiens; sondages sur la santé mentale et le bien-être autodéclarés	Sondages et enquêtes d'opinion en ligne; messages sur les médias sociaux – contenu
Perception du public favorable au projet	Perception du public	Sondages avant et après, groupes de discussion, enquêtes d'opinion et entretiens	Sondages en ligne et entretiens
	Médias sociaux – publications positives	Analyse automatisée du suivi des médias sociaux	Mentions « j'aime » et partages dans les médias sociaux de groupes communautaires
Améliorations esthétiques	Médias sociaux – photos	Analyse automatisée du suivi des médias sociaux	Téléversement et partage de photos, et mentions « j'aime » sur celles-ci
Renforcement de l'engagement communautaire et de l'intendance de l'environnement	Changement d'attitude envers l'abandon ou la décharge de déchets	Analyse des opérations de nettoyage; analyse des services municipaux de traitement des déchets; rapports sur les déversements illégaux	Suivi de la quantité de déchets ramassés lors des opérations de nettoyage

Mesure de performance	Indicateur de performance	Techniques	
		Techniques pour spécialistes	**Techniques pour membres de la collectivité**
	Taux d'utilisation	Sondages sur la disposition à payer; nombre de personnes	Nombre de bénévoles et participation du public aux événements; nombre d'événements
	Engagement communautaire	Priorités des ONG en matière de financement	Dons
Connectivité avec les espaces verts et les systèmes naturels	Connectivité du projet avec les espaces verts et les systèmes naturels	Analyse SIG	Google Earth Sondages
Espaces culturels, religieux ou spirituels	Sentiment d'appartenance	Entretiens, groupes de discussion ou sondages; art et expressions créatives	Entretiens ou sondages Art et expressions créatives
Participation et intendance des peuples autochtones	Valeur culturelle ou tribale	Entretiens, groupes de discussion ou sondages	Participation autochtone
Recherche de nourriture, cueillette et utilisations traditionnelles	Utilisation traditionnelle	Sondage sur les connaissances traditionnelles; entretiens	Entretiens et médias sociaux
Réduction de la pauvreté	Réduction du nombre de ménages en dessous du seuil de pauvreté	Recensements, entretiens et statistiques sociodémographiques	Recensements, entretiens et sondages accessibles au public
Inclusion et équité	Diversité sociodémographique	Recensements sociodémographiques, sondages et entretiens	Recensements, enquêtes d'opinion et sondages accessibles au public
Participation et intendance des minorités ou des communautés historiquement marginalisées	Valeur culturelle ou sociale	Entretiens, groupes de discussion ou sondages	Participation des minorités ou des communautés historiquement marginalisées
Avantages complémentaires en matière de changements climatiques ou de leur atténuation : Adaptation à la mauvaise qualité de l'air ou son atténuation	Sondage de perception	Entretiens avec des spécialistes; adoption des SFN dans les plans municipaux d'adaptation aux changements climatiques	Conférences publiques de spécialistes – nombre de personnes participantes; sondages sur la perception et l'expérience du public
	Santé physique	Comparaison des répercussions des événements extrêmes; hospitalisations et visites aux urgences (coups de chaleur, problèmes respiratoires)	Nombre d'avis sur la qualité de l'air; nombre d'avertissements de chaleur; nombre d'avertissements d'inondation

Mesure de performance	Indicateur de performance	Techniques	
		Techniques pour spécialistes	Techniques pour membres de la collectivité
Adaptation aux chaleurs extrêmes, ou leur atténuation			

3.4.2 Mesures de performance complémentaires

D'autres indicateurs sociaux pourraient être importants, selon la nature du projet SFN. Le tableau 2 décrit des mesures de performance complémentaires (énumérées dans le tableau 9) nécessaires pour atteindre ces objectifs fondamentaux. Ces mesures comprennent :

- Réduction du bruit;
- Sécurité alimentaire;
- Rétablissement des utilisations historiques;
- Espaces de loisirs et de rassemblement plus vastes;
- Occasions d'éducation ou d'étude scientifique.

Le tableau 9 présente les indicateurs de performance, ainsi que leurs techniques de mesure potentielles. Ils comprennent :

- Niveau de bruit;
- Disponibilité alimentaire;
- Utilisation contemporaine d'activités historiques;
- Utilisation récréative;
- Condition physique;
- Études scientifiques;
- Occasions d'éducation.

Les mesures complémentaires de performance et de succès des SFN comprennent celles qui touchent le renforcement des capacités sociales et l'engagement des membres de la collectivité dans les activités d'éducation environnementale. L'éducation environnementale et l'intendance de l'environnement jouent un rôle important dans l'engagement et le soutien envers les activités SFN (Wendling et coll., 2021) (tableau 9). L'engagement rejoint le sentiment d'appartenance et d'attachement des membres de la communauté, souvent associé à des valeurs culturelles. Les mesures relatives aux valeurs culturelles peuvent inclure le rétablissement d'utilisations historiques et l'exploration d'un sentiment d'appartenance ou de la valeur culturelle ou tribale (tableau 9). En outre, les projets SFN peuvent augmenter l'utilisation récréative et offrir d'importants avantages en matière de santé et de mieux-être (tableau 9) (Wendling et coll., 2021).

Tableau 9 – Mesures de performance complémentaires sur le plan social avec indicateurs de performance correspondants et techniques de suivi proposées

Mesure de performance	Indicateur de performance	Techniques	
		Techniques pour spécialistes	Techniques pour membres de la collectivité
Réduction du bruit	Niveau de bruit	Sonomètre et dosimètre	Nombre de plaintes relatives au bruit
Sécurité alimentaire	Disponibilité alimentaire	Sondages; utilisation des banques alimentaires; marchés fermiers	Enquêtes d'opinion, nombre de vendeurs de produits alimentaires locaux, entretiens locaux
Rétablissement des utilisations historiques	Utilisation contemporaine d'activités historiques	Entrevues, groupes de discussion ou sondages	Publications sur les médias sociaux; sondages sur l'utilisation
Espaces de loisirs et de rassemblement plus vastes	Utilisation récréative	Sondages sur l'utilisation (type et nombre); dénombrements par télédétection; nombre de visiteurs; nombre de locations; médias sociaux	Nombre de sites d'accès public et observation de l'utilisation; dénombrement des voitures, des entrées; médias sociaux
	Condition physique	Mesures Fitbit ou suivi automatique de la condition physique Prévalence des maladies cardiovasculaires ou respiratoires	Publication sur les médias sociaux, applications et groupes de conditionnement physique Sondages
Occasions d'éducation ou d'étude scientifique	Études scientifiques	Nombre de publications dans la littérature grise et évaluée par des pairs; conférences	Nombre d'études scientifiques; rapports des médias
	Occasions d'éducation	Intégration des SFN dans les programmes scolaires (à tous les niveaux); panneaux éducatifs	Nombre de cours; excursions scolaires et publiques; événements de sensibilisation

3.5 Indicateurs et techniques sur le plan économique

Ce qui distingue les SFN d'autres méthodes, comme la méthode écosystémique ou le génie écologique, c'est la nécessité de tenir compte de multiples perspectives concernant les liens au sein des systèmes écologiques, sociaux et économiques et entre eux, et de tenir compte des diverses conséquences sociales et environnementales de toute intervention (Nesshöver et coll., 2017). Si de nombreux coûts associés aux SFN ont une valeur pécuniaire claire et quantifiable, de nombreux

avantages connexes (notamment sur le plan écologique, environnemental et social) sont moins tangibles, voire intangibles. Or, ces avantages intangibles ont une valeur bien réelle pour une communauté (van Proosdij et coll., 2021). Comme pour les autres catégories, les indicateurs économiques sont résumés ci-dessous et regroupés par mesures de base et complémentaires. En outre, le Système de comptabilité économique et environnementale – Comptabilité des écosystèmes (SCEE-CE) constitue un puissant outil de plus pour quantifier et optimiser les avantages environnementaux et économiques d'un projet SFN, lorsque les objectifs fondamentaux relèvent de ces deux catégories (encadré 1).

3.5.1 Mesures de performance de base

Le tableau 2 décrit les objectifs fondamentaux des avantages connexes sur le plan économique. Ces objectifs sont les suivants : 1) avantages pécuniaires; 2) effets positifs sur l'économie locale. Les mesures de performance de base (énumérées dans le tableau 10) pour atteindre ces deux objectifs fondamentaux sont les suivantes :

- Réduction des coûts en capital;
- Réduction des coûts d'entretien et d'exploitation;
- Amélioration des moyens de subsistance dans les secteurs de la pêche, de l'agriculture ou de l'artisanat;
- Possibilités d'emplois locaux.

Le tableau 10 présente les indicateurs de performance, ainsi que leurs techniques de mesure potentielles :

- Coûts en capital;
- Coûts d'entretien et de réparation;
- Revenus économiques;
- Statistiques sur l'emploi.

Les SFN peuvent exiger d'importants investissements en matériaux et en énergie; il est donc essentiel de reconnaître le potentiel de compromis sur le plan économique que la mise en œuvre de ces stratégies pourrait entraîner (p. ex. : la restauration de zones humides peut protéger contre les inondations et procurer des avantages connexes, comme la purification de l'eau, mais elle pourrait avoir des effets négatifs sur l'agriculture locale, comme l'inondation de terres agricoles de grande qualité). Pour comprendre ces compromis sur le plan économique, l'utilisation d'une monnaie commune (p. ex. : le dollar américain) pourrait être utile afin d'évaluer les différentes solutions. Les solutions doivent être déterminées dans l'optique de relier les piliers du développement durable et d'évaluer de manière égale les dimensions sociales, économiques et environnementales (Nesshöver et coll., 2017). Les analyses coûts-avantages sont souvent des outils utiles pour les personnes prenant des décisions; or, réaliser une solide analyse coûts-avantages pourrait être difficile en l'absence de lignes directrices claires pour monnayer de nombreux avantages connexes (p. ex. : certains avantages connexes sont intangibles) ou de données pour certaines régions. En outre, les décisions cruciales touchant la conception et les coûts des SFN intéresseront probablement de nombreuses parties prenantes; malgré la volonté de parvenir à une solution gagnant-gagnant sur les trois plans (social, économique et environnemental), il y a souvent des compromis qui sont difficiles à quantifier et qui comportent différents coûts, avantages, effets et risques (Eger et coll., 2022; Halpern et coll., 2013; Nesshöver et coll., 2017). Les méthodes d'évaluation doivent comprendre des conseils de spécialistes et la participation de la communauté afin d'exploiter à fond les résultats escomptés d'un projet. Le document intitulé *Avantages connexes* contient plus d'information sur ce sujet, tout comme le guide

Evaluating the Impact of Nature-Based Solutions: Appendix of Methods (Dumitru et Wendling, 2021).

La valeur de service d'actifs naturels est de plus en plus reconnue, et l'intérêt pour l'intégration des services écosystémiques dans la planification et la prise de décision (p. ex. : la *Natural Assets Initiative* [Initiative pour les actifs naturels]) grandit. L'estimation des services écosystémiques permet de déterminer et de quantifier les services et avantages que procurent les écosystèmes. Ce processus permet également d'examiner les conséquences sociétales plus générales d'un projet ou d'une décision et d'examiner les compromis, les inégalités et les éléments intangibles du mieux-être humain (van Proosdij et coll., 2021).

Tableau 10 – Mesures de performance de base sur le plan économique avec indicateurs de performance correspondants et techniques de suivi proposées

Mesure de performance	Indicateur de performance	Techniques	
		Techniques pour spécialistes	Techniques pour membres de la collectivité
Réduction des coûts en capital	Coûts en capital	Comptabilisation des coûts sur l'ensemble du cycle de vie du projet	*Aucune connue*
Réduction des coûts d'entretien et d'exploitation	Coûts d'entretien et de réparation		
Amélioration des moyens de subsistance dans les secteurs de la pêche, de l'agriculture ou de l'artisanat	Revenus	Revenus économiques	*Aucune connue*
Possibilités d'emplois locaux	Nombre d'emplois	Statistiques sur l'emploi; données ou sondages socioéconomiques	Statistiques sur l'emploi; annonces d'emploi; examen d'études de cas

Source : adapté de MARCO, 2017

3.5.2 Mesures de performance complémentaires

D'autres indicateurs relatifs aux avantages connexes sur le plan économique peuvent être importants, selon la nature du projet SFN. Le tableau 2 décrit des mesures de performance complémentaires (énumérées dans le tableau 11) nécessaires pour atteindre ces objectifs fondamentaux. Ces mesures comprennent :

- Réduction des coûts pour infrastructures adjacentes (évitement de pertes dues aux inondations);
- Augmentation de l'évaluation foncière/valeur de la propriété;
- Baisse des primes d'assurance contre les inondations;
- Augmentation des recettes fiscales;
- Possibilités d'écotourisme;
- Baisse du coût de la vie.

Le tableau 11 présente les indicateurs de performance, ainsi que leurs techniques de mesure potentielles. Ils comprennent :

- Coûts en capital, d'entretien et de réparation;
- Valeur perçue;
- Valeur réelle;
- Nombre/coût des réclamations d'assurance;
- Systèmes d'évaluation;
- Modélisation du risque;
- Recettes fiscales;
- Perception de la communauté;
- Coût de la vie.

Tableau 11 – Mesures de performance complémentaires sur le plan économique avec indicateurs de performance correspondants et techniques de suivi proposées

Mesure de performance	Indicateur de performance	Techniques	
		Techniques pour spécialistes	Techniques pour membres de la collectivité
Réduction des coûts pour infrastructures adjacentes (évitement de pertes dues aux inondations)	Coûts en capital, d'entretien et de réparation	Comptabilisation des coûts sur l'ensemble du cycle de vie du projet Analyse coût-avantage	*Aucune connue*
Augmentation de l'évaluation foncière/valeur de la propriété	Valeur perçue	Sondage sur la valeur perçue par les résident·es Entrevues sur la perception de l'utilité des caractéristiques naturelles et fondées sur la nature pour le sentiment de protection	Partage en ligne Requêtes en ligne
	Valeur réelle	Transactions immobilières Valeurs immobilières	*Aucune connue*
Baisse des primes d'assurance contre les inondations	Nombre/coût des réclamations d'assurance	Réclamations d'assurance relatives aux inondations	Examen d'études de cas
	Systèmes d'évaluation	Points du *Community Rating System* (Système d'évaluation communautaire) liés aux caractéristiques naturelles et fondées sur la nature	*Aucune connue*
	Modélisation du risque	Modélisation numérique intensive	*Aucune connue*

Mesure de performance	Indicateur de performance	Techniques	
		Techniques pour spécialistes	**Techniques pour membres de la collectivité**
Augmentation des recettes fiscales	Recettes fiscales	Demande de données à l'autorité gouvernementale compétente	*Aucune connue*
Possibilités d'écotourisme	Perception de la communauté	Entrevues Sondages ou enquêtes d'opinion sur la disposition à payer	*Aucune connue*
Baisse du coût de la vie	Coût de la vie	Analyse du coût de la vie	Analyse observationnelle

Source : adapté de MARCO, 2017

Encadré 1 – Cas particulier : Système de comptabilité économique et environnementale – Comptabilité des écosystèmes

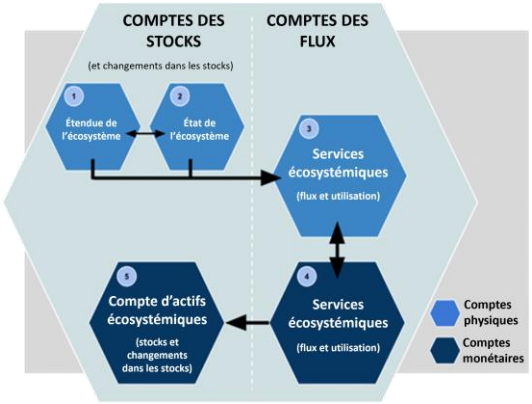
CAS PARTICULIER
Système de comptabilité économique et environnementale – Comptabilité des écosystèmes (SCEE-CE)

Comme « les avantages connexes sur le plan économique […] [entraînent] rarement d'importants avantages connexes sur le plan environnemental […], prioriser les avantages connexes des SFN sur le plan économique pourrait produire de mauvais résultats (p. ex. : compromis) pour l'environnement (DHI, 2024b). Le Système de comptabilité économique et environnementale — Comptabilité des écosystèmes (SCEE-CE) est un outil de remplacement efficace pour quantifier et maximiser les avantages économiques et environnementaux de projets SFN. Ses objectifs principaux sont liés à ces deux catégories. Le SCEE-CE est « un cadre qui intègre des données économiques et environnementales afin de fournir une vision plus complète et polyvalente des interrelations entre l'économie et l'environnement, et les stocks et les changements dans les stocks d'actifs environnementaux, dans la mesure où ils procurent des avantages à l'humanité » *[traduction]* (Nations Unies, 2021). Le recours à ce cadre de comptabilité des écosystèmes permet également d'obtenir une méthode de comptabilité exhaustive et statistique pour déterminer l'effet total d'un projet SFN. Le cadre permet aussi de générer un montant en dollars que les personnes prenant des décisions peuvent plus facilement comprendre et comparer à d'autres biens et services. Grâce au SCEE-CE, il est possible de procéder à une analyse coûts-avantages de manière plus standardisée, planifier la politique économique de manière plus éclairée et comparer les coûts en capital et les coûts d'entretien sur toute la durée de vie d'un projet. Ainsi, la comptabilité des écosystèmes permet de déterminer la valeur économique d'un système et peut donc servir comme indicateur de performance des contributions d'un projet SFN à l'économie.

Le SCEE-CE utilise cinq mesures et indicateurs de base pour rendre compte des avantages économiques (figure 5) :

1. L'étendue de l'écosystème, pour saisir la superficie totale enregistrée de chaque écosystème et suivre l'évolution des types d'écosystèmes au fil du temps.
2. L'état de l'écosystème, pour suivre et consigner l'état de certaines caractéristiques des actifs écosystémiques à des moments précis.
3. Les services écosystémiques (avantages connexes) – comptes physiques, pour enregistrer les services écosystémiques par actifs écosystémiques, et leur utilisation par les unités économiques, y compris les ménages.
4. Les services écosystémiques (avantages connexes) – comptes pécuniaires, pour enregistrer l'évaluation pécuniaire des services écosystémiques et de leurs avantages connexes.
5. L'actif écosystémique pécuniaire, pour enregistrer les changements dans les stocks d'actifs écosystémiques et rendre compte de la dégradation et de l'amélioration des écosystèmes.

Figure 5 – Comptes écosystémiques et relations entre eux



Source : Nations Unies et coll., 2021

4 Considérations particulières pour les écosystèmes et le type de SFN

La sélection des indicateurs de performance et de leurs techniques de suivi dépend fortement des écosystèmes dans lesquels se trouvent les solutions fondées sur la nature (SFN), ou dont elles font partie intégrante. Le présent chapitre expose les considérations à prendre en compte lors de l'élaboration de plans de suivi pour une série d'écosystèmes et de types de SFN. Ces considérations particulières ont été regroupées de manière générale : plages et dunes; zones humides et estrans; îles; forêts côtières et zones boisées; éléments submergés; et éléments hybrides. Les sections suivantes décrivent brièvement les différents types d'habitats et la manière dont leurs caractéristiques peuvent influer sur la conception et la mise en œuvre du plan de suivi. Des études de cas mettent en évidence les concepts clés.

4.1 Plages et dunes

Les plages et dunes sont des systèmes côtiers sableux qui peuvent être trouvés sur les côtes du Canada, du Mexique et des États-Unis. Elles s'étendent principalement sur les marges passives aux larges plateaux continentaux le long de la côte est, lesquelles se caractérisent par des îles-barrières, des flèches et des plages (Bird et Schwartz, 1985; Luijendijk et coll., 2018). De vastes champs de dunes existent également sur la côte ouest des États-Unis et du Mexique, la plus longue étendue de dunes côtières se trouvant dans l'État de l'Oregon, et les plus grands champs de dunes, dans les zones désertiques du sud-ouest (Sherman, 2021). Elles peuvent être trouvées dans de nombreux environnements, notamment sur les côtes continentales, les barrières littorales, les promontoires et les côtes estuariennes où l'apport en sédiments est suffisant (Lodder et coll., 2021). Les plages et dunes sont des systèmes intrinsèquement dynamiques, façonnés par des processus marins (vagues et marées) et terrestres (éoliens) (Davidson-Arnott et coll., 2019). Elles remplissent également des fonctions de protection en plus de procurer des avantages environnementaux et d'agrément (p. ex. : tourisme) (Lodder et coll., 2021).

Les SFN qui comportent des systèmes de plages et de dunes imitent les caractéristiques des environnements naturels pour fournir des services particuliers, comme une protection du littoral, une utilisation récréative ou un habitat pour les espèces en danger (Lodder et coll., 2021). Les SFN pour systèmes sableux peuvent inclure, par exemple, la recharge en sable (y compris les recharges volumineuses) ou la restauration des dunes au moyen de diverses techniques (Bridges et coll., 2021). Il peut également s'agir de systèmes hybrides comprenant des revêtements enfouis qui offrent une protection supplémentaire lors de violentes tempêtes, par exemple (Lodder et coll., 2021). Le document intitulé *Adaptation des infrastructures existantes* examine plus en détail les systèmes de plages et de dunes.

Les facteurs clés pour ces types de SFN comprennent la restauration, le maintien ou l'amélioration des processus côtiers afin d'augmenter la résilience. Par résilience côtière, il est entendu la capacité d'un système à se rétablir après une perturbation. Cette capacité varie en fonction des caractéristiques propres au système et du degré de perturbation. Les SFN visant la résilience sont donc propres au site et peuvent inclure l'ajout de sédiments et de végétation indigène pour augmenter le volume des plages, des dunes et des surfaces littorales. Cela peut renforcer la zone tampon existante contre l'érosion et diminuer le risque d'inondation (p. ex. : pour gérer les risques d'inondation [GRI]) (Lodder et coll., 2021). Ces projets exigent une certaine souplesse dans la conception et l'entretien, car les environnements côtiers sont dynamiques et évoluent grâce à des réactions et à des processus interconnectés. Il est donc important de prendre en compte les effets en aval, tant d'un point de vue écologique ou environnemental que d'un point de vue économique. Par exemple, l'ajout de sédiments

par recharge devra prendre en compte les effets écologiques et les changements qui en résultent en raison de la transition d'habitat. En outre, les programmes de suivi devront prendre en compte les effets en aval et en amont au fur et à mesure de l'évolution des SFN et des systèmes de plages et de dunes. Par exemple, la recharge à grande échelle en amont exercera une influence sur les organismes benthiques du site (justifiant un suivi environnemental supplémentaire, comme indiqué dans le tableau 7). Dans tous les cas, il est important de prévoir un espace pour la migration naturelle vers l'intérieur des terres (Lodder et coll., 2021).

La conception et le suivi efficaces d'une SFN comportant des plages et dunes requièrent une approche interdisciplinaire. Les domaines essentiels sont l'ingénierie, la géomorphologie côtière, l'écologie, la gouvernance et les sciences sociales. L'évolution des pratiques de recharge en sable tient désormais compte de la sécurité du public et des loisirs nautiques (p. ex. : les courants de retour), de la dynamique des eaux souterraines et des effets sur les écosystèmes (de Schipper et coll., 2021). Ces considérations étendent la portée du suivi traditionnel d'éléments physiques et écologiques, comme la largeur de la plage, la pente, les dimensions des dunes et la couverture végétale, aux enquêtes sur les usagers de la plage et aux valeurs immobilières, aux invertébrés benthiques et aux inventaires d'oiseaux.

Étude de cas 3 – Restauration des dunes de Playa Hermosa

Restauration des dunes de Playa Hermosa — Ensenada (Basse-Californie) Mexique

Améliorer les objectifs fondamentaux sur le plan social par la restauration d'un système de dunes et de plages

Playa Hermosa est située à Ensenada, en Basse-Californie, au Mexique. La plage est située en milieu urbain, à environ 3 km du centre-ville; un chemin de terre donnait accès à la plage, qui était rarement utilisée. Certaines sections de la plage comprenaient des dunes entretenues et d'autres, des dunes dégradées. En 2009 a commencé la construction d'une route principale et d'un projet de restauration de la plage. S'en est suivi un projet en 2010 mené par la municipalité pour restaurer les dunes dégradées, créer un accès à la plage par des promenades pour préserver les dunes, et interdire toute construction entre la route et la mer.

Figure 6 – Système de plages et de dunes avant (2006) et après (2011) la restauration

Source : Google Earth, 2022

Malgré des problèmes persistants de qualité de l'eau à cause des rejets de ruisseaux à l'extrémité nord, les habitants fréquentent aujourd'hui la plage, où ils aiment faire de l'exercice et se divertir. De nouvelles propositions ont menacé le projet : on voulait éliminer les dunes pour y construire un parc de planche à roulettes. La pression sociale a toutefois permis de maintenir le projet de restauration des dunes; le parc de planche à roulettes a été construit ailleurs en 2023.

Figure 7 – Nouvelle promenade sur les dunes pour accéder à la plage

Source : avec l'aimable autorisation de Lorax, S.A. de C.V.

Les modèles numériques d'élévation et de surface à haute résolution, dérivés soit de données lidar, soit de levés aériens répétés à basse altitude avec points de contrôle relevés avec grande précision, sont aujourd'hui plus accessibles que jamais. Ces modèles permettent de calculer des mesures volumétriques précises du sable de la plage à marée basse (voir le tableau 5). De pair avec des levés bathymétriques répétés de la zone proche du rivage, il est possible de calculer un bilan sédimentaire (apports et pertes de sédiments) qui permet de suivre les changements au fil du temps (Davidson-Arnott et coll., 2019). Les changements dans le bilan sédimentaire se traduisent par un continuum de changements dans les caractéristiques de l'avant-dune, la largeur de la plage et la capacité du littoral à se rétablir après des événements perturbateurs, comme les ouragans (Ciarletta et coll., 2021). Les importantes considérations pour calculer avec précision un bilan sédimentaire comprennent la sélection d'une échelle spatiale et temporelle pertinente convenant aux critères de performance, la compréhension du système côtier en question et de sa dynamique, et la prise en compte des tendances à long terme et de la variabilité naturelle observée dans les indicateurs de l'état côtier (p. ex. : l'érosion, la progradation) (Lodder et coll., 2021).

Les systèmes de plages et dunes sableuses sont par nature très dynamiques, connaissant d'importants changements morphologiques saisonniers (p. ex. : le profil de la plage en hiver par rapport à l'été) et après de fortes tempêtes. Il convient par conséquent d'étudier soigneusement le moment et la fréquence des levés. Des évaluations saisonnières et annuelles de la sédimentation et de l'érosion peuvent être réalisées le long de transects en utilisant une combinaison de levés GPS RTK ou de relevés lidar et de données d'échosondage à faisceau unique. Il faut prendre soin de convertir les profondeurs bathymétriques (généralement par rapport au zéro des cartes) en un référentiel altimétrique terrestre. Les levés annuels doivent avoir lieu à la même période de l'année. Les profils peuvent ensuite être comparés à un trait de côte de référence, technique couramment utilisée aux Pays-Bas pour éclairer les projets de recharge en sable (Elias et coll., 2012). En outre, des levés peuvent avoir lieu après de fortes tempêtes pour quantifier leurs effets et suivre le rétablissement après la tempête. Dans les climats nordiques, la couverture de neige et de glace, y compris la présence (ou l'absence, dans le cas d'hivers plus doux) d'une banquette côtière, aura une incidence sur les processus de transport des sédiments et les changements morphologiques. Dans les climats méridionaux, les plages et dunes qui servent principalement au tourisme réagiront également aux activités de gestion côtière (p. ex. : le ratissage des plages, l'enfouissement ou l'enlèvement du varech) et à l'activité humaine (p. ex. : la circulation à pied dans les dunes, l'utilisation de véhicules de plaisance), ce qui déterminera le programme de suivi. L'inclusion de composantes sociales, comme le type d'utilisation des plages, la fréquence des activités et la sécurité du public (p. ex. : le nombre de jours de fermeture à la baignade en raison de dangereux courants de retour) sera importante pour distinguer les facteurs de changement naturels des facteurs anthropiques.

4.2 Zones humides et estrans

Les zones humides et estrans se trouvent dans la zone intertidale et sont un élément clé du système côtier. Ils peuvent faire partie de différents types de SFN et produire des effets différents. Par exemple, les zones humides de la zone intertidale proche de digues ou de levées peuvent diminuer l'énergie des vagues et donc le risque de débordement et d'inondation. Pour leur part, celles qui sont incorporées dans les structures d'un rivage vivant servent à stabiliser le littoral et ainsi diminuer les taux d'érosion et de recul. Situés dans des milieux à faible et moyenne énergie où l'accrétion de sédiments permet à la végétation de s'établir, ces habitats essentiels peuvent varier en fonction du climat, de la géographie, des caractéristiques des sédiments, de l'hydropériode, du régime de salinité et de bien d'autres facteurs. Les fonctions de protection et les services écosystémiques varient également en fonction du type de zone humide et d'estran présent, mais elles comprennent souvent la réduction des vagues, une meilleure capacité d'inondation, les services de traitement de l'eau, la

séquestration du carbone, le soutien de la biodiversité et les loisirs. Les types de zones humides côtières comprennent, entre autres, les marais salins, les marais saumâtres, les marais d'eau douce à marée, les marais à mangrove et les marécages de feuillus des terres basses. Bon nombre de marais côtiers et de zones humides côtières sont dominés par des graminées et des joncs des genres *Sporobolus* (*Spartina*) et *Juncus*, mais la présence d'arbustes et de grands arbres, comme la mangrove (encadré 2) et le tupélo pourrait exiger des approches différentes lors de la considération des méthodes de suivi (voir section 4.4). Le document intitulé *Adaptation des infrastructures existantes* examine plus en détail les zones humides et estrans.

Les zones humides se différencient des terres hautes par trois principales caractéristiques : l'hydrologie, la végétation et les sols et sédiments. Ces indicateurs apparaissent dans plusieurs catégories d'avantages connexes indiquées au chapitre 2, étant axés sur les fonctions biophysiques qui constituent les fondements des systèmes de zones humides. Ils sont donc un bon point de départ pour sélectionner les composantes d'un programme de suivi. L'ajout d'autres indicateurs, comme l'usage public (indicateur social), les actifs pécuniaires (indicateur économique) ou la diversité des espèces, pourrait considérablement améliorer la valeur du programme de suivi.

L'hydrologie est le principal facteur influençant la morphologie et la structure des zones humides et estrans. Elle a une incidence directe sur les processus pédologiques et sédimentaires et sur la composition de la communauté végétale. Les paramètres hydrologiques peuvent inclure l'hydropériode, la profondeur et le débit de l'eau, la cartographie de l'étendue des inondations, la hauteur des vagues et la qualité de l'eau, et peuvent faire partie des dimensions écologiques et structurales du programme de suivi (Science and Resilience Institute at Jamaica Bay, 2020). Les méthodes sont résumées dans les tableaux 3, 5 et 6 et peuvent varier sur le plan des coûts et de la complexité. Par exemple, des évaluations visuelles (présence de lignes de varech, de la laisse de haute mer ordinaire ou de zones d'érosion) peuvent être facilement réalisées à faible coût, tandis que la modélisation hydrodynamique (généralement nécessaire dans les scénarios complexes ou à haut risque) est coûteuse, prend du temps et exige une forte participation de spécialistes.

La végétation joue un rôle essentiel dans les fonctions de protection des zones humides. En effet, elle diminue l'énergie des vagues et fournit des habitats et des services écosystémiques essentiels (tableaux 2 et 5). La végétation peut être mesurée à différentes échelles, et les méthodes peuvent varier en fonction de l'échelle focale (tableau 5). La densité, la diversité et la biomasse des espèces sont souvent d'importants éléments des programmes de suivi, car ils permettent de mesurer à la fois la capacité d'amortissement des vagues et la biodiversité (tableau 5). À plus grande échelle, des activités comme la cartographie de la couverture permettent de comprendre les avantages connexes, comme l'habitat des espèces rares.

Dans les zones humides et estrans, les sols et sédiments sont d'importants facteurs de productivité (les caractéristiques du sol sont liées à la croissance de la végétation, et l'élévation, à la zonation) et dans leur capacité de survivre à l'élévation du niveau de la mer. Cette capacité est directement liée à leur capacité à s'élever, principalement par la sédimentation et les processus de subsurface (Nolte et coll., 2013). Les levés d'élévation, souvent le long de transects pour obtenir des profils, et les modèles d'élévation (MNE, modèle numérique de surface) sont importants pour déterminer les changements à l'échelle du paysage dans la morphologie de la zone intertidale (tableau 5). Or, ils sont souvent incapables de détecter de manière adéquate des changements d'élévation faibles, mais importants à court terme, en particulier dans les zones où les concentrations de sédiments en suspension sont faibles, et l'amplitude des marées, basse. L'une des caractéristiques souhaitables des marais côtiers pour les SFN est leur capacité à suivre verticalement l'élévation du niveau de la mer et à s'élever au fil des marées (Cahoon et coll., 2006). Des équipements spécialisés, comme l'appareil de mesure de l'élévation des sédiments (SET) et les horizons repères, qui mesurent à la fois les processus souterrains et aériens, permettent de détecter les changements d'élévation à des résolutions inférieures

au centimètre (Webb et coll., 2013; Lynch et coll., 2015). Ces mesures permettent d'évaluer si la plateforme du marais côtier suit l'élévation relative du niveau de la mer ou si elle s'affaisse. Ces équipements peuvent également servir à déterminer si l'ajout de fines couches de sédiments de dragage s'impose comme approche de gestion adaptative. Les techniques de classification des conditions du sol peuvent varier sur le plan des coûts et de la complexité. Elles vont de protocoles rapides sur le terrain pour classer la texture et la couleur des sols dans le cadre d'une évaluation fonctionnelle ou d'une délimitation des zones humides (ministère de l'Environnement et des Gouvernements locaux du Nouveau-Brunswick, 2018), à des études de séquestration du carbone à long terme utilisant des chambres à gaz à effet de serre statiques et le carottage du sol (Bartolucci et coll., 2021).

Encadré 2 – Cas particulier : Mangroves

CAS PARTICULIER
Mangroves

Les mangroves font de plus en plus partie des stratégies de gestion des inondations, tant dans les zones côtières de faible élévation (Menéndez et coll., 2020; Gijsman et coll., 2021) que dans les solutions d'ingénierie hybride (Sutton-Grier et coll., 2015). Comme les marais côtiers, elles réduisent la hauteur des ondes de tempête et atténuent les vagues de vent – mais grâce à des systèmes racinaires aériens caractéristiques. À cause de ces racines et de la forme physique compacte des mangroves, le suivi des systèmes à l'aide de méthodes traditionnelles est souvent très difficile, tout comme l'accès et la navigation. De plus, une mise en œuvre et un suivi réussis dépendent d'une « compréhension mécaniste de la fonctionnalité et de la persistance des mangroves » [*traduction*] (Gijsman et coll., 2021, 1). Comme pour les marais côtiers, cette méthode repose sur des processus hydrodynamiques, morphologiques et écologiques qui se déroulent à différentes échelles temporelles et spatiales. Ces interactions multiéchelles englobent l'échelle de l'arbre (axée sur la dynamique locale à court terme autour des arbres et de parcelles d'arbres), l'échelle de la forêt (comportant la dynamique de transects complets le long de gradients d'élévation dans les mangroves) et l'échelle de l'écosystème (Gijsman et coll., 2021).

Le suivi sur le terrain porte généralement sur les processus à l'échelle de l'arbre et de la forêt, alors que les techniques de télédétection peuvent fournir de précieux renseignements sur les processus à l'échelle de la forêt et de l'écosystème et relever les changements dans la structure de la forêt. Les mesures de l'hydrodynamique, de la morphologie et des paramètres écologiques sont comparables à celles déjà rapportées. Notons qu'il est généralement difficile d'obtenir des données topographiques dans les mangroves, car la végétation dense entrave le GPS RTK et les mesures directes (Gijsman et coll., 2021). Le couvert végétal nuit également à de nombreuses méthodes de télédétection. Des mesures directes sont effectuées à l'échelle de l'arbre; elles comprennent l'évaluation de la densité des arbres, des espèces d'arbres, du diamètre des troncs, de la hauteur des arbres et des racines des arbres le long d'un transect afin d'analyser l'écosystème de manière représentative.

Outre les contributions aux changements d'élévation déjà mentionnées pour les marais côtiers, les mangroves offrent d'autres contributions, notamment la croissance d'algues et de tapis microbiens, ainsi que l'accumulation de litière feuillue et de détritus (Cahoon et coll., 2006). Les levés de terrain englobent généralement divers processus à l'échelle de l'arbre, comme la croissance des racines, des arbres, du tapis microbien ou des algues, et l'accumulation de détritus et de litière feuillue. La croissance des arbres peut être évaluée par des mesures manuelles ou à l'aide de rubans dendromètres (des rubans d'acier inoxydable placés autour du tronc de l'arbre) (Lovelock et coll., 2011) ou par le marquage et la nouvelle mesure d'arbres sélectionnés (Feller et coll., 2015). La croissance des racines peut être mesurée à l'aide de sacs de croissance, c'est-à-dire des sacs à mailles en nylon remplis de

sédiments naturels, qu'on enterre sur le site et qu'on collecte ultérieurement pour mesurer la biomasse des racines produites (Lovelock et coll., 2011). La contribution de la litière feuillue ou des détritus aux changements d'élévation peut être évaluée à l'aide de paniers à litière (Steinke et Ward, 1989). La croissance des algues ou des tapis microbiens peut être mesurée en construisant des écrans de surface (McKee, 2011) ou à partir de racines de pneumatophore coupées (Steinke et Ward, 1989).

Étude de cas 4 – Restauration du marais salé de Cheverie

Restauration du marais salé de Cheverie
Restauration des services écosystémiques et de la protection du littoral

Cheverie (Nouvelle-Écosse)
Canada

À l'automne 2005, le ministère des Transports et du Renouvellement de l'infrastructure de la Nouvelle-Écosse et CBWES Inc. ont entrepris des travaux de restauration du courant de marée et de la passe à poissons à Cheverie Creek (Canada). Ces travaux ont mené à la restauration de 43 ha d'habitat de marais salé. La Cheverie Crossway Salt Marsh Society, établie durant les travaux, a apporté un solide soutien communautaire au projet par la construction d'un sentier de randonnée, de panneaux d'interprétation et d'une chambre noire (Nova Scotia : Off the Beaten Path, 2019).

Figure 8 – Installation d'un nouveau ponceau en 2005

Principalement axé sur les indicateurs écologiques, le programme de suivi visait à :

- documenter l'efficacité des mesures de compensation mises en œuvre;
- déterminer la nature, l'étendue et la direction des changements;
- documenter les progrès en matière de restauration et déterminer le succès du projet.

Une approche BACI a été adoptée, les conditions du site de base et de référence ayant servi pour quantifier les changements. L'Ecology Action Centre, l'Université Saint Mary's et CBWES ont collecté les données de base, de 2002 à 2005. Ensuite, CBWES a mis en place et exécuté un programme de suivi post-restauration à long terme couvrant les années un à trois (2006-2008), cinq (2010) et sept (2012). Au cours des quatrième et sixième années, les activités de suivi ont eu une portée limitée. Le programme de suivi fut conçu pour les conditions uniques de la baie de Fundy, un estuaire macrotidal aux marées exceptionnellement hautes, avec des concentrations élevées de sédiments en suspension et des conditions hivernales variables. À cette fin, CBWES a adapté le programme à partir du *Gulf of Maine Regional Monitoring Protocol* (Programme de suivi régional du golfe du Maine) [Neckles et coll., 2002]. Les paramètres échantillonnés sont les suivants :

- hydrologie (niveaux des eaux, hydropériode et eaux souterraines);
- sols et sédiments (accrétion, élévation et caractéristiques);
- végétation (composition, abondance, hauteur et cartographie de l'habitat);
- necton (composition, richesse spécifique, densité et longueur);
- invertébrés (abondance et richesse spécifique); état hivernal (évaluation visuelle).

Figure 9 – Marais de Cheverie 15 ans après la restauration

Source : CBWES Inc.

Les méthodes utilisées comprenaient des approches à faible coût ou à faible technicité et des mesures plus complexes et plus coûteuses. Le suivi effectué dans les sept années après la restauration a montré que le système Cheverie Creek atteignait les objectifs de restauration prévus. Le développement du nouveau marais a dépassé l'étendue prévue de l'habitat de marais côtier, tandis que la zone humide existante présentait des caractéristiques (végétation et sols) qui concordaient bien avec celles du site de référence. Le nouveau régime hydrologique était suffisant pour que les eaux des marées hautes du printemps inondent l'ensemble du marais de 43 ha.

4.3 Îles

Les îles sont généralement des environnements où l'énergie des vagues est relativement élevée et exposés aux processus côtiers. L'élévation du niveau de la mer et la force accrue des tempêtes exigent qu'une attention particulière soit portée aux changements du littoral qui peuvent nuire à la résilience globale d'une île. Les îles fonctionnent souvent comme des barrières protégeant la côte continentale et offrent de nombreux avantages aux régions où elles se trouvent, notamment des loisirs, le maintien de routes pour la navigation, des occasions commerciales et des habitats pour des espèces rares (Gallani et coll., 2021). Une île dans son ensemble peut représenter une SFN, étant donné ses fonctions de protection côtière pour le continent. Elle peut également offrir la possibilité de déployer plusieurs types de SFN à plus petite échelle, comme la création ou la restauration de zones humides ou la création de récifs d'huîtres. La mise en œuvre de SFN peut comporter la création d'îles entières à l'aide de matériaux de dragage, ou la restauration ou l'amélioration de caractéristiques essentielles d'îles existantes. Puisqu'elles sont isolées du continent, certaines îles peuvent offrir des possibilités de SFN uniques, comme la création d'habitats pour soutenir des colonies d'oiseaux marins rares, ce qui pourrait être impossible sur le continent (Babcock et Booth, 2020; Bracey et coll., 2022) (encadré 3). Les SFN qui comportent des îles sont abordées plus en détail dans le document intitulé *Adaptation des infrastructures existantes*.

Les principaux facteurs de résilience des îles sont l'exposition aux vagues et au vent, le transport des sédiments et la végétation. La conception de SFN comportant des îles nécessite une évaluation des conditions antérieures de vagues et de vent, du niveau de la mer, des marées et de la disponibilité des sédiments. Les programmes de suivi d'îles mettent donc l'accent sur les indicateurs qui déterminent la stabilité et la résilience d'une île face aux effets côtiers continus et épisodiques, y compris les changements climatiques. La mise en œuvre de SFN sur des îles et autour d'elles comprend souvent l'ajout ou le déplacement de sédiments, de sorte que les programmes de suivi doivent inclure des indicateurs particuliers pour le transport des sédiments. Il peut s'agir de levés bathymétriques et d'élévation répétés (tableau 3), de la cartographie des éléments submergés, en permanence ou temporairement, comme les vasières, ou d'évaluations périodiques de l'apport régional de sédiments par le suivi de l'érosion côtière, semblables à celles indiquées à la section 4.1, ainsi que des concentrations de sédiments en suspension dans les cours d'eau et des modifications de la bathymétrie (tableaux 3 et 4). Au-delà de la distribution et du mouvement des sédiments à grande échelle, les caractéristiques des sédiments eux-mêmes sont très importantes pour les processus fondamentaux des îles, comme la formation du sol. De ce fait, la taille des particules, la densité apparente et la teneur en matière organique doivent être quantifiées et comparées à des valeurs de référence ou à des valeurs cibles (tableaux 3 et 4).

Les levés d'élévation, souvent effectués le long de transects pour obtenir des profils, sont importants pour déterminer les changements que subit l'île par rapport à l'amplitude des marées, au niveau des eaux ou aux tempêtes. La superficie de l'île à différentes élévations et la hauteur de la crête de l'île peuvent être d'importants indicateurs dans certains cas (tableau 3). L'énergie et la hauteur des vagues (y compris pendant les tempêtes), la vitesse des courants, les taux d'érosion, l'élévation de la montée des vagues ainsi que la fréquence, la durée et la superficie d'inondation ou de débordement sont autant d'indicateurs clés qui peuvent être inclus dans les programmes de suivi des SFN d'îles (tableaux 3 à 5). Dans les environnements septentrionaux, la couverture de glace en hiver peut aussi constituer une importante variable à inclure dans les programmes de suivi, car la glace peut avoir des effets à la fois positifs et négatifs sur le transport des sédiments et sur l'érosion côtière.

Les indicateurs de qualité de l'eau, comme la salinité, les concentrations de sédiments en suspension, la teneur en oxygène dissous et la température (tableau 7) peuvent également être importants, si les objectifs des SFN incluent des zones humides ou des habitats sublittoraux (Gallani et coll., 2021). Les

inventaires de la végétation sont importants pour documenter la couverture et la composition végétales. De même, la couverture des rivages par divers types de débris constitue elle aussi un important indicateur qui peut déterminer le succès des SFN (tableau 5).

Les coûts de construction peuvent être considérablement plus élevés sur les îles que sur le continent. Il est donc essentiel de suivre de près tous les facteurs qui pourraient nuire aux performances des SFN pendant l'étape de construction. Cette approche proactive pourrait réduire les interventions coûteuses une fois l'installation achevée, et assurer une incidence environnementale minimale (Gallani et coll., 2021). Le suivi des effets de la construction pourrait comprendre une inspection visuelle pour détecter les zones où l'équipement aurait pu compacter les sédiments ou altérer les modèles d'écoulement (tableaux 3 et 4). Dans le cas d'îles qui sont relativement isolées des populations humaines, après l'installation d'une SFN, on doit prévoir des visites périodiques du site afin de détecter tout changement causé par des événements soudains, de même que des visites après les tempêtes.

Les îles peuvent s'inscrire dans trois catégories : les îles-barrières, les îles deltaïques et les îles de baie (Gallani et coll., 2021). Les îles-barrières sont généralement longues et étroites et protègent souvent les côtes continentales des tempêtes. Elles s'éloignent souvent de la haute mer par suite de l'enlèvement des sédiments du front (côté haute mer) et de leur dépôt sur l'arrière-plage (Gallani et coll., 2021). Ce processus naturel doit être surveillé afin d'évaluer la résilience globale des îles-barrières. Leur forme étroite fait de la couverture végétale un indicateur très important de leur intégrité face aux tempêtes plus fréquentes et à l'élévation du niveau de la mer (ENM). Les îles deltaïques se forment dans les estuaires par suite de processus de dépôt de sédiments et de l'action des vagues et courants. Les activités humaines altèrent ou réduisent souvent l'apport de sédiments dans les estuaires, donc les indicateurs essentiels de suivi comprennent l'apport de sédiments et les changements d'élévation. Il est important de noter qu'en raison de leur dynamisme, en particulier dans les systèmes sableux, les îles-barrières et les îles deltaïques devraient se déplacer et migrer au fil du temps dans le cadre des processus naturels du littoral. Les îles de baie ou de lac ont généralement une forme plus arrondie que les îles-barrières, mais elles peuvent également subir une migration vers le littoral.

Encadré 3 – Cas particulier : Îles servant de refuges pour les oiseaux

CAS PARTICULIER
Îles servant de refuges pour les oiseaux

Il arrive que des îles soient créées ou qu'un habitat pour soutenir des espèces d'oiseaux en péril soit amélioré (Babcock et Booth, 2020). Les caractéristiques de couverture du substrat (p. ex. : végétation ou gravier) peuvent être importantes pour certaines espèces d'oiseaux et font souvent partie des programmes de suivi (Rock et coll., 2007). Les oiseaux de mer accèdent généralement aux ressources benthiques ou à d'autres types de ressources marines, parfois à des distances considérables de la colonie. Il peut donc être intéressant d'ajouter les dénombrements de ces autres ressources, comme les stocks de poissons, afin de surveiller la disponibilité alimentaire, sur laquelle de nombreux éléments des changements côtiers pourraient influer (Pratte et coll., 2021). En outre, les effets des grandes colonies d'oiseaux de mer sur les îles peuvent entraîner des modifications des substrats, comme l'enrichissement en nutriments; les changements potentiels de la végétation dus à cet apport en nutriments doivent être suivis de près, de même que les niveaux de nutriments du sol dans les cas où des effets négatifs sont probables (tableau 7). De même, tout comme les îles peuvent jouer un rôle important dans la conservation des espèces d'oiseaux en péril, les colonies d'oiseaux de mer peuvent complètement tuer la végétation terrestre et ainsi entraîner la destruction de l'habitat, de l'érosion et une perte de la superficie de l'île (Hebert et coll., 2014). Dans les régions où des espèces comme les cormorans peuvent entraîner ces effets, il est recommandé de surveiller l'utilisation des îles par ces espèces afin d'évaluer le risque de formation de nouvelles colonies.

Étude de cas 5 – Poplar Island

Projet de restauration de Poplar Island
Restauration des zones humides et de l'habitat pour oiseaux

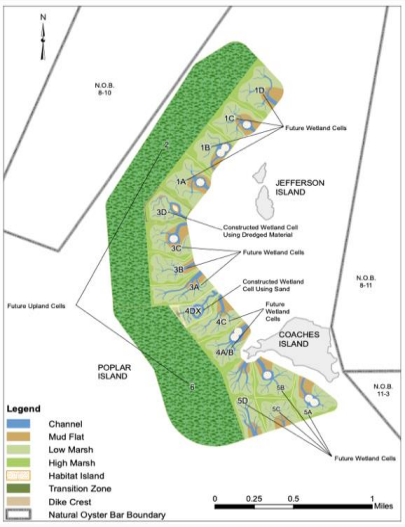
Baie de Chesapeake (Maryland)
États-Unis

Pour le projet de restauration de Poplar Island, dans la baie de Chesapeake, des matériaux de dragage ont été utilisés pour restaurer 460 ha d'habitat. En 2003, les premières interventions ont consisté à créer une parcelle de démonstration de zone humide (13 ha) pour cette SFN. D'autres parcelles ont été ajoutées au cours des 20 dernières années. Les habitats créés comprennent 230 ha de marais côtiers. L'île avait à l'origine une superficie de plus de 400 ha dans les années 1800, mais l'érosion l'avait réduite à environ 2 ha dans les années 1990 (Erwin et coll., 2007).

Le projet est un partenariat entre des agences gouvernementales fédérales et du Maryland. En 2006, les interventions ont commencé par la construction d'une digue extérieure en roches de 6,1 m et de plusieurs digues intérieures délimitant des parcelles plus petites qui devaient être remplies ultérieurement avec des matériaux de dragage pour créer un habitat. Les objectifs du projet étaient d'ajouter 80 % de bas marais et 20 % de hauts marais dans les zones humides, de même que d'autres composantes d'habitat, comme des vasières dégagées, des eaux libres et de petits îlots de nidification. Les espèces cibles pour la création d'habitats comprenaient les sternes, les canards noirs, les balbuzards pêcheurs et les aigrettes.

Le programme de suivi est lié aux objectifs du projet (Derrick et coll., 2007). Chaque indicateur est associé à un objectif quantitatif et à une fourchette de valeurs acceptables. Par exemple, l'indicateur de composition des espèces a un objectif de >80 % de couverture de *Spartina alterniflora* dans les habitats de bas marais créés, et une limite inférieure de >20 % (Derrick et coll., 2007). Les objectifs de superficie d'habitat et de couverture de la flore ont été déterminés en évaluant les besoins en habitat des espèces d'oiseaux cibles et d'autres espèces. D'autres indicateurs comprennent l'utilisation des marais par les poissons, les oiseaux, les invertébrés et l'herpétofaune, les mesures étant la présence ou l'absence des groupes cibles. Pour les aires de nidification, la taille (superficie de l'île au-dessus de la ligne de marée haute), la couverture végétale, la nidification (présence ou absence) et le succès d'envol (nombre de jeunes par nid) ont été les principaux indicateurs utilisés. La plupart des indicateurs ont été évalués chaque année (Derrick et coll., 2007).

Figure 10 – Plan du site de Poplar Island



Source : Derrick et coll., 2007

La présence de prédateurs est un facteur déterminant de la viabilité de nombreuses colonies d'oiseaux de mer, d'où l'importance du suivi pour une détection rapide. Sur Poplar Island, des caméras vidéo à infrarouges ont été installées pour déterminer la présence de hiboux. D'autres interventions sont nécessaires pour maintenir les habitats restaurés, notamment l'élimination de la végétation dans les zones censées en être dépourvues, ou l'ajout de coquillages, de sable ou de gravier (Erwin et coll., 2007).

En 2014, l'analyse d'images aériennes a été ajoutée au programme de suivi (Prosser et coll., 2022). Ces images ont servi à générer des cartes d'habitat, montrant qu'environ 16 ha de hauts marais et 43 ha de bas marais avaient été créés en 2014 (Prosser et coll., 2022). Des canards noirs et des rats musqués se reproduisent dans certaines des cellules créées. L'île abrite désormais la principale colonie de nidification de sternes pierregarin de la baie de Chesapeake.

4.4 Forêts côtières et zones boisées

Les arbres et les arbustes diffèrent des espèces herbacées en ce qu'ils ont des tissus ligneux à longue durée de vie et qu'ils peuvent accumuler une substantielle biomasse aérienne qui est relativement stable dans le temps. Les mangroves sont des arbres qui peuvent être d'importants composants des marais côtiers dans les tropiques; elles sont abordées séparément à la section 4.2. De nombreuses communautés végétales d'importance dans les SFN sont composées de plantes herbacées (p. ex. : graminées qui prédominent dans les marais salins), mais la végétation ligneuse est souvent présente sur terre, juste au-delà des marais côtiers ou des dunes, à de plus hautes élévations. Les habitats riverains peuvent également abriter des communautés forestières et arbustives. Ces forêts ou zones arbustives côtières accomplissent d'importantes fonctions de protection du littoral, comme l'atténuation du vent, l'atténuation des vagues durant les tempêtes extrêmes et la stabilisation des sols grâce à des racines profondes. Les arbres et arbustes peuvent aussi fournir d'importantes composantes d'habitat, notamment des zones de perchage et de nidification pour les oiseaux, et des abris pour les vertébrés terrestres. Les forêts et zones arbustives côtières contribuent également à la diversité végétale à l'échelle du paysage et peuvent abriter des espèces rares. Les autres avantages connexes de la végétation ligneuse sont la séquestration de carbone, le refroidissement microclimatique local et les améliorations esthétiques. Le document intitulé *Adaptation des infrastructures existantes* examine plus en détail les forêts et zones boisées côtières.

Les programmes de suivi pour des sites comptant des forêts et zones arbustives côtières comprennent bon nombre d'indicateurs utilisés pour la végétation herbacée, comme la couverture ou la diversité des espèces. Lorsque la forêt ou la zone arbustive côtière est une composante majeure d'une SFN ou est l'objet de la restauration, on utilise généralement des quadrats plus grands pour obtenir des échantillons représentatifs des communautés végétales composées de spécimens plus grands (p. ex. : des parcelles de 5 m^2 ou de 20 m^2). Dans le cas de SFN axées sur le contrôle de l'érosion, la quantité de sols nus non couverts par la litière, les débris ligneux ou les plantes constitue un facteur clé de l'érosion. Le suivi de la couverture en fonction du substrat nu devient donc très important, en particulier sur les pentes ou les falaises (Ellis et coll., 2022) (tableau 5). Dans les régions où les effets côtiers sont importants et peuvent limiter la taille et la composition des plantes ligneuses, une limite forestière peut être présente sur la côte. Les scénarios d'augmentation de l'activité des tempêtes et d'ENM prévoient un déplacement de cette limite vers l'intérieur des terres. La hauteur des plantes ligneuses est souvent un indicateur des effets de l'exposition côtière (vent, embruns salins, etc.). La pente peut également être un important indicateur de la stabilité des forêts et des zones arbustives, car une biomasse aérienne importante peut favoriser le basculement en cas de vents violents, ce qui peut alors entraîner le soulèvement des racines et l'érosion du substrat, sans parler de la mort des arbres et des arbustes.

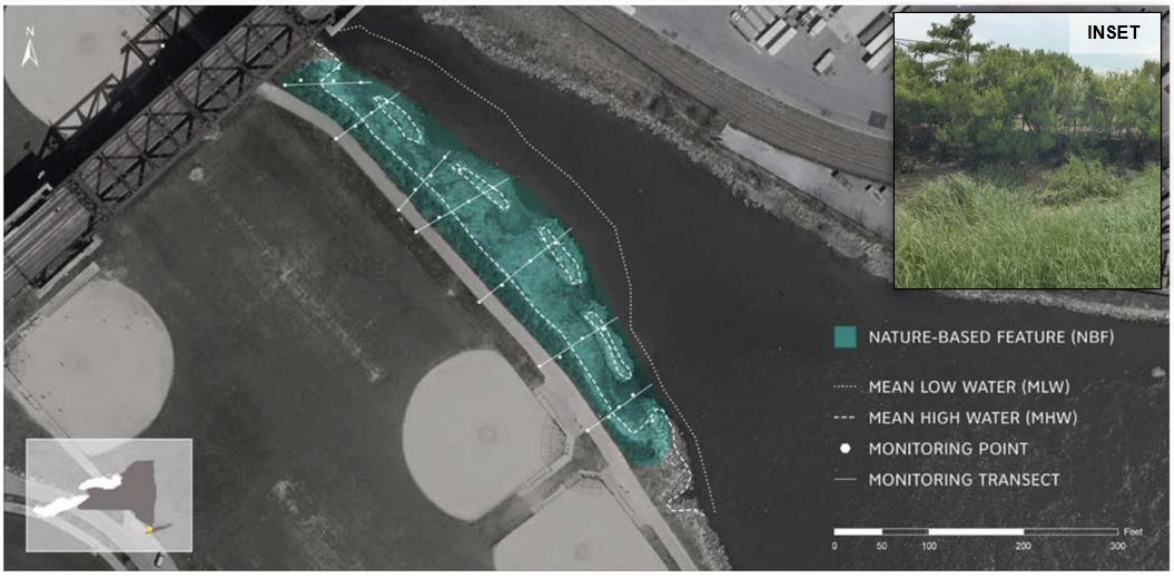
Étude de cas 6 – Aménagement naturel du rivage de Bronx Kill

Aménagement naturel du rivage de Bronx Kill
Restauration du rivage urbain

Harlem River, East River
(New York)
États-Unis

Ce projet comprenait la création d'un habitat de marais salé derrière un seuil rocheux, ainsi que d'un habitat d'arbustes et de broussailles adjacent au marais salé du côté du littoral (Science and Resilience Institute at Jamaica Bay, 2020). Le site présentait à l'origine un rivage dégradé protégé par des enrochements et dépourvu de végétation indigène. *NYC Parks* (Parcs New York) a aménagé cinq îlots rocheux à l'intérieur d'un marais salé pour protéger le littoral. L'habitat d'arbustes et de broussailles ainsi créé comptait deux espèces indigènes d'arbustes halotolérants (*Iva frutescens* et *Baccharis halimifolia*) qui nécessitent une plus haute élévation que le marais salé, où domine la *Spartina alterniflora*. Des scientifiques ont utilisé sept lignes de profil (transects) dont les élévations ont été enregistrées par un GPS RTK avec des points d'évaluation sur chaque transect dans chacune des trois caractéristiques (seuil rocheux, marais salé et zone arbustive). Ils ont procédé à une évaluation sociale en interrogeant les personnes qui utilisent le site (cyclistes, ornithologues, personne ramassant des coquillages, etc.). La *Randall's Island Park Alliance* (Alliance des parcs de Randall's Island) assure l'intendance locale et le suivi du site. Le suivi a révélé une forte croissance de la végétation dans les deux habitats créés, la colonisation des moules indigènes dans le marais salé et l'augmentation de la fréquentation humaine depuis la restauration, principalement à des fins récréatives.

Figure 11 – Site Bronx Kill : composantes du rivage et emplacements des points de suivi



Source : Science and Resilience Institute at Jamaica Bay, 2020
Note : Le médaillon en haut à droite montre les marais salés restaurés et les habitats d'arbustes et de broussailles, vers l'intérieur des terres

4.5 Éléments submergés

Les éléments submergés se trouvent plus bas que la zone intertidale. Cette catégorie comprend principalement la restauration de la flore submergée essentielle (p. ex. : herbiers de zostère, forêts de varechs et récifs coralliens), la création de brise-lames ou de récifs submergés (récifs artificiels et

barres sableuses) ou l'installation de déflecteurs en bois (structure faisant saillie à partir du rivage à un angle par rapport à la direction de l'écoulement, l'angle déterminant la direction dans laquelle l'écoulement est détourné du rivage). Chacun de ces éléments présente des avantages et avantages connexes différents. Bien que les déflecteurs en bois soient traditionnellement des éléments d'eau douce, ils peuvent être adaptés à l'écoulement bidirectionnel des rivières à marées pour rediriger le courant. Leur principal avantage est donc qu'ils peuvent contrôler où se produit l'érosion. Pour leur part, les herbiers de zostères et les forêts de varechs restaurés, ainsi que les récifs créés ou restaurés, ont été largement utilisés dans les systèmes côtiers et constituent des éléments et habitats côtiers essentiels qui abritent une grande diversité de biotes. Non seulement augmentent-ils la production halieutique, mais ils protègent aussi le littoral de l'érosion et des inondations en diminuant l'énergie des vagues et en retenant les sédiments (Oreska et coll., 2021; Orth et coll., 2020; Mora-Soto et coll., 2021; Fabian et coll., 2013). Parmi les autres avantages connexes, on compte : l'amélioration de la qualité de l'eau et la création d'habitats; pour la flore submergée, la séquestration du carbone et de l'azote; et pour les brise-lames submergés, la reconstitution de récifs de corail ou de mollusques (Oreska et coll., 2021; Kroeger, 2012). Le document intitulé *Adaptation des infrastructures existantes* examine plus en détail les éléments submergés.

Pour un suivi et une mise en œuvre réussis d'une restauration de flore et de récifs submergés, les agents de stress qui ont entraîné la dégradation doivent d'abord être cernés, puis atténués ou compensés avant la restauration, et surveillés après celle-ci pour assurer le rétablissement (Orth et coll., 2020). Certains de ces agents de stress peuvent être des facteurs de nature environnementale qui agissent sur de longues périodes, comme les changements climatiques ou l'acidification des océans. Afin d'assurer le succès à long terme d'un projet, la pratique exemplaire consiste à considérer non pas l'habitat seul, mais l'ensemble de l'écosystème (Orth et coll., 2020; Oreska et coll., 2021). Cela comprend la bathymétrie (particulièrement essentielle pour la mise en place de structures de récifs artificiels), l'état et la composition du substrat, la qualité de l'eau, la distance de fetch, la température de l'eau, la profondeur, la granulométrie sédimentaire et les écosystèmes adjacents (qui sont importants pour l'approvisionnement en graines ou en larves de mollusques) (tableaux 3, 4, 5, et 7). Il est également important de prendre en compte les matériaux utilisés pour les projets, et de choisir ce qui est approprié selon les conditions, en évitant d'utiliser inutilement des matières plastiques (Walters et coll., 2022). Le suivi de la flore submergée fait appel à bon nombre d'indicateurs décrits pour la végétation herbacée (voir la section 4.4, « Forêts côtières et zones boisées »), y compris des quadrats de végétation et l'enregistrement des attributs de l'habitat, comme la diversité des espèces végétales, la biomasse, la couverture de surface ou la densité des pousses (Orth et coll., 2020; Oreska et coll., 2021; Mora-Soto et coll., 2021). Pour le suivi des récifs et des brise-lames submergés, les caractéristiques biologiques (p. ex. : la diversité et l'abondance des espèces de poissons ou des premiers stades d'évolution biologique et les patrons de recrutement des poissons) et les caractéristiques physiques (p. ex. : les modifications de la forme du récif, de la vitesse d'écoulement, de la profondeur et du substrat au fil du temps) doivent être évaluées. Un aspect qui peut être négligé, bien qu'il soit important pour le succès à long terme d'un récif dans la promotion de la biodiversité (si c'est l'un des objectifs du projet), est le suivi des espèces envahissantes, de l'accumulation des mattes algales et de la sédimentation, ainsi que de la vitesse des vagues et des courants sur les récifs (s'ils sont trop puissants, les œufs de poissons peuvent être endommagés) (McLean et coll., 2015; Hylkema et coll., 2021).

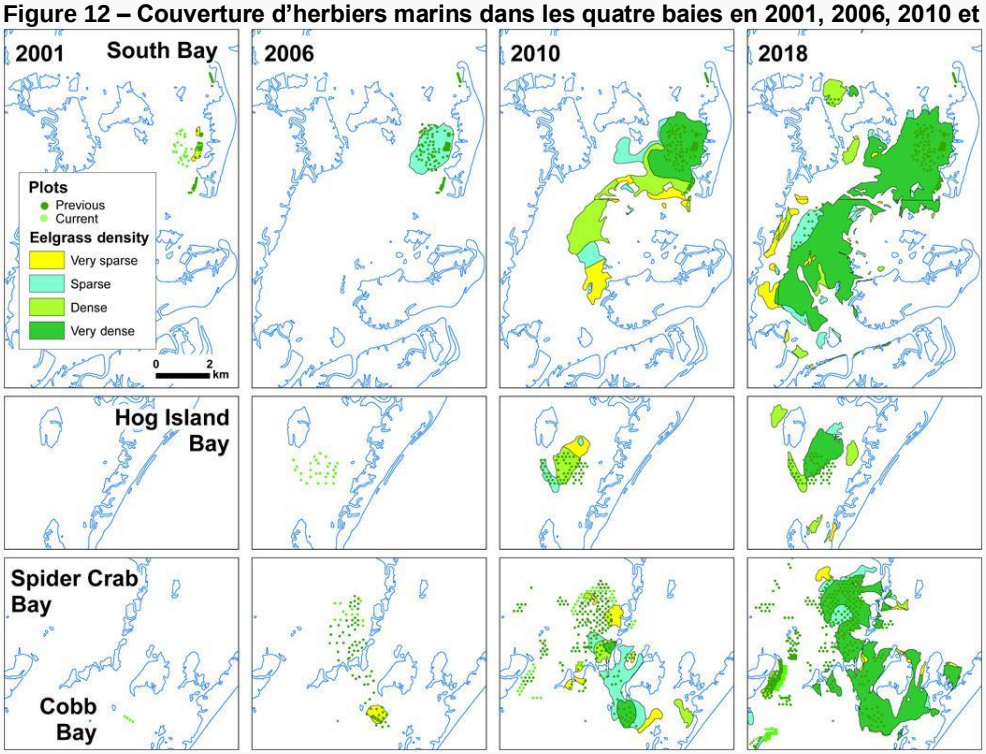
Étude de cas 7 – Restauration d'herbiers de zostères sur la côte est de la Virginie

Restauration d'herbiers de zostères sur la côte est de la Virginie — Virginie, États-Unis

Restauration à grande échelle d'habitats essentiels pour des espèces importantes sur le plan culturel et social

Ce projet de restauration d'herbiers de zostères est le plus grand projet réussi en son genre au monde. Dans les années 1930, ouragans et maladies ont anéanti les herbiers de zostères d'une partie de la côte est de la Virginie. Cette destruction a entraîné l'effondrement quasi total de l'écosystème et entraîné la disparition des coquilles Saint-Jacques et la raréfaction des poissons et crabes. À la fin des années 1990, des graines ont commencé à être récoltées dans la rivière York pour les disperser dans la baie de Seaside, ce qui a mené à une germination réussie. Devant ce succès, la portée du projet a été étendue en y ajoutant des objectifs : promouvoir l'écotourisme et la construction d'infrastructures, retirer les roseaux envahissants, effectuer des recherches sur l'habitat des oiseaux de rivage, éliminer les prédateurs des oiseaux de rivage, mettre en œuvre des pratiques exemplaires de gestion de l'aquaculture, réaliser l'inventaire et l'aménagement de récifs d'huîtres, lancer des initiatives de sensibilisation du public et réintroduire la coquille Saint-Jacques dans les herbiers marins. Au cours des dernières décennies, dans une zone qui avait complètement perdu sa couverture de zostères, 9 000 acres (environ 3 642 ha) ont été rétablis. Ce résultat est attribué à l'importante participation de bénévoles, qui ont collecté et répandu 37,8 millions de semences de zostères dans quatre baies, couvrant une superficie de 309 acres (environ 125 ha). Les principaux paramètres suivis comprenaient un échantillonnage spatialement intensif de la qualité de l'eau ainsi qu'un suivi continu à emplacement fixe de la densité et la couverture spatiale des zostères, de la chlorophylle et des niveaux de turbidité.

Figure 12 – Couverture d'herbiers marins dans les quatre baies en 2001, 2006, 2010 et 2018



Source : Orth et coll., 2020

Note : La couleur de chaque polygone indique l'estimation de la couverture (très clairsemée, 1 à 10 %; clairsemée, 11 à 40 %; modérée, 41 à 70 %; dense, 70 à 100 %). Dans chaque encadré, les petits carrés représentent des parcelles de restauration

4.6 Éléments hybrides

Les éléments hybrides peuvent utiliser un large éventail d'éléments gris et verts afin de créer des écosystèmes diversifiés. Les SFN sont considérées comme hybrides lorsque des éléments gris, comme des coquilles d'huîtres, des rondins, des « biologs/biomats » (fabriqués à partir de matériaux naturels et biodégradables, souvent des coques de noix de coco) ou des pierres, sont utilisés pour améliorer le rôle d'éléments de rivage verts, comme la végétation, le sable et le gravier. Les éléments hybrides peuvent également résulter de l'adaptation ou de la modification d'infrastructures grises existantes. De nombreux projets d'adaptation, voire la plupart, n'utiliseront pas nécessairement une SFN seule (ce qui constituerait un retour à des processus entièrement naturels) et seront donc classés comme éléments hybrides. Voir le document intitulé *Adaptation des infrastructures existantes* pour de plus amples renseignements sur l'adaptation au moyen d'éléments hybrides.

Pour les SFN hybrides, des éléments gris doivent être utilisés lorsqu'ils soutiennent les processus du système et peuvent améliorer la fonction des éléments de rivage verts. C'est donc dire qu'en général, leur taille et leur étendue doivent être minimisées et leur conception réalisée avec soin pour limiter leurs répercussions sur les processus côtiers. Un exemple de SFN hybride : la construction d'un rivage vivant avec un seuil, une approche courante sur la côte est des États-Unis dont la mise en œuvre commence tout juste au Canada. Au Yucatán, des chercheurs de l'Université nationale autonome du Mexique (UNAM) ont également adopté et surveillent l'utilisation d'une nouvelle structure de bambou et de corde pour favoriser la croissance des dunes (étude de cas 8).

Les éléments gris peuvent également être enterrés sous le rivage vert pour apporter une protection supplémentaire lors d'événements extrêmes. Par exemple, un revêtement enterré dans un système dunaire peut fournir une protection supplémentaire lors de fortes tempêtes, mais il est conçu pour permettre le transport du sable et les processus dunaires naturels (y compris le rétablissement) après des tempêtes plus faibles. Dans certains cas, des géotextiles enfouis remplis de sable ont été utilisés.

Des solutions hybrides sont souvent envisagées lorsque les gestionnaires d'actifs veulent améliorer les avantages connexes (p. ex. : l'adéquation de l'habitat) associés à l'infrastructure grise existante. Ou encore lorsqu'il existe une grande incertitude concernant les performances des SFN, en particulier sur les littoraux avec un fetch plus important ou des phénomènes côtiers de plus grande énergie. 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 lorsque ce n'est pas entièrement nécessaire. Cette pratique limite les avantages connexes potentiels du projet et ne permet pas de tirer profit des apprentissages et recherches liés à l'utilisation des SFN. Par conséquent, les solutions hybrides peuvent produire plus d'impacts environnementaux sur les littoraux que des protections de rivage vertes et des rivages naturels laissés intacts (Green Shores for Homes, 2022).

Le suivi des SFN hybrides doit prendre en compte tant les composants d'infrastructure grise que les éléments naturels, de même que les indicateurs de performance du système dans son ensemble. Par conséquent, les SFN hybrides pourraient exiger des indicateurs de performance complémentaires (comparativement aux SFN comptant moins de composantes), qu'il faut déterminer pour chaque projet. Le suivi doit permettre d'évaluer la valeur actuelle et future des avantages en matière de protection ou autres (écologiques, sociaux et économiques) (Suedel et coll., 2021). Il est particulièrement instructif de comparer l'option hybride et un analogue naturel pour déterminer si les éléments structuraux (gris) étaient vraiment nécessaires. En outre, l'interaction et la rétroaction potentielle entre éléments gris et verts de SFN hybrides (p. ex. : l'affouillement) doivent être surveillées. Dès le début du projet, une équipe multidisciplinaire et multisectorielle doit élaborer ensemble un cadre de suivi. Le développement d'un langage de travail commun pour favoriser la discussion, la collaboration et la réflexion entre personnes participant au projet constitue un élément essentiel de ce processus (Wijsman et coll., 2021).

Étude de cas 8 – Clôture de dunes innovante pour les plages de Sisal et de Chelem

Plages de Sisal et de Chelem — Yucatán, Mexique

Promotion et suivi du front de croissance des dunes avec une nouvelle technique de clôture hybride

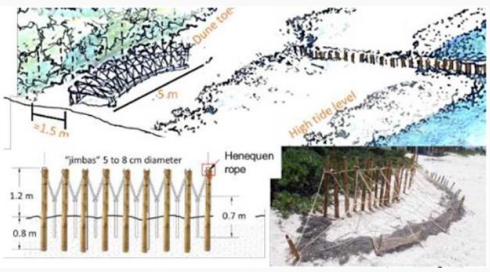
Les plages de Sisal et de Chelem se trouvent sur la côte nord de la péninsule du Yucatán, à environ 30 km les unes des autres. Les plages de Chelem sont fortement urbanisées et ont fait l'objet de nombreuses modifications au fil des ans, comme l'aménagement d'épis (Leija et Lomas, 2018). La communauté de Sisal est moins développée, mais elle connaît une urbanisation rapide, ce qui la rend plus vulnérable aux événements extrêmes. Étant donné la faible élévation des dunes et l'absence de végétation dunaire, Chelem est aujourd'hui plus vulnérable que jamais à l'érosion et aux inondations. Pour sa part, Sisal risque de subir une compression côtière, soit la perte d'habitat naturel due aux nouveaux aménagements qui empêchent la transgression vers l'intérieur des terres. La communauté risque une perte importante de dunes.

La compression côtière à Chelem limite l'espace pour la restauration des dunes. À Sisal, la densité urbaine plus faible permet une restauration et une conservation meilleures des dunes côtières. Des étudiants de l'UNAM ont reçu une bourse de la fondation Bepensa pour restaurer les dunes de Sisal à l'aide de matériaux recyclés. Dans le cadre de son projet intitulé *Reciclando Dunas* (Recyclage des dunes) (https://www.reciclandodunas.org/), l'équipe a réussi à planter plus de 13 000 plantes de dunes indigènes, couvrant une superficie de 5 500 m^3. Elle a mis en place un programme de suivi utilisant des vols de drones pour suivre l'évolution de la couverture terrestre. Bien que le programme de suivi n'ait pas été financé dans le cadre du projet, l'équipe a pu utiliser les ressources et l'expertise de l'université pour lancer le programme. Malheureusement, ce programme a été interrompu prématurément en raison de restrictions liées à la pandémie, et l'équipe n'a pu effectuer qu'un seul vol de drone avant le confinement.

Les cas de Chelem et de Sisal illustrent la difficulté d'obtenir du financement pour les programmes de suivi. Toutefois, la collaboration avec des instituts de recherche peut fournir des ressources et une expertise supplémentaires pour soutenir ces travaux. Dans le cas du projet de Sisal, la reprise du programme de suivi est prévue grâce à des ressources de l'UNAM. Ce programme devrait comprendre les éléments suivants :

- *Indicateurs de performance :* couverture végétale (m^2), nombre d'espèces, biodiversité (indice de Shannon), nombre d'espèces envahissantes éliminées, changement volumétrique (m^3/m) et changement granulométrique.
- *Durée et fréquence :* 24 mois avec des levés tous les quatre mois.
- *Techniques :* quantification de la couverture végétale à partir d'images prises par des drones; suivi au moyen de carrés de 2 m^2 placés au hasard le long de la bande de dunes côtières.

Figure 13 – Croquis et photo de la structure de biomimétisme des dunes



Source : Leija et Lomas, 2018

4.7 Discussion complémentaire sur les techniques

Comme décrit dans les sections précédentes, divers facteurs influent sur la sélection d'indicateurs de performance : climat, conception du programme de suivi, objectifs du projet, accès à l'expertise et à l'équipement et contraintes budgétaires. De nombreux indicateurs sont compatibles avec plus d'une méthode (p. ex. : caractérisation de l'habitat par cartographie ou analyse statistique) et leurs techniques et technologies correspondantes (p. ex. : imagerie par drone par opposition à une liste d'espèces ou à des indices de végétation). Bon nombre des techniques présentées au chapitre 3 imposent des compromis en matière de coût, de précision ou d'intensité et doivent ainsi faire l'objet d'un examen minutieux. Le tableau 12 donne des exemples de considérations possibles pour la sélection de techniques dans le cadre de trois projets indicatifs et théoriques de marais côtiers au Canada, au Mexique et aux États-Unis. Le tableau souligne le besoin de prendre en compte le climat, le type de SFN et le contexte réglementaire, entre autres. Il convient également de noter que les techniques de suivi évoluent constamment et que le présent guide est un document évolutif.

Tableau 12 – Considérations et conséquences possibles de la sélection de techniques dans le cadre d'un programme de suivi des marais côtiers

Type de zone humide, région	Exemples de considérations relatives aux techniques de suivi	Conséquences
Marais salés, Est du Canada	Zonation typique de marais salé (bas marais de *Sporabolus alterniflorus* et haut marais de *Sporabolus pumilus*)	Faible diversité des espèces (bénéfique pour l'identification des espèces, mais problématique pour certains indices de végétation; dénombrement difficile des tiges).
	Conditions hivernales avec températures variables et couverture de glace ou de neige	Panne d'équipement et accès restreint au site à cause des conditions météorologiques.
	Cadre réglementaire du Canada (p. ex. : *Règlement de l'aviation canadien* pour les drones; permis scientifiques du ministère des Pêches et des Océans)	Demande précoce des permis exigibles pour procéder à des travaux d'échantillonnage.
Marais saumâtres, sud-est des États-Unis (golfe du Mexique)	Zonation de marais salés déterminée par la confluence d'eau salée et d'eau douce (*Sporabolus pumilus* et *Juncus roemerianu*)	Diversité des espèces possiblement élevée. Intrusion d'eau salée due aux changements climatiques qui pourrait entraîner des changements imprévisibles dans l'écosystème.
	Effets du transport maritime et d'activités industrielles intenses (p. ex. : extraction pétrolière)	Risques pour l'équipement et l'accès; pourraient être des facteurs d'adaptation ou de perturbation.
	Cadre réglementaire des États-Unis (p. ex. : règlements sur les zones humides de l'Agence de protection de l'environnement)	Demande précoce des permis exigibles pour procéder à des travaux d'échantillonnage.
Marais à mangroves, Sud-Ouest du Mexique	Zonation de marais à mangrove (*Rhizophora mangle* en zone intertidale et *Avicennia germinan* à de plus hautes élévations)	Les espèces ligneuses de grande taille exigent des zones d'échantillonnage plus vastes. L'accès aux eaux stagnantes peut être difficile.
	Climat chaud avec précipitations suffisantes	Restriction de l'accès peu probable à cause de mauvaises conditions météorologiques.
	Manque d'infrastructures et de main-d'œuvre qualifiée, faible densité de population	Le programme de suivi doit assurer la continuité du programme et la disponibilité des ressources. Le recours à des approches participatives et de faible technicité (p. ex. : la science participative) pourrait être utile.

5 Considérations relatives à l'analyse des données, à l'accès à celles-ci et à leur diffusion

À une époque où les changements climatiques visent et touchent tout le monde, il est essentiel de collaborer pour trouver des solutions à ce vaste et complexe enjeu. L'une des meilleures façons d'y parvenir est par le partage d'information. La meilleure façon de s'assurer que l'information partagée sera bien comprise consiste à établir un cadre (un guide des protocoles pour indicateurs particuliers, et des paramètres de performance pour un projet particulier). Des protocoles d'échantillonnage reconnus et fondés sur des données probantes doivent aussi être utilisés, et des rapports standards doivent être adoptés, autant que possible. Des rapports standards permettent d'assurer que les nouveaux projets prennent en compte les enseignements tirés de projets antérieurs (Eger et coll., 2022). Les types et les objectifs de projets SFN sont très variés, mais des rapports standardisés et déterminés dès le début d'un projet produiront des données et résultats plus susceptibles d'être comparables à ceux d'autres projets. Ainsi, le biais de publication, soit la présentation sélective de résultats positifs peut ainsi être réduit. Il est recommandé que les rapports comprennent au minimum :

- une présentation du projet, de ses objectifs et de ses échéanciers;
- une description de tous les sites, de l'étude et des témoins, ainsi que toute information historique pertinente sur les sites (p. ex. : le site témoin du marais côtier a connu une activité agricole il y a 100 ans, mais est resté en friche et inutilisé pendant les 75 dernières années);
- une description détaillée des méthodes, des protocoles et des analyses;
- les résultats et les discussions sur les résultats;
- les conclusions;
- les métadonnées, sous forme d'annexe contenant des renseignements comme les points de référence utilisés, les coordonnées géographiques, les licences, la propriété et les restrictions liées aux données, des renseignements complémentaires sur les données, y compris les noms et formats des fichiers. Ces renseignements peuvent aussi se trouver dans un fichier texte « Lisez-moi » qui accompagne les données (au lieu d'être en pièce jointe du rapport). Le document doit alors diriger le public vers ce fichier.

Les rapports doivent inclure, dans la mesure du possible, des renseignements comme les succès ***et les échecs*** d'un projet (Dumitru et coll., 2021). Il est important de rendre compte des échecs afin que d'autres puissent apprendre des erreurs passées et ainsi éviter de gaspiller des ressources précieuses. Idéalement, les indicateurs sociaux, culturels et économiques, et pas uniquement les indicateurs écologiques, d'un projet devraient aussi figurer dans le rapport pour déterminer le succès d'un projet sur les trois plans : environnemental, sociétal et économique (Eger et coll., 2022; Dumitru et coll., 2021; Halpern et coll., 2013).

L'analyse des données est essentielle pour comprendre la trajectoire et le « succès » d'un projet. De nombreuses analyses et manipulations de données sont possibles : des techniques de statistique ou de cartographie de base aux techniques plus avancées. Les statistiques et la cartographie, dans une certaine mesure, sont essentielles pour présenter et comprendre les résultats obtenus à partir des données collectées. La cartographie est un moyen particulièrement utile de comparer visuellement les changements écologiques après la mise en œuvre d'un projet SFN. Grâce à la popularité des systèmes d'aéronefs télépilotés (drones), la cartographie aérienne est désormais de plus en plus accessible et utile pour collecter des données. Le degré de complexité des analyses dépendra fortement de l'expertise et des ressources disponibles pour le projet. Quel que soit le degré de complexité de la collecte et de l'analyse des données, il est important d'établir des protocoles d'assurance et de contrôle de la qualité et de les intégrer dès le départ dans le plan de suivi. Dans la mesure du possible,

la pratique exemplaire consiste à utiliser des techniques et des méthodes standards et reconnues, entre autres, stocker l'ensemble de l'information et des métadonnées pertinentes, documenter toutes les formes de manipulation des données et s'assurer que les données représentent fidèlement les conditions observées. **La transparence et la reproductibilité des données sont essentielles.**

En ce qui concerne la gestion des données, il est recommandé d'adopter la méthode FAIR (données trouvables, accessibles, interexploitables et réutilisables), comme le décrivent Wilkinson et coll. (2016). Pour que les données soient trouvables, on peut utiliser des référentiels établis comme figshare, Knowledge Network for Biocomplexity (KNB), etc. L'accessibilité requiert que les données soient lisibles par machine et dans des formats de fichiers qui n'exigent pas de logiciel propriétaire (exemple de format de fichier accessible : .csv). Pour que les données soient interexploitables (qu'elles puissent être échangées avec d'autres) et réutilisables, elles doivent être compréhensibles. Ainsi, les données doivent avoir des descripteurs complets (c.-à-d. des spécifications d'unités, des définitions d'abréviations et des titres de colonnes); être clairement organisées (c.-à-d. que si vous utilisez Excel, tous les onglets du classeur doivent être clairement identifiés et tous les titres de colonnes et toutes les étiquettes de variables doivent être cohérents entre les onglets); avoir un formatage standardisé (p. ex. : ne pas inclure de code couleur dans les cellules); avoir des titres de colonnes et des étiquettes de variables cohérents (y compris dans le rapport connexe); toutes les données ou les étiquettes de données doivent être dans une seule langue; et des métadonnées détaillées doivent être incluses (p. ex. : descriptions des titres de colonnes, des abréviations et des unités, quelles figures ou analyses correspondent à quelles données, etc.). Toujours procéder à un contrôle de qualité (Roche et coll., 2015). Roche et coll. dressent une liste des pratiques exemplaires en matière de gestion des données, qui se résume comme suit :

- Archiver attentivement les données publiques;
- Faire en sorte que les données soient trouvables;
- Fournir des métadonnées détaillées;
- Utiliser des noms de fichiers descriptifs;
- Archiver les données non traitées;
- Utiliser des formats de fichiers standards;
- Faciliter l'agrégation des données;
- Procéder au contrôle de la qualité;
- Choisir une licence de publication;
- Décider d'un embargo.

Pour réduire les erreurs et assurer la cohérence de l'évaluation entre les sites, des fiches de terrain standardisées que l'on peut adapter au projet SFN particulier ou à l'organisation qui mène le programme de suivi peuvent être utilisées. L'élaboration de la fiche de suivi peut également servir à recueillir les réactions d'autres spécialistes en la matière et de membres de la communauté. Le guide intitulé *Monitoring Habitat Restoration Projects : U.S. Fish and Wildlife Service Pacific Region Partners for Fish and Wildlife Program and Coastal Program Protocol* (Suivi des projets de restauration de l'habitat : protocole du Programme de partenaires pour le poisson et la faune et du Programme côtier du Service des pêches et de la faune des États-Unis, région Pacifique) contient des exemples de fiches de suivi (Woodward et Hollard, 2011).

Le document intitulé *Suivi de l'efficacité* comprend des renseignements complémentaires sur l'analyse des données, l'accès à celles-ci, leur stockage et leur diffusion.

6 Possibilités et orientations futures

Il est amplement reconnu que la science participative est un mouvement utile qui permet aux personnes sans expertise professionnelle de participer à la surveillance de l'environnement. La participation de personnes résidentes au suivi des SFN est également un excellent moyen de sensibiliser aux avantages des projets SFN et de susciter un sentiment d'appartenance et d'affinité. De nombreux indicateurs clés de suivi énumérés plus haut font appel à des techniques simples applicables à grande échelle et à peu de frais, moyennant peu de formation. Toutefois, certains sont plus difficiles à mettre en œuvre sans équipement spécialisé ou sans expertise en la matière ni participation professionnelle (encadré 4). Les approches combinées qui associent spécialistes et membres de la collectivité peuvent renforcer l'autonomie locale et la participation des communautés. Parmi les options possibles, on compte les plateformes de cartographie et de partage de données d'histoire naturelle en libre accès, comme iNaturalist et eBird, auxquelles tout le monde peut contribuer; des spécialistes peuvent néanmoins vérifier facilement les identifications d'espèces. Des réseaux de capteurs peu coûteux sont également en développement pour rendre encore plus accessibles de puissantes technologies (Mao et coll., 2019). D'autres percées ont rendu certaines technologies, comme les systèmes d'aéronefs pilotés à distance, moins coûteuses et plus accessibles aux membres de la collectivité. Certains indicateurs économiques (p. ex. : les indicateurs économiques complémentaires indiqués dans le tableau 11) pourraient être plus difficiles à intégrer dans les programmes de suivi de projets de science participative. Plus de recherches sont nécessaires sur la façon dont les communautés pourraient utiliser ces importantes composantes des projets de suivi (encadré 4).

L'accumulation d'observations scientifiques sur la façon d'élaborer et de mettre en œuvre des SFN efficaces favorisera leur utilisation appropriée et l'adoption de projets SFN. Il faut toutefois fournir des méthodes plus intégratives aux équipes multidisciplinaires, étant donné le large éventail d'objectifs de performance. Les scientifiques et les ingénieur·es qui conçoivent et évaluent les SFN doivent communiquer davantage pour diffuser leurs résultats à un public plus large, par exemple en abordant les communautés sur les médias sociaux, en préparant des exposés de politiques ou des résumés de recherche en langage clair, et en collaborant avec des membres de la collectivité dans le cadre de programmes de suivi. Les architectes paysagistes, par exemple, préparent depuis longtemps des documents visuels compréhensibles et accessibles au public pour communiquer les avantages et les conditions futures des projets de GRI et de SFN. Par exemple, le projet *Living with Water* (Cohabiter avec l'eau) rassemble une équipe multidisciplinaire et diversifiée pour aider les communautés vivant sur la côte sud de la Colombie-Britannique à se préparer à l'élévation du niveau de la mer et aux inondations et à s'y adapter, dont de nombreuses solutions portent sur des SFN[1]. L'équipe du projet comprend des universitaires, des spécialistes, des Premières Nations, des organisations non gouvernementales (ONG), des fonctionnaires et des gestionnaires de différents ordres de gouvernement. Elle élabore de nouveaux outils de planification, de conception et de prise de décisions qui « mettent de l'avant les valeurs communautaires, et les perspectives et connaissances autochtones dans la planification de l'adaptation côtière », « élargissent l'espace de solution » en y incluant les SFN et « fournissent des recommandations pour les accords de gouvernance régionale afin de guider les solutions intégrées d'adaptation aux inondations côtières[1] » [*traduction*].

[1] https://www.livingwithwater.ca/

Encadré 4 – Possibilités et orientations futures quant aux méthodes et indicateurs de suivi des SFN, et le type d'obstacle qu'elles écartent

Possibilités et orientations futures	Type d'obstacle écarté			
	Social	Technique	Environ.	Institutionnel
1. Organiser ou financer des séances, des ateliers, des formations et des séminaires sur les méthodes de suivi.	✓	✓		✓
2. Encourager la participation de diverses parties prenantes (responsables des politiques, peuples autochtones, groupes sociaux, etc.) durant tout le cycle de vie du projet.	✓	✓		✓
3. Combiner des approches qui associent spécialistes et membres de la collectivité afin de renforcer l'autonomie locale et la participation des communautés.	✓	✓		✓
4. Favoriser l'échange et la cartographie de données en libre accès.		✓		✓
5. Poursuivre les recherches sur la participation de communautés aux projets de suivi.	✓			✓
6. Diffusion accrue par les scientifiques et ingénieur·es qui conçoivent et évaluent les SFN (p. ex. : utiliser davantage les médias sociaux).	✓			
7. Encourager et mettre en lumière les études de cas présentant des résultats à long terme.		✓	✓	✓
8. Rendre accessibles au public les données de suivi existantes ou historiques.	✓	✓		✓
9. Établir ou trouver des guides techniques standards du secteur sur les méthodes de suivi (à l'intention des spécialistes).		✓		
10. Exiger des équipes de projet qu'elles s'engagent à diffuser leurs données (y compris les échecs).		✓		
11. Fournir aux gouvernements et autres organisations concernés les lignes directrices existantes sur les méthodes de suivi.				✓
12. Faire en sorte que le financement du suivi soit proportionnel aux fonds pour les dépenses de capital des projets.				✓
13. Poursuivre les initiatives en cours pour valoriser les actifs de capital naturel que procurent les SFN et la valeur du suivi à long terme des SFN.	✓			✓

7 Conclusions

Le suivi est une composante essentielle de tout projet de GRI, y compris les projets SFN. C'est à l'étape de cadrage du projet que doit avoir lieu la conception d'un programme de suivi, afin d'en évaluer la faisabilité globale, que les données provenant du suivi précoce éclairent la conception, et d'établir les conditions de base aux fins de comparaisons ultérieures. Les programmes de suivi doivent inclure des indicateurs de succès du projet pour permettre la gestion adaptative après la mise en œuvre. En général, ces programmes comprennent un ou plusieurs sites de référence représentatifs des conditions cibles, et des comparaisons périodiques avec les conditions de référence afin d'évaluer la performance des SFN. La méthode avant-après–contrôle-impact (BACI) et l'approche des conditions de référence (ACR) sont deux méthodes exemplaires recommandées pour cette évaluation. Il faut aussi reconnaître que les conditions de base peuvent changer au fil du temps à cause des changements climatiques, c'est pourquoi il est conseillé d'assurer un suivi continu des conditions autant dans le site du projet SFN que dans les sites de référence. De plus, il est recommandé d'effectuer un suivi post-tempête afin de vérifier la résilience de projets SFN aux événements perturbateurs.

Les indicateurs de performance qui déterminent le succès des projets SFN peuvent être groupés en quatre catégories :

- Les **indicateurs de gestion des risques d'inondation** répondent habituellement aux objectifs primaires des SFN en zones côtières : réduire la probabilité d'inondation et améliorer la gestion des sédiments. Ces indicateurs portent aussi sur les éléments des SFN et leur conformité aux critères structuraux ou autres. Les autres catégories peuvent être considérées comme des avantages connexes, mais elles constituent souvent elles-mêmes des critères primaires de succès, selon le projet. On compte onze indicateurs de performance de base et huit indicateurs complémentaires, qui sont présentés à la section 3.2.
- Les **indicateurs environnementaux** comprennent la biodiversité et d'autres considérations relatives à la qualité des habitats créés ou restaurés. Cette catégorie comprend également des indicateurs de séquestration de carbone et d'atténuation des changements climatiques. On compte treize indicateurs de performance de base et vingt-deux indicateurs complémentaires, qui sont présentés à la section 3.3.
- Les **indicateurs sociaux** concernent les effets sur les personnes qui interagissent avec les SFN et peuvent inclure l'évaluation des changements de comportement, des perceptions par rapport aux SFN ou des zones environnantes, ou des qualités moins tangibles, comme le sentiment d'appartenance à un lieu. On compte treize indicateurs de performance de base et sept indicateurs complémentaires, qui sont présentés à la section 3.4.
- Les **indicateurs économiques** tentent d'évaluer les changements dans les économies locales suite à la mise en œuvre de SFN, y compris les changements dans les activités de loisirs ou de subsistance, dans les réclamations d'assurance et dans les retombées économiques plus larges. On compte quatre indicateurs de performance de base et neuf indicateurs complémentaires, qui sont présentés à la section 3.5.

Les contextes écosystémiques de la mise en œuvre des SFN varient considérablement selon que le projet porte sur des zones humides, des éléments sublittoraux (p. ex. : création de récifs d'huîtres), des îles (ou à proximité d'îles), une approche hybride qui inclut des structures d'ingénierie grises, ou une combinaison d'écosystèmes. Le climat régional pourrait aussi imposer l'ajout d'indicateurs complémentaires, comme la couverture de glace, aux programmes de suivi. Le présent document propose une vue d'ensemble des différents types d'écosystèmes et des critères particuliers qui peuvent éclairer les programmes de suivi.

Le suivi des SFN produit des données importantes non seulement pour le projet en question, mais aussi pour d'autres qui voudraient mettre en œuvre des SFN ailleurs. Une saine gestion des données doit faire en sorte que d'autres pourront facilement accéder aux ensembles de données, les utiliser et les reproduire. Heureusement, les personnes faisant la promotion des SFN peuvent adopter des protocoles établis pour archiver et partager les données. Enfin, bien qu'il existe de nombreux protocoles de suivi appropriés pour toute une série de situations concernant les SFN, leur coût peut constituer un frein, en particulier pour les groupes communautaires. À l'heure actuelle, l'évaluation de nombreux indicateurs requiert des compétences techniques et des coûts substantiels, donc des recherches supplémentaires sont nécessaires pour mettre au point des solutions de suivi peu coûteuses et accessibles.

Bibliographie

Babcock, M., et V. Booth (2020), *Tern Conservation Best Practice: Habitat Creation and Restoration*, à l'adresse : <http://roseatetern.org/uploads/3/5/8/0/35804201/babcock_and_booth__2020__habitat._creation_and_restoration._tern_conservation_best_practice.pdf>.

Bartolucci, N. N., T. R. Anderson et K. A. Ballantine (2021), « Restoration of retired agricultural land to wetland mitigates greenhouse gas emissions », *Restoration Ecology*, vol. 29, nº 3, article e13314.

Bird, E. C. F., et M. L. Schwartz (1985), *The World's Coastline*, New York, Van Nostrand Reinhold Co., xiii + 1071 p.

Bowman, M. F., et K. M. Somers (2005), « Considerations when using the reference condition approach for bioassessment of freshwater ecosystems », *Water Quality Research Journal*, vol. 40, nº 3, p. 347-360.

Bowron, T. M., J. Graham, K. Ellis, C. McFadden, E. Poirier et D. van Proosdij (2019), *Managed Realignment and Restoration of the Converse Salt Marsh (NS044), 2018-19 Summary Report*, préparé pour le ministère des Pêches et des Océans et le ministère de l'Agriculture de la Nouvelle-Écosse, publication nº 14, Halifax (Nouvelle-Écosse).

Bowron, T. M., J. Graham, K. Ellis, E. Poirier, J. Lundholm, S. Lewis, M. Elliott, E. Rogers et D. van Proosdij (2022), *Post-restoration monitoring (year 3) of the Converse Salt Marsh Restoration (NS044), 2021-22 Summary Report*, préparé pour le ministère des Pêches et des Océans et le ministère de l'Agriculture de la Nouvelle-Écosse.

Bracey, A., S. Kolbe, S. Nelson, F. Strand et A. R. Grinde (2022), *Interstate island habitat restoration: phase III – Long-term monitoring and maintenance plan common tern monitoring & Migratory Shorebird Assessment Final Report*, Université du Minnesota à Duluth, à l'adresse : <https://hdl.handle.net/11299/241490>.

Braun, D. C., K. E. Smokorowski, M. J. Bradford et L. Glover (2019), *Examen de la surveillance fonctionnelle pour évaluer les activités d'atténuation, de restauration et de compensation au Canada*, Secrétariat canadien des avis scientifiques du ministère des Pêches et des Océans, document de recherche, 2019/057, vii + 75 p.

Bridges, T. S., J. K. King, J. D. Simm, M. W. Beck, G. Collins, Q. Lodder et R. K. Mohan (2021), *International guidelines on natural and nature-based features for flood risk management*, Vicksburg, Mississippi (États-Unis), Army Engineer Research Development Center, à l'adresse : <https://hdl.handle.net/11681/41946>.

Brooks, S. S., M. A. Palmer, B. J. Cardinale, C. M. Swan et S. Ribblett (2002), « Assessing stream ecosystem rehabilitation: limitations of community structure data », *Restoration Ecology*, vol. 10, nº 1, p. 156-168.

Bush, E., et D. H. Lemmen (2019), *Rapport sur le climat changeant du Canada*, Ottawa (Ontario), Gouvernement du Canada, à l'adresse : <https://changingclimate.ca/site/assets/uploads/sites/2/2020/06/RCCC_FULLREPORT-FR-FINAL.pdf>.

Cahoon, D. R., P. F. Hensel, T. Spencer, D. J. Reed, K. L. McKee et N. Saintilan (2006), « Coastal wetland vulnerability to relative sea-level rise: wetland elevation trends and process controls », *Ecological Studies*, vol. 190, chapitre 12 (Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag), p. 271-292.

Canadian Broadcasting Corporation (2022), « Body of missing woman found as southwestern Nfld. grapples with Fiona aftermath », CBC, nouvelles en ligne du 25 septembre 2022, à 5 h 52 (HA).

Ciarletta, D. J., J. L. Miselis, J. Shawler et C. Hein (2021), « Quantifying thresholds of barrier geomorphic change in a cross-shore sediment-partitioning model », *Earth Surface Dynamics*, vol. 92, n° 2, p. 183-203.

Cohen-Shacham, E., G. Walters, C. Janzen et S. Maginnis (2016), *Nature-based Solutions to Address Global Societal Challenges*, Gland (Suisse), UICN, xii + 97 p.

Conner, M. M., W. C. Saunders, N. Bouwes et C. Jordan (2016), « Evaluating impacts using a BACI design, ratios, and a Bayesian approach with a focus on restoration », *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 188, n° 10, p. 1-14.

Davidson-Arnott, D., B. Bauer et C. Houser (2019), *Introduction to Coastal Processes and Geomorphology*, 2e édition, Cambridge Press.

de Looff, H., T. Welp, N. Snider et R Wilmink (2021), « Chapter 7: Adaptive management », dans *International Guidelines on Natural and Nature-based Features for Flood Risk Management*, édité par T. S. Bridges, J. K. King, J. D. Simm, M. W. Beck, G. Collins, Q. Lodder et R. K. Mohan, Vicksburg (Mississippi), U.S. Army Engineer Research and Development Center, à l'adresse : <https://hdl.handle.net/11681/41946>.

de Schipper, M. A., B. C. Ludka, B. Raubenheimer, A. P. Luijendijk et T. A. Schlacher (2021), « Beach nourishment has complex implications for the future of sandy shores », *Nature Reviews Earth and Environment*, vol. 2, p. 70-83, à l'adresse : <https://doi.org/10.1038/s43017-020-00109-9>.

Denny, M. (2021), « Wave-Energy Dissipation: Seaweeds and Marine Plants Are Ecosystem Engineers », *Fluids*, vol. 6, n° 4, p. 151.

Derrick, P., J. McKee, S. Johnson et M. Mendelsohn (2007), « Poplar Island environmental restoration project: Project successes, lessons learned, and future plans », *Proceedings of the World Dredging Congress*, vol. 1, p. 487-500.

DHI (2022), *Solutions fondées sur la nature pour lutter contre les inondations dans les villes côtières : atelier sommaire*, préparé pour le compte de la Commission de coopération environnementale.

DHI (2024a), *Solutions fondées sur la nature pour gérer les risques d'inondation côtière : suivi de l'efficacité*, préparé pour le compte de la Commission de coopération environnementale.

DHI (2024b), *Solutions fondées sur la nature pour gérer les risques d'inondation côtière : avantages connexes*, préparé pour le compte de la Commission de coopération environnementale.

Dumitru, A., et L. Wendling (éd.) (2021), *Evaluating the Impact of Nature-Based Solutions: A Handbook for Practitioners*. Bruxelles (Belgique), Commission européenne, direction générale de la recherche et de l'innovation, à l'adresse : <https://doi.org/10.2777/244577>.

Dumitru, S., I. Garcia, S. Zorita et D. Tome-Lourido (2021), « Approaches to monitoring and evaluation strategy development. Chapter 2 », dans Dumitru, A., L. Wendling (éd.), *Evaluating the Impact of Nature-Based Solutions: A Handbook for Practitioners*, Bruxelles (Belgique), Commission européenne, direction générale de la recherche et de l'innovation, à l'adresse : <https://doi.org/10.2777/244577>.

Eger, A., H. Earp, K. Friedman, Y. Gatt, V. Hagger, B. Hancock, R. Kaewsrikhaw, E. McLeod, A. Moore, H. Niner, F. Razafinaivo, A. Sousa, M. Stankovic, T. Worthington, E. Bayraktarov,

M. Saunders, A. Verges et S. Reeves (2022), « The need, opportunities, and challenges for creating a standardized framework for marine restoration monitoring and reporting », *Biological Conservation*, vol. 266, article 109429.

Elias, E., A. J. F. Van der Spek, Z. B. Wang et J. de Ronde (2012), « Morphodynamic development and sediment budget of the Dutch Wadden Sea over the last century », *Netherlands Journal of Geosciences*, vol. 91, nº 3, p. 293-310, à l'adresse : https://doi.org/10.1017/S0016774600000457>.

Ellis, K., R. Lohnes et J. Lundholm (2022), « Eco-engineering techniques reduce soil loss from steep slopes in Nova Scotia, Canada », *Ecological Engineering*, vol. 174, article 106464.

Environmental Protection Agency (2017), *Multi-model framework for quantitative sectoral impacts analysis: a technical report for the fourth National climate assessment*, nº 430-R-17-001, Washington, Environmental Protection Agency, à l'adresse : <https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-03/documents/ciraii_technicalreportfornca4_final_with_updates_11062018.pdf>.

Erwin, M. R., J. Miller et J. G. Reese (2007), « Poplar Island Environmental Restoration Project: Challenges in Waterbird Restoration on an Island in Chesapeake Bay », *Ecological Restoration*, vol. 25, p. 256-262.

Fabian, R., M. Beck et D. Potts (2013), *Reef Restoration for Coastal Defense: A Review*, Santa Cruz, Université de Californie, à l'adresse : <http://car-spaw-rac.org/IMG/pdf/Reef_restoration_Coastal_Defense_report_Final-2.pdf>.

Feller, I. C., E. M. Dangremond, D. J. Devlin, C. E. Lovelock, E. Proffitt et W. Rodriguez (2015), « Nutrient enrichment intensifies hurricane impact in scrub mangrove ecosystems in the Indian River Lagoon », Floride (États-Unis), *Ecology*, vol. 96, p. 2960-2972, à l'adresse : <https://doi.org/10.1890/14-1853.1>.

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 Marine Science*, vol. 8, à l'adresse : <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.702412>.

Graham, J., T. M. Bowron, D. van Proosdij, J. Lundholm, E. Poirier, J. Kickbush, K. Ellis, S. Lewis, R. Akyol, T. Rabinowitz et E. Rogers (2021), *Post-Restoration Monitoring (Year 3) of the Belcher St. Tidal Wetland Restoration Project (NS091) –, 2020-21 Summary Report*, préparé pour le ministère des Pêches et des Océans et le ministère de l'Agriculture de la Nouvelle-Écosse, publication nº 66, Halifax (Nouvelle-Écosse).

Green, R. H. (1979), *Sampling Design and Statistical Methods for Environmental Biologists*, John Wiley & Sons.

Halpern, B. S., C. J. Klein, C. J. Brown et coll. (2013), « Achieving the triple bottom line in the face of inherent trade-offs among social equity, economic return, and conservation », *Biological Sciences*, vol. 110, no 25, p. 6229-6234, à l'adresse : <https://doi.org/10.1073/pnas.1217689110>.

Harley, M., et J. van Minnen (2009), *Development of Adaptation Indicators. ETC/ACC Technical Paper*, European Topic Centre on Air and Climate Change.

Hebert, C. E., J. Pasher, D. C. Weseloh, T. Dobbie, S. Dobbyn, D. Moore, V. Minelga et J. Duffe (2014), « Nesting cormorants and temporal changes in island habitat », *The Journal of Wildlife Management*, vol. 78, nº 2, p. 307-313.

Herlihy, A. T., M. E. Kentula, T. K. Magee, G. A. Lomnicky, A. M. Nahlik et G. Serenbetz (2019), « Striving for consistency in the National Wetland Condition Assessment: developing a reference condition approach for assessing wetlands at a continental scale », *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 191, nº 1, p. 1-20.

Howard, J., S. Hoyt, K. Isensee, M. Telszewski et E. Pidgeon (2014), *Coastal blue carbon: methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrasses*, Conservation International, Commission océanographique intergouvernementale de l'UNESCO, Union internationale pour la conservation de la nature, Arlington, Virginie (États-Unis), à l'adresse : <http://thebluecarboninitiative.org/manual/>.

Hurlbert, S. H. (1984), « Pseudoreplication and the design of ecological field experiments », *Ecological Monographs*, vol. 54, nº 2, p. 187-211.

Hylkema, A., Q. C. A. Hakkaart, C. B. Reid, R. Osinga, A. J. Murk et A. O. Debrot (2021), « Artificial reefs in the Caribbean: A need for comprehensive monitoring and integration into marine management plans », *Ocean & Coastal Management*, vol. 209, à l'adresse : <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105672>.

BAC (2023) *Insured Damages from Hurricane Fiona Now Over $800 Million*, Bureau d'assurance du Canada. Consulté en ligne le 29 mai 2023 à l'adresse : < http://www.ibc.ca/ns/resources/media-centre/media-releases/insured-damages-from-hurricane-fiona-now-over-800-million>.

ICLEI (2022), *Introducing Indicators A First Look at Using indicators to Measure Adaptation Progress*, ICLEI – Gouvernements locaux pour le développement durable, à l'adresse : <https://icleicanada.org/wp-content/uploads/2022/06/Introducing-Indicators_FINAL.pdf>.

INECC (2019), *Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático México.* Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Mexico (Mexique), à l'adresse : <https://atlasvulnerabilidad.inecc.gob.mx/page/fichas/ANVCC_LibroDigital.pdf>.

GIEC (2022), *Climate Change 2022 : Impacts, Adaptation and Vulnerability. Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Cambridge University Press, à l'adresse : <www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_FullReport.pdf>.

UICN (2020), *Global Standard for Nature-based Solutions. A user-friendly framework for the verification, design and scaling up of NBS*, première édition, Gland (Suisse), UICN.

Knowledge Network for Biocomplexity (KNB) (2022), Knowledge Network for Biocomplexity, à l'adresse : <https://knb.ecoinformatics.org/>.

Kroeger, T. (2012), *Dollars and Sense: Economic Benefits and Impacts from two Oyster Reef Restoration Projects in the Northern Gulf of Mexico*, The Nature Conservancy, à l'adresse : <http://www.oyster-restoration.org/wp-content/uploads/2013/02/oyster-restoration-study-kroeger.pdf>.

Kumar, P., S. E. Debele, J. Sahani, N. Rawat, B. Marti-Cardona, S. M. Alfieri, B. Basu, A. S. Basu, P. Bowyer, N. Charizopoulos, J. Jaakko, M. Loupis, M. Menenti, S. B. Mickovski, J. Pfeiffer, F. Pilla, J. Prool, B. Pulvirenti, M. Rutzinger, S. Sannigrahi, C. Spyrou, H. Tuomenvirta, Z. Vojinovic et T. Zieher (2021), « An overview of monitoring methods for assessment the performance of nature-based solutions against natural hazards », *Earth-science Reviews*, vol. 217, à l'adresse : <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103603>.

Leija, M. G., et S. F. Lomas (2018), « Assessment of nature-based structure to manage coastal dune erosion in Yucatan, Mexico », *Coastal Engineering Proceedings*, vol. 1, nº 36, à l'adresse : <https://doi.org/10.9753/icce.v36.structures.57>.

Livingston, I. (2022), « What made Hurricane Ian so intense: By the numbers », *The Washington Post*, <www.washingtonpost.com/climate-environment/2022/10/04/hurricane-ian-statistics-deathswinds-surge/>.

Lodder, Q., C. Jeuken, R. Reinen-Hamil, O. Burns, R. Ramsdell, III, J. de Vries, B. McFall, S. IJff, C. Maglio et R. Wilmink (2021), « Chapter 9: Beaches and Dunes », dans *Natural and Nature-Based Features Guidelines*, édité par T. S. Bridges, J. K. King, J. D. Simm, M. W. Beck, G. Collins, Q. Lodder et R. K. Mohan, Vicksburg (Mississippi), U.S. Army Engineer Research and Development Center.

Lovelock, C. E., V. Bennion, A. Grinham et D. R. Cahoon (2011), « The role of surface and subsurface processes in keeping pace with sea-level rise in intertidal wetlands of Moreton Bay, Queensland, Australia », *Ecosystems*, vol. 14, p. 745-757, à l'adresse : <https://doi.org/10.1007/s10021-011-9443-9>.

Luijendijk, A., G. Hagenaars, R. Ranasinghe, F. Baar, G. Donchyts et S. Aarninkhof (2018), « The State of the World's Beaches », *Scientific Reports*, vol. 8, article 6641, à l'adresse : <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24630-6>.

Lynch, J. C., P. Hensel et D. R. Cahoon (2015), *The surface elevation table and marker horizon technique: A protocol for monitoring wetland elevation dynamics* (Nº NPS/NCBN/NRR—2015/1078), National Park Service.

Mao, F., K. Khamis, S. Krause, J. Clark et D. M. Hannah (2019), « Low-cost environmental sensor networks: recent advances and future directions », *Frontiers in Earth Science*, vol. 7, article 221.

MARCO (2017), *Working Towards a Robust Monitoring Framework for Natural and Nature-Based Features in the Mid-Atlantic Using Citizen Science*, à l'adresse : <http://midatlanticocean.org/wp-content/uploads/2017/07/Working-Towards-a-Robust-Monitoring-Framework-for-Natural-and-Nature-Based-Features-in-the-Mid-Atlantic-Using-Citizen-Science.pdf>.

McDonald, T., G. Gann, J. Jonson et K. Dixon (2016), *International standards for the practice of ecological restoration – including principles and key concepts*, Society for Ecological Restoration, Washington, DC (États-Unis).

McKee, K. L. (2011) « Biophysical controls on accretion and elevation change in Caribbean mangrove ecosystems », *Estuarine Coastal Shelf Science*, vol. 91, p. 475-483, à l'adresse : <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2010.05.001>.

McLean, M., E. F. Roseman, J. J. Pritt, G. Kennedy et B. A. Manny (2015), « Artificial reefs and reef restoration in the Laurentian Great Lakes », *Journal of Great Lakes Research*, vol. 41, nº 1, p. 1-8.

Menéndez, P., I. J. Losada, S. Torres-Ortega, S. Narayan et M. W. Beck (2020), « The global flood protection benefits of mangroves », *Scientific Reports*, vol. 10, p. 1–11, à l'adresse : <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61136-6>.

Mora-Soto, A., A. Capsey, A. M. Friedlander, M. Palacios, P. E. Brewin, N. Golding, P. Dayton, B. Van Tussenbroek, A. Montiel, W. Goodell, C. Velasco-Charpentier, T. Hart, E. C. Macaya, A. Pérez-Matus et M. Macias-Fauria (2021), « One of the least disturbed marine coastal ecosystems on Earth: Spatial and temporal persistence of Darwin's sub-Antarctic giant kelp

forests », *Journal of Biogeography*, vol. 48, p. 2562–2577, à l'adresse : <https://doi.org/10.1111/jbi.14221>.

Moudrak, N., B. Feltmate, H. Venema et H. Osman (2018), *Combating Canada's Rising Flood Costs: Natural infrastructure is an underutilized option*, préparé pour le Bureau d'assurance du Canada, Centre Intact d'adaptation au climat, Université de Waterloo.

Neckles, H. A., et M. Dionne (2000), *Regional standards to identify and evaluate tidal wetland restoration in the Gulf of Maine*, Wells National Estuarine Research Reserve, Wells (Maine), 21 p.

Neckles, H. A., M. Dionne, D. M. Burdick, C. T. Roman, R. Buchsbaum et E. Hutchins (2002), « A monitoring protocol to assess tidal restoration of salt marshes on local and regional scales », *Restoration Ecology*, vol. 10, nº 3, p. 556-563.

Neckles, H. A., J. E. Lyons, G. R. Guntenspergen, W. G. Shriver et S. C. Adamowicz (2015), « Use of structured decision making to identify monitoring variables and management priorities for salt marsh ecosystems », *Estuaries and Coasts*, vol. 38, nº 4, p. 1215-1232.

Nesshöver, C., T. Assmuth, K. N. Irvine, G. M. Rusch, K. A. Waylen, B. Delbaere, D. Haase, L. Jones-Walters, H. Keune, E. Kovacs, K. Krauze, M. Külvik, F. Rey, J. van Dijk, O. I. Vistad, M. E. Wilkinson et H. Wittmer (2017), « The science, policy and practice of nature-based solutions: An interdisciplinary perspective », *Science of The Total Environment*, vol. 579, p. 1215-1227, à l'adresse : <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.106>.

Ministère de l'Environnement et des Gouvernements locaux (2018), *Manual for Wetland Ecosystem Services Protocol for Atlantic Canada (WESP-AC): Tidal Wetlands*, Fredericton (Nouveau-Brunswick).

NOAA (2020), *National Hurricane Center Tropical Cyclone Report : Hurricane Delta (AL262020)*, à l'adresse : <https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL262020_Delta.pdf>.

Nolte, S., E. C. Koppenaal, P. Esselink, K. S. Dijkema, M. Schuerch, A. V. De Groot, J. P. Bakker et S. Temmerman (2013), « Measuring sedimentation in tidal marshes: a review on methods and their applicability in biogeomorphological studies », *Journal of Coastal Conservation*, vol. 17, nº 3, p. 301-325.

Nova Scotia : Off the Beaten Path (2019), Cheverie Camera Obscura. Consulté en ligne le 22 décembre 2022 à l'adresse : <https://discoverns.ca/2019/09/13/cheverie-camera-obscura/>.

Oreska, M. P., K. J. McGlathery, P. L. Wiberg, R. J. Orth et D. J. Wilcox (2021), « Defining the Zostera marina (Eelgrass) Niche from Long-Term Success of Restored and Naturally Colonized Meadows: Implications for Seagrass Restoration », *Estuaries and Coasts*, vol. 44, nº 4, p. 396-411, à l'adresse : < https://doi.org/10.1002/aqc.2573>.

Orth R. J., J. S. Lefcheck, K. S. McGlathery, L. Aoki, M. W. Luckenbach, K. A. Moore, M. R. J. Oreska, R. Snyder, D. J. Wilcox et B. Lusk (2020), « Restoration of seagrass habitat leads to rapid recovery of coastal ecosystem services », *Science Advances*, vol. 6, nº 41, à l'adresse : <https://doi.org/10.1126/sciadv.abc6434>.

Pearce-Higgins, J. W., L. H. Antão, R. E. Bates, K. M. Bowgen, C. D. Bradshaw, S. J. Duffield, C. Ffoulkes, A. M. A. Franco, J. Geschke, R. D. Gregory, M. J. Harley, J. A. Hodgson, R. L. M. Jenkins, V. Kapos, K. M. Maltby, O. Watts, S. G. Willis et M. D. Morecroft (2022), *Ecological Indicators*, vol. 136, article 108690, à l'adresse : <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108690>.

Philip Williams & Associates Ltd. (PWA) et P. M. Faber (2004), *Design Guidelines for Tidal Wetland Restoration in San Francisco Bay*, The Bay Institute et California State Coastal Conservancy, Oakland (Californie), vol. 83, à l'adresse : <https://scc.ca.gov/webmaster/ftp/pdf/pub/tidal_wet_guidelines_report.pdf>.

Pratte, I., R. A. Ronconi, S. R. Craik et J. McKnight (2021), « Spatial ecology of endangered roseate terns and foraging habitat suitability around a colony in the western North Atlantic », *Endangered Species Research*, vol. 44, p. 339-350.

Prosser, D. J., J. D. Sullivan, J. L. Wall, E. J. Buck, J. J. Taylor, C. R. Callahan et P. C. McGowan (2022), « Poplar Island: Understanding the development of a beneficial use restoration site », *Ecological Restoration*, vol. 40, n° 1, p. 17-24.

Raymond, C. M., P. Berry, M. Breil, M. R. Nita, N. Kabisch, M. de Bel, V. Enzi, N. Frantzeskaki, D. Geneletti, M. Cardinaletti, L. Lovinger, C. Basnou, A. Monteiro, H. Robrecht, G. Sgrigna, L. Munari et C. Calfapietra (2017), *An impact evaluation framework to support planning and evaluation of nature-based solutions projects: An EKLIPSE Expert Working Group report*, Centre for Ecology and Hydrology, Wallingford (Royaume-Uni).

Rizvi, A. R., K. van Riel et E. Zakowski (2014), *Ecosystem Based Adaptation Monitoring and Evaluation – Indicators: A Complication and Review of Literature*, IUCN EbA Knowledge Series – Working Paper, UICN, 16 p., à l'adresse : <https://www.iucn.org/sites/default/files/2023-06/eba-me-indicators_0.pdf>.

Roche D. G, L. E. B. Kruuk, R. Lanfear et S. A. Binning (2015), « Public Data Archiving in Ecology and Evolution: How Well Are We Doing? », *PLoS Biology*, vol. 13, n° 11, article e1002295, à l'adresse : <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1002295>.

Rock, J., M. Leonard et A. Boyne (2007), « Foraging habitat and chick diets of roseate tern, Sterna dougallii, breeding on Country Island, Nova Scotia », *Avian Conservation Ecology*, vol. 2, article 4, à l'adresse : <www.ace-eco.org/vol2/iss1/art4/>.

Science + Resilience Institute Jamaica Bay (2020), *Measuring Success Monitoring Natural and Nature-Based Shoreline Features in New York State: Final Report*, New York, New York Department of State, à l'adresse : <https://dos.ny.gov/system/files/documents/2021/06/measuringsuccess_finalreport_minusappendices_050721.pdf>.

Sherman, D. J. (2021), « North America, Coastal Geomorphology », dans C. W. Finkl et C. Makowski (éd.), *Encyclopedia of Coastal Science*, *Encyclopedia of Earth Sciences Series*, Springer, Cham, à l'adresse : <https://doi.org/10.1007/978-3-319-93806-6_230>.

Shiao, T., C. Kammeyer, G. Brill, L. Feinstein, M. Matosich, K. Vigerstol et C. Müller-Zantop (2020), *Business case for nature-based solutions: landscape assessment*, United Nations Global Compact CEO Water Mandate et Pacific Institute, Oakland (Californie), à l'adresse : <https://ceowatermandate.org/NBS/wp-content/uploads/sites/41/2020/08/landscape.pdf>.

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*, Washington, Banque interaméricaine de développement (BID), à l'adresse : <http://dx.doi.org/10.18235/0002325>.

Skodra, J., S. Connop, J.-M. Tacnet et N. Van Cauwenbergh (2021), « Chapert 2: Principles guiding NBS performance and impact evaluation » dans A. Dumitri et L. Wendling (éd), *Evaluating the*

Impacts of Nature-Based Solutions: A Handbook for Practitioners, Commission européenne, Bruxelles.

Smokorowski, K. E., et R. G. Randall (2017), « Cautions on using the Before-After-Control-Impact design in environmental effects monitoring programs », *Facets*, vol. 2, nº 1, p. 212-232.

Sowińska-Świerkosz, B., et J. García (2021), « A new evaluation framework for nature-based solutions (NBS) projects based on the application of performance questions and indicators approach », *Science of The Total Environment*, vol. 787, article 147615.

Steinke, T. D., et C. J. Ward (1989), « Some effects of the cyclones Domoina and Imboa on mangrove communities in the St Lucia Estuary », S*outh African Journal of Botany*, vol. 55, p. 340-348, à l'adresse : < https://doi.org/10.1016/S0254-6299(16)31186-3>.

Stewart-Oaten, A., W. W. Murdoch et K. R. Parker (1986), « Environmental impact assessment: "Pseudoreplication" in time? », *Ecology*, vol. 67, nº 4, p. 929-940.

Sutton-Grier, A. E., K. Wowk 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 Policy*, vol. 51, p. 137-148, à l'adresse : <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.04.006>.

Thom, R. M. (1997), « System-development matrix for adaptive management of coastal ecosystem restoration projects », *Ecological Engineering*, vol. 8, nº 3, p. 219-232.

Thom, R. M. (2000), « Adaptive management of coastal ecosystem restoration projects », *Ecological Engineering*, vol. 15, nº 3-4, p. 365-372.

Thoman, R. (2022), *Why Typhoon Merbok was so Powerful when It Hit Alaska. The Conversation*. Consulté en ligne le 29 mai 2023 à l'adresse : <https://www.scientificamerican.com/article/why-typhoon-merbok-was-so-powerful-when-it-hit-alaska/>.

Underwood, A. J. (1991), « Beyond BACI: experimental designs for detecting human environmental impacts on temporal variations in natural populations », *Marine and Freshwater Research*, vol. 42, nº 5, p. 569-587.

Nations Unies et coll. (2021), *System of Environmental-Economic Accounting—Ecosystem Accounting (SEEA EA), White cover publication, pre-edited text subject to official editing*, à l'adresse : <https://seea.un.org/ecosystem-accounting>.

van Proosdij, D., P. Manuel, K. Sherren, E. Rapaport, C. McFadden, T. Rahman et Y. Reeves (2021), « Making room for movement: A framework for implementing nature-based coastal adaptation strategies », dans Nouvelle-Écosse, *TransCoastal Adaptations Centre for Nature-based Solutions*, Université Saint Mary's, 77 p., préparé pour Ressources naturelles Canada.

Virginia Department of Environmental Quality (2022), *Restoring Eelgrass Habitat on the Seaside of Virginia's Eastern Shore*. Consulté en ligne le 30 novembre 2022 à l'adresse : <https://www.deq.virginia.gov/coasts/habitat-restoration/eelgrass-and-scallops>.

Vouk, I., B. Pilechi, M. Provan, and E. Murphy (2021), « Nature-based solutions for coastal and riverine flood and erosion risk management. Canadian Standards Association » à l'adresse: <www.csagroup.org/wp-content/uploads/CSA-Group-Research-Nature-Based-Solutions-for-Coastal-and-Riverine-Flood-and-Erosion-Risk-Management.pdf>.

Walters, L. J., A. Roddenberry, C. Crandall, J. Wayles, M. Donnelly, S. C. Barry, M. W. Clark, O. Escandell, J. C. Hansen, K. Laakkoen et P. E. Sacks (2022), « The Use of Non-Plastic Materials for Oyster Reef and Shoreline Restoration: Understanding What Is Needed and Where

the Field Is Headed », *Sustainability*, vol. 14, nº 13, à l'adresse : <https://doi.org/10.3390/su14138055>.

Webb, E. L., D. A. Friess, K. W. Krauss, D. R. Cahoon, G. R. Guntenspergen et J. Phelps (2013), « A global standard for monitoring coastal wetland vulnerability to accelerated sea-level rise », *Nature Climate Change*, vol. 3, nº 5, p. 458-465.

Wilkinson, M., M. Dumontier, I. J. Aalbersberg et coll. (2016), « The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship », *Scientific Data*, vol. 3, article 160018, à l'adresse : <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.18>.

Williams, M. (2023), « Hurricane Otis hits Mexico and continues with category 5 intensity », *The Guardian*. Consulté en ligne le 19 janvier 2024 à l'adresse : <https://www.theguardian.com/environment/2023/oct/27/hurricane-otis-the-eastern-pacifics-first-inland-category-5-storm>.

Wijsman, K., D. S. Auyeung, P. Brashear, B. Branco, K. Graziano, P. Groffman, H. Cheng et D. Corbett (2021), « Operationalizing resilience: co-creating a framework to monitor hard, natural, and nature-based shoreline features in New York State », *Ecology and Society*, vol. 26, nº 3, à l'adresse : <https://doi.org/10.5751/ES-12182-260310>.

Woodward, A., et K. Hollar (2011), *Monitoring Habitat Restoration Projects: U.S. Fish and Wildlife Service Pacific Region Partners for Fish and Wildlife Program and Coastal Program Protocol*, U.S. Geological Survey, Reston (Virginie), à l'adresse : <https://pubs.usgs.gov/tm/tm2a11/pdf/tm2a11.pdf>.

Banque mondiale (2017), *Implementing Nature-based Flood Protection : Principles and Implementation Guidance*, Washington, DC, Banque mondiale, à l'adresse : <http://hdl.handle.net/10986/28837>.