



Pêches et Océans
Canada

Fisheries and Oceans
Canada

Sciences des écosystèmes
et des océans

Ecosystems and
Oceans Science

Secrétariat canadien des avis scientifiques (SCAS)

Document de recherche 2024/024

Région de la capitale nationale

Cartographie des effets cumulatifs et vulnérabilité des écosystèmes marins canadiens aux activités et facteurs de stress anthropiques

Cathryn Clarke Murray¹, Noreen E. Kelly², Jocelyn C. Nelson³,
Grace E.P. Murphy² et Selina Agbayani¹

¹Pêches et Océans Canada
Institut des sciences de la mer
9860, chemin West Saanich
Sidney (Colombie-Britannique) V8L 5T5

²Pêches et Océans Canada
Institut océanographique de Bedford
1, promenade Challenger
Dartmouth (Nouvelle-Écosse) B2Y 4A2

³Pêches et Océans Canada
Station biologique du Pacifique
3190, chemin Hammond Bay
Nanaimo (Colombie-Britannique) V9T 6N7

Avant-propos

La présente série documente les fondements scientifiques des évaluations des ressources et des écosystèmes aquatiques du Canada. Elle traite des problèmes courants selon les échéanciers dictés. Les documents qu'elle contient ne doivent pas être considérés comme des énoncés définitifs sur les sujets traités, mais plutôt comme des rapports d'étape sur les études en cours.

Publié par :

Pêches et Océans Canada
Secrétariat canadien des avis scientifiques
200, rue Kent
Ottawa (Ontario) K1A 0E6

<http://www.dfo-mpo.gc.ca/csas-sccs/>
csas-sccs@dfo-mpo.gc.ca



© Sa Majesté le Roi du chef du Canada, représenté par le ministre du
ministère des Pêches et des Océans, 2024

ISSN 2292-4272

ISBN 978-0-660-70845-4 N° cat. Fs70-5/2024-024F-PDF

La présente publication doit être citée comme suit :

Murray, C.C., Kelly, N.E., Nelson, J.C., Murphy, G.E.P., et Agbayani, S. 2024. Cartographie des effets cumulatifs et vulnérabilité des écosystèmes marins canadiens aux activités et facteurs de stress anthropiques. Secr. can. des avis sci. du MPO. Doc. de rech. 2024/024. vi + 51 p.

Also available in English :

Murray, C.C., Kelly, N.E., Nelson, J.C., Murphy, G.E.P., and Agbayani, S. 2024. Cumulative Impact Mapping and Vulnerability of Canadian Marine Ecosystems to Anthropogenic Activities and Stressors. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2024/024. vi + 46 p.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	vi
1. INTRODUCTION	1
1.1. EFFETS CUMULATIFS SUR LES ÉCOSYSTÈMES MARINS.....	1
1.1.1. Contexte.....	1
1.1.2. Demande du client	2
2. MÉTHODES DE CARTOGRAPHIE DES EFFETS CUMULATIFS.....	3
2.1. APERÇU DE LA MÉTHODE	3
2.2. HABITATS.....	5
2.2.1. Habitats du Pacifique	5
2.2.2. Habitats de l'Atlantique	8
2.3. ACTIVITÉS HUMAINES ET FACTEURS DE STRESS	11
2.4. MATRICE DE VULNÉRABILITÉ	18
2.5. FORMULE DES EFFETS CUMULATIFS.....	19
3. CARTOGRAPHIE DES EFFETS CUMULATIFS AU CANADA	19
3.1. BAN <i>ET AL.</i> 2010.....	19
3.2. CLARKE MURRAY <i>ET AL.</i> 2015	20
3.3. MISE À JOUR CONCERNANT LE PACIFIQUE	23
3.4. MARITIMES	24
4. ÉVALUATION DE LA MATRICE DE VULNÉRABILITÉ DES OCÉANS CANADIENS	24
4.1. COTES DE LA MATRICE	24
4.1.1. Courant de Californie (Teck <i>et al.</i> 2010)	24
4.1.2. Massachusetts (Kappel <i>et al.</i> 2012a, b).....	26
4.1.3. Pacifique canadien (Clarke Murray <i>et al.</i> 2015b).....	26
4.1.4. Atlantique canadien (Kappel <i>et al.</i> 2012a,b)	27
4.2. POURQUOI LES COTES DE VULNÉRABILITÉ VARIENT-ELLES SELON LES RÉGIONS?.....	27
4.3. EXAMEN PRÉALABLE DES MATRICES	28
4.3.1. Suggestions d'ajouts, de suppressions ou de modifications	29
5. ANALYSE ET CONCLUSIONS	40
5.1. APPLICATIONS	40
5.2. LACUNES ET LIMITES.....	41
6. REMERCIEMENTS	42
7. RÉFÉRENCES CITÉES	43
ANNEXES.....	49

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Définition des types d'habitats utilisés dans le Pacifique canadien aux fins de la cartographie des effets cumulatifs. Les habitats dont la profondeur est connue mais dont le substrat est inconnu sont cartographiés, mais ne sont pas définis ici, car ils constituent un mélange des autres types d'habitats (p. ex., la cote des habitats intertidaux non définis correspond à une combinaison des habitats intertidaux meubles et durs).	6
Tableau 2 : Définition des types d'habitats utilisés pour l'Atlantique canadien (adaptée de Kappel et al. 2012a, b).	9
Tableau 3 : Définitions des activités et des facteurs de stress, adaptées de Teck et al. 2010, Ban et al. 2010, et Clarke Murray et al. 2015b. Les termes « altérant l'habitat » et « altérant faiblement l'habitat » font référence à la probabilité attendue d'altération de l'habitat, plutôt qu'à la quantité réelle. Les astérisques simples (*) indiquent les activités et les facteurs de stress propres à l'Atlantique, les astérisques doubles (**) indiquent les activités et les facteurs de stress propres au Pacifique.	12
Tableau 4 : Les cotes de vulnérabilité qui ont été calculées ou attribuées sur la base des cotes d'habitat existantes de Teck et al. (2010), comme indiqué dans Clarke Murray et al. (2015b), tableau supplémentaire 4.	21
Tableau 5 : Critères de vulnérabilité utilisés afin de calculer la vulnérabilité par Teck et al. (2010).	25
Tableau 6 : Classes de cotes de vulnérabilité créées pour les enquêtes régionales d'experts du Pacifique et de l'Atlantique.	28
Tableau 7 : Matrice de vulnérabilité révisée pour la côte du Pacifique. Les cotes de vulnérabilité qui ont été modifiées au cours de l'examen préalable de la matrice sont indiquées en gras avec une flèche indiquant le sens du changement. Remarque : les cotes relatives aux habitats à substrat mixte n'apparaissent pas dans ce tableau, car aucune étude d'experts n'a été consultée pour ces habitats.	31
Tableau 8 : Matrice de vulnérabilité révisée pour la côte de l'Atlantique. Les cotes de vulnérabilité qui ont été modifiées au cours de l'examen préalable de la matrice sont indiquées en gras avec une flèche indiquant le sens du changement. Les habitats mixtes sont cartographiés, mais utilisent une cote de vulnérabilité moyenne pour le type d'habitat (par exemple, le plateau à substrat mixte est une moyenne des cotes des classes d'habitats de plateau à substrat meuble et dur). Ces habitats n'ayant pas fait l'objet d'une expertise, ils n'apparaissent pas dans ce tableau.	35
Annexe 1. Exemple relatif à l'instrument d'enquête.	49
Annexe 2. Liste des experts consultés dans le cadre de l'examen préalable des matrices de vulnérabilité relatives aux écosystèmes de l'Atlantique et du Pacifique	51

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Figure présentant un aperçu des méthodes de cartographie des effets cumulatifs. Les données relatives à l'activité humaine peuvent être divisées en quatre types : terrestres, côtières, maritimes et pêche. L'intensité relative de chaque couche d'activité a été croisée avec les habitats (benthiques, biogéniques et pélagiques) et des cotes de vulnérabilité ont été attribuées aux combinaisons activité-habitat. Toutes les cotes d'effets ont été additionnées pour toutes les couches d'activité et tous les habitats afin de calculer les cotes d'effets cumulatifs. Adapté de Clarke Murray et al. 2015b, figure supplémentaire 1.....	4
Figure 2 : Classes d'habitats définies dans le Pacifique canadien pour la cartographie des effets cumulatifs (d'après Clarke Murray et al. 2015b, matériel supplémentaire, figure 3). Les habitats biogéniques (herbiers marins, varech et récifs d'éponges) sont superposés aux classes d'habitats géophysiques. Les habitats profonds à substrat meuble ne sont pas représentés, faute de données suffisantes. Les habitats pélagiques peu profonds ne sont pas représentés. Les habitats dont la profondeur est connue mais dont le substrat est inconnu sont cartographiés, mais utilisent une cote de vulnérabilité moyenne pour le type d'habitat (p. ex., la cote de l'habitat intertidal non défini est une moyenne des cotes des classes d'habitats intertidaux durs et meubles).....	6
Figure 3 : Classes d'habitats définies pour l'Atlantique canadien (adapté de Kappel et al. 2012a, b). L'habitat de la forêt de varech n'est actuellement pas inclus dans la carte en raison de l'insuffisance des données.....	9
Figure 4 : Première carte des effets cumulatifs pour le Pacifique canadien (d'après Ban et al. 2010).....	20
Figure 5 : Illustration de l'amélioration de l'application des données relatives à l'effort de pêche à l'ensemble de données sur la pêche de la panope du Pacifique (figure 1 dans Clarke Murray et al. 2015b).....	22
Figure 6 : Carte des effets cumulatifs de Clarke Murray et al. (2015b).	23

RÉSUMÉ

La prise en compte des effets cumulatifs, dans le cadre d'efforts allant de l'évaluation environnementale à la planification spatiale marine, continue de poser des défis aux scientifiques et aux gestionnaires. L'évaluation des effets cumulatifs est un domaine qui évolue rapidement et qui comporte une diversité d'approches et de méthodologies. La cartographie des effets cumulatifs est une méthode établie pour représenter les effets spatiaux de multiples activités et facteurs de stress. Depuis sa première publication par Ben Halpern et ses collègues en 2008, la cartographie des effets cumulatifs a été appliquée à diverses échelles spatiales dans des régions du monde entier, y compris au Canada. Il s'agit d'un modèle établi et semi-quantitatif qui représente spatialement les effets additifs des activités humaines et des facteurs de stress sur les écosystèmes marins. Le modèle de cartographie des effets cumulatifs comprend la compilation et la normalisation de données marines spatialement explicites de grande qualité. Trois ensembles de données sont requis :

1. La représentation spatiale des activités et/ou des facteurs de stress d'origine anthropique;
2. La représentation spatiale des habitats (ou des espèces);
3. Une matrice de cotes pour représenter la vulnérabilité relative de chaque habitat à chaque activité ou facteur de stress.

Les cotes d'effets sont additionnées pour l'ensemble des habitats et des activités pour chaque cellule de la grille afin de produire une carte des effets cumulatifs relatifs. Les résultats du modèle permettent de visualiser les effets cumulatifs relatifs dans la région cible, en mettant en évidence les zones les plus et les moins touchées par les activités humaines. Dans ce document, nous donnons un aperçu de la méthode de cartographie des effets cumulatifs et de son application dans les eaux canadiennes. Nous présentons les résultats d'un examen par des experts des matrices de vulnérabilité concernant le Pacifique et l'Atlantique canadiens et les changements suggérés pour l'utilisation dans les efforts de cartographie des effets cumulatifs à l'avenir. Enfin, nous discutons des limites et des hypothèses de la méthode et de son applicabilité dans divers contextes de gestion.

1. INTRODUCTION

1.1. EFFETS CUMULATIFS SUR LES ÉCOSYSTÈMES MARINS

1.1.1. Contexte

Les écosystèmes marins sont soumis à la pression de facteurs de stress locaux et mondiaux (Duarte *et al.* 2020). L'augmentation des populations vivant sur les côtes s'accompagne d'une utilisation de plus en plus diversifiée des espaces et des ressources marines, allant du transport et des loisirs aux activités d'extraction et aux activités industrielles. Des changements importants sont attendus, car les facteurs de stress à plusieurs échelles d'espace et de temps peuvent interagir et affecter un écosystème marin à travers les échelles écologiques (Hodgson et Halpern 2019), depuis l'enrichissement localisé en nutriments jusqu'aux variations du système climatique mondial. Par conséquent, la nécessité de gérer durablement les systèmes marins exige non seulement de comprendre les effets des facteurs de stress individuels, mais aussi de comprendre de toute urgence les effets cumulatifs qui en résultent.

L'évaluation et la gestion des effets cumulatifs sont un domaine qui évolue rapidement et qui comporte une diversité d'approches et de méthodologies (Clarke Murray *et al.* 2020; Hodgson et Halpern 2019). Plusieurs méthodes d'analyse spatiale des effets cumulatifs ont proliféré ces dernières années (d'après Stock et Micheli (2016) : Coll *et al.* 2012; Goodsir *et al.* 2015; Kelly *et al.* 2014; Knights *et al.* 2015; Marcotte *et al.* 2015; Parravicini *et al.* 2012; Stelzenmüller *et al.* 2010). Certaines approches sont spatiales uniquement lors de l'étape de délimitation du champ d'application, au cours de laquelle la zone d'intérêt est d'abord définie, puis les activités ou les facteurs de stress associés à cette zone sont évalués. Des approches basées sur le risque ont été utilisées dans des zones géographiques définies, telles que les aires marines protégées et les mers intérieures (Stelzenmüller *et al.* 2020; Rubidge *et al.* 2018). Les approches basées sur les liens ou les séquences d'effets (Knights *et al.* 2015; Stelzenmüller *et al.* 2010) définissent explicitement les relations entre les activités, les facteurs de stress et les composantes écologiques, qui peuvent ensuite être associées à des variables de risque afin d'identifier les secteurs, les activités, les facteurs de stress ou les composantes écologiques à haut risque (O *et al.* 2014; Rubidge *et al.* 2018). Les approches fondées sur les séquences d'effets peuvent également être reliées à des modèles de population afin de comparer les scénarios d'effets (Murray *et al.* 2020). Les approches basées sur les effets sont explicitement spatiales dans la mesure où elles définissent l'étendue spatiale de l'effet des activités, des pressions et des effets (Elliot *et al.* 2020), mais elles ne s'étendent pas aux effets produits sur des composantes spécifiques. La cartographie des effets cumulatifs (Halpern *et al.* 2008), basée sur la vulnérabilité relative des habitats aux activités ou aux facteurs de stress, reste la méthode d'analyse spatiale la plus couramment appliquée en raison de sa capacité à travailler à de plus grandes échelles avec des exigences flexibles en matière de données.

La cartographie des effets cumulatifs est une méthode établie de transposition des activités humaines en effets sur les écosystèmes, en utilisant des étendues et des chevauchements définis d'écosystèmes et d'activités anthropiques. Cette analyse spatialement explicite peut être adaptée aux zones d'étude de toutes tailles et réalisée avec des données de détails et de résolutions variables. L'adaptabilité et la capacité de personnalisation de méthode en font un outil utile permettant de soutenir la planification spatiale marine. La méthode a été décrite à l'origine par Halpern et ses collègues (Halpern *et al.* 2008) et est bien établie dans la littérature, après avoir été appliquée à l'échelle mondiale (Halpern *et al.* 2007; Halpern *et al.* 2015; Halpern *et al.* 2008; Halpern *et al.* 2019; O'Hara *et al.* 2021) et à l'échelle régionale en Californie (Halpern *et al.* 2009), à Hawaï (Selkoe *et al.* 2009), au Massachusetts (Kappel *et al.*

2012a), dans l'Arctique (Afflerbach *et al.* 2017; Andersen *et al.* 2017), dans la mer Baltique (Andersen *et al.* 2015) et dans la mer Méditerranée et la mer Noire (Micheli *et al.* 2013). Cette méthode a été appliquée à plusieurs reprises dans le Pacifique canadien (Agbayani *et al.* 2015; Ban *et al.* 2010; Clarke Murray *et al.* 2015a; Clarke Murray *et al.* 2015b; Perry 2019; Singh *et al.* 2020) et a été réalisé dans la région des Maritimes¹. Depuis sa publication en 2008, de nombreuses applications ont permis d'améliorer progressivement la méthode. Par exemple, avec les progrès de la puissance informatique, la complexité potentielle qui peut être incluse dans un modèle spatial ne cesse d'augmenter. Une résolution spatiale élevée, des facteurs de stress multiples par activité et l'inclusion d'autres effets d'interaction sont désormais possibles, bien que l'inclusion d'effets d'interaction autres qu'additifs dans cette méthode soit rare (mais voir Brown *et al.* 2014). En outre, les hypothèses et incertitudes sous-jacentes de la méthode ont été étudiées (Halpern et Fujita 2013), et des analyses ont été menées afin de définir les composantes du modèle les plus sensibles aux incertitudes et aux inconnues (Stock et Micheli 2016).

Les cartes des effets cumulatifs permettent de visualiser les effets cumulatifs relatifs dans la région cible, en mettant en évidence les zones les plus touchées par les activités humaines ainsi que celles qui ont moins d'effets (c'est-à-dire les points chauds par rapport aux points froids). Le processus de préparation de la cartographie des effets cumulatifs nécessite la compilation et la normalisation de données marines spatialement explicites de haute qualité, ce qui, en soi, est bénéfique pour les planificateurs, les intervenants et les autres scientifiques (Hammar *et al.* 2020; Hodgson *et al.* 2019). Nous présentons ici un aperçu de la méthode de cartographie des effets cumulatifs et de son utilisation dans les eaux canadiennes. Nous décrivons également en détail une révision par des experts des cotes de la matrice de vulnérabilité concernant les côtes du Pacifique et de l'Atlantique visant à finaliser les matrices de vulnérabilité destinées à être utilisées dans les efforts de cartographie des effets cumulatifs en cours. Enfin, les applications passées et les applications potentielles à venir de la méthode sont passées en revue et discutées.

1.1.2. Demande du client

Le programme national de planification spatiale marine vise à inclure des représentations spatiales des effets cumulatifs dans ses efforts de planification. Planification et conservation marines (PCM) a demandé à la Direction des sciences du MPO d'examiner la méthode existante de cartographie des effets cumulatifs et de fournir des conseils sur son applicabilité et sa pertinence concernant la planification spatiale marine et la gestion fondée sur l'écosystème. Les objectifs précis de ce document de travail sont les suivants :

1. Examiner les cotes dans les matrices de vulnérabilité du Pacifique et de l'Atlantique et recommander des révisions de certaines d'entre elles, le cas échéant.
2. Évaluer la méthode de cartographie des effets cumulatifs en vue de déterminer si ses résultats sont utiles dans le cadre de la planification spatiale marine et d'autres programmes de conservation.
3. Déterminer les zones d'incertitude et les lacunes dans les connaissances.

¹ Murphy, Grace; Kelly, Noreen (2023). [Carte de l'impact cumulatif des activités humaines dans la région des Maritimes](#). Date de publication Septembre 2023. Division de la science des écosystèmes côtiers, Pêches et Océans Canada, Dartmouth, (N-É).

2. MÉTHODES DE CARTOGRAPHIE DES EFFETS CUMULATIFS

2.1. APERÇU DE LA MÉTHODE

La méthode de cartographie des effets cumulatifs utilise un modèle d'effets cumulatifs spatialement explicite afin de relier les empreintes des activités humaines et les classes d'habitats aux effets potentiels sur l'écosystème au moyen d'une matrice de cotes de vulnérabilité (Halpern *et al.* 2008; Teck *et al.* 2010). La méthode a été introduite et appliquée pour la première fois à l'échelle mondiale par Halpern et ses collègues (2007). La méthode nécessite trois sources de données :

1. Répartition spatiale des classes d'habitats marins (p. ex. plages intertidales, zones pélagiques peu profondes, herbiers marins, etc.);
2. Répartition spatiale et intensité relative des activités humaines (p. ex. pêche, navigation, sites industriels, etc.) et des facteurs de stress connexes (p. ex. sédimentation, bruit, etc.);
3. Matrice des cotes de vulnérabilité pour quantifier l'effet relatif de chaque facteur de stress sur chaque classe d'habitats.

Fondamentalement, la cartographie des effets cumulatifs utilise un modèle relativement simple qui identifie les zones où les activités et les habitats se croisent dans l'espace, puis applique une pondération de la vulnérabilité afin de déterminer une cote des effets pour chaque intersection activité-habitat. Les cotes sont additionnées pour toutes les activités et tous les habitats dans chaque cellule de la grille afin de produire une carte des cotes des effets cumulatifs pour l'ensemble de la région à l'étude (Figure 1). Les résultats sont habituellement présentés sous forme de cartes de densité, avec des couleurs indiquant le niveau d'effet cumulatif dans chaque cellule (p. ex, les couleurs bleues ou plus froides représentent des effets relativement faibles, les couleurs rouges ou plus chaudes représentent des effets relativement plus élevés).

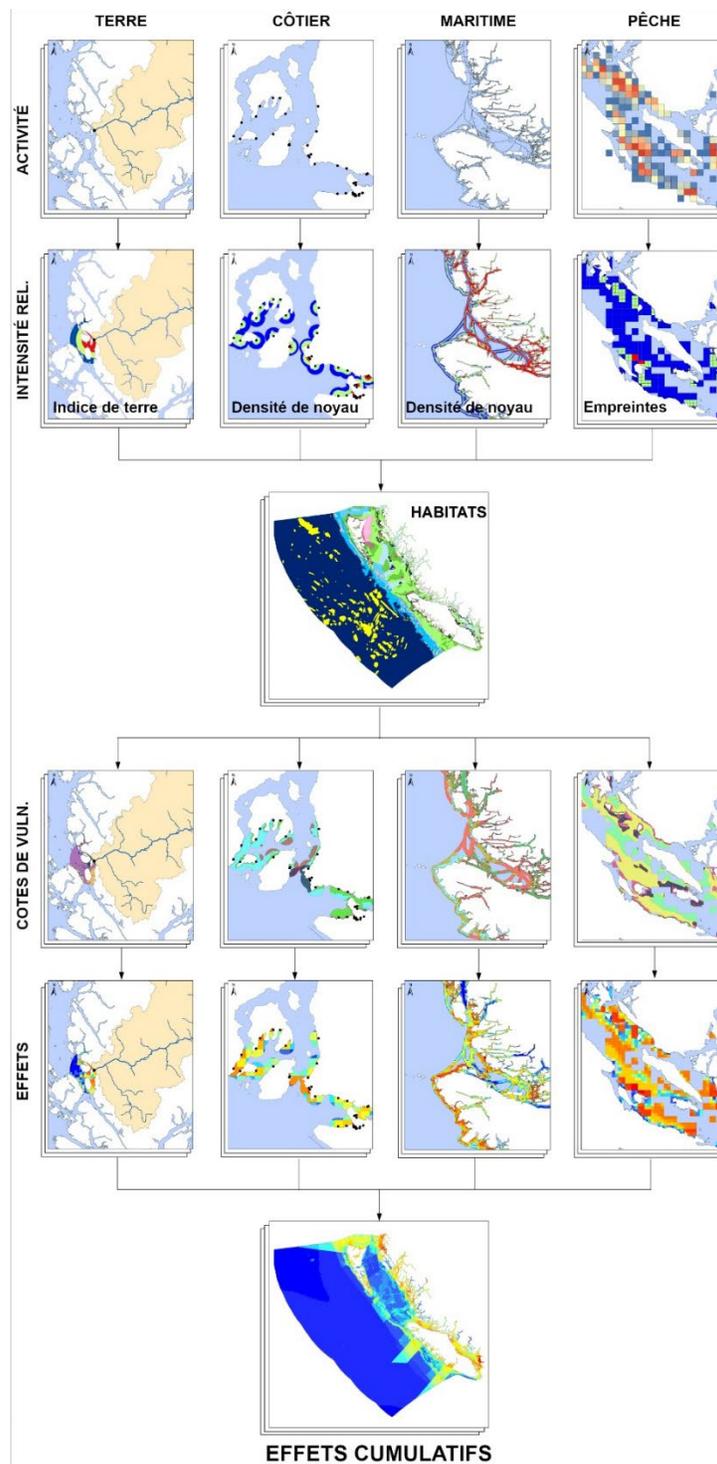


Figure 1 : Figure présentant un aperçu des méthodes de cartographie des effets cumulatifs. Les données relatives à l'activité humaine peuvent être divisées en quatre types : terrestres, côtières, maritimes et pêche. L'intensité relative de chaque couche d'activité a été croisée avec les habitats (benthiques, biogéniques et pélagiques) et des cotes de vulnérabilité ont été attribuées aux combinaisons activité-habitat. Toutes les cotes d'effets ont été additionnées pour toutes les couches d'activité et tous les habitats afin de calculer les cotes d'effets cumulatifs. Adapté de Clarke Murray et al. 2015b, figure supplémentaire 1.

2.2. HABITATS

La cartographie des effets cumulatifs met largement l'accent sur les effets sur les habitats, comme substitut des effets sur l'écosystème soutenu par cet habitat. Les habitats peuvent comprendre des habitats benthiques et pélagiques, ainsi que des habitats biogéniques comme des récifs d'éponges ou des herbiers marins. D'autres travaux ont élargi la méthode de manière à inclure les effets sur les espèces animales et végétales (Hammar *et al.* 2020; Maxwell *et al.* 2013; Trew *et al.* 2019; O'Hara *et al.* 2021), via les réseaux alimentaires (Beauchesne *et al.* 2021), ou sur les services écosystémiques (Singh *et al.* 2020).

2.2.1. Habitats du Pacifique

Les habitats de l'étude la plus récente portant sur le Pacifique canadien étaient basés sur les classes d'habitats utilisées dans les exercices antérieurs d'évaluation de la vulnérabilité (Teck *et al.* 2010). Celles-ci ont été stratifiées par profondeur, substrat et type géomorphologique (tableau 1) et couvrent l'ensemble de la zone économique exclusive canadienne avec des polygones qui ne se chevauchent pas (figure 2). Des habitats biogéniques comme les herbiers marins, le varech et les récifs d'éponges ont été placés au-dessus du type d'habitat benthique pertinent. Les habitats pélagiques ont été stratifiés selon la profondeur, où les zones pélagiques peu profondes représentaient la zone photique et les zones pélagiques profondes représentaient les zones aphotiques et abyssales. Les cartes et modèles d'habitats existants ont été utiles pour la création de l'ensemble de données, par exemple les modèles de substrats peu profonds et profonds (Gregr *et al.* 2021), et les parcelles de hauts-fonds (Gregr *et al.* 2013). Cependant, nous n'avons pas pu utiliser les modèles d'habitats existants du Pacifique canadien en raison d'une inadéquation entre ces modèles et les habitats utilisés dans la matrice de vulnérabilité. Le modèle de cartographie des effets cumulatifs exige une correspondance exacte entre les données d'entrée sur l'habitat et les habitats évalués dans le cadre de l'évaluation de la vulnérabilité. Ainsi, les habitats du Pacifique sont dérivés de ceux de Teck *et al.* (2010).

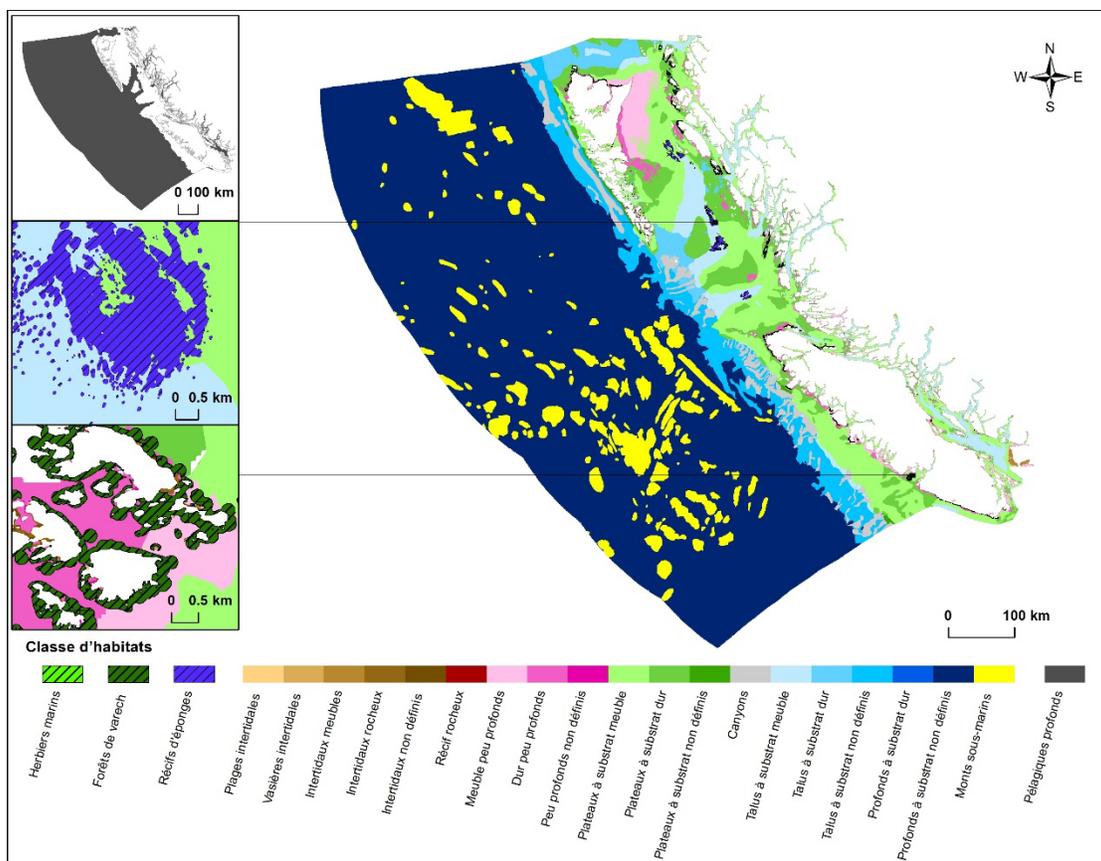


Figure 2 : Classes d'habitats définies dans le Pacifique canadien pour la cartographie des effets cumulatifs (d'après Clarke Murray et al. 2015b, matériel supplémentaire, figure 3). Les habitats biogéniques (herbiers marins, varech et récifs d'éponges) sont superposés aux classes d'habitats géophysiques. Les habitats profonds à substrat meuble ne sont pas représentés, faute de données suffisantes. Les habitats pélagiques peu profonds ne sont pas représentés. Les habitats dont la profondeur est connue mais dont le substrat est inconnu sont cartographiés, mais utilisent une cote de vulnérabilité moyenne pour le type d'habitat (p. ex., la cote de l'habitat intertidal non défini est une moyenne des cotes des classes d'habitats intertidaux durs et meubles).

Tableau 1 : Définition des types d'habitats utilisés dans le Pacifique canadien aux fins de la cartographie des effets cumulatifs. Les habitats dont la profondeur est connue mais dont le substrat est inconnu sont cartographiés, mais ne sont pas définis ici, car ils constituent un mélange des autres types d'habitats (p. ex., la cote des habitats intertidaux non définis correspond à une combinaison des habitats intertidaux meubles et durs).

Classe d'habitats	Catégorie d'habitats	Intervalle de profondeur (m)	Description
Plages intertidales	Habitats intertidaux	Zones entre les lignes de haute marée et de basse marée	Zones intertidales caractérisées par des sédiments meubles (principalement du sable) qui sont affectées par les marées et l'activité de l'eau (vagues du rivage), c'est-à-dire les plages de sable
Vasières intertidales	Habitats intertidaux	Zones entre les lignes de haute marée et de basse marée	Zones intertidales relativement plates caractérisées par des sédiments fins (vase) qui sont submergées ou exposées par les changements de marée. P. ex. les vasières

Classe d'habitats	Catégorie d'habitats	Intervalle de profondeur (m)	Description
Habitats intertidaux meubles	Habitats intertidaux	Zones entre les lignes de haute marée et de basse marée	Habitats à sédiments meubles (sable/limon/vase) de la zone intertidale
Habitats intertidaux durs / rocheux	Habitats intertidaux	Zones entre les lignes de haute marée et de basse marée	Habitats rocheux ou littoraux rocheux dans la zone de marée
Forêts de varech	Habitats peu profonds (infratidaux)	0 à 30 m	Habitats résultant de la présence de très grandes algues brunes formant un couvert (Laminariales ou Fucales) soutenues par un substrat dur, p. ex., le nereocystis de Lutke (<i>Nereocystis luetkeana</i>) et la laminaire géante (<i>Macrocystis pyrifera</i>)
Herbiers marins	Habitats peu profonds (infratidaux)	0 à 30	Habitats résultant de la présence de zostère marine (<i>Zostera marina</i>) dans des sédiments meubles (sable/vase) recouverts d'eau. Peuvent être intertidaux ou infratidaux
Habitats à substrat meuble peu profonds	Habitats peu profonds (infratidaux)	0 à 30	Habitats à sédiments meubles (sable/limon/vase) jusqu'à 30 m de profondeur
Habitats à substrat dur peu profonds	Habitats peu profonds (infratidaux)	0 à 30	Habitats à substrat dur (rocheux) et récifs rocheux jusqu'à 30 m de profondeur
Plateaux à substrat meuble	Plateaux	30 à 200 m	Habitats à sédiments meubles (sable, limon, vase) sur le plateau continental
Plateaux à substrat dur	Plateaux	30 à 200	Habitats à substrat dur (rocheux) et récifs rocheux sur le plateau continental
Récifs d'éponges	Plateaux	30 à 200	Écosystèmes uniques au monde où les éponges forment un récif en se développant sur les squelettes d'éponges mortes sur un substrat meuble.
Talus à substrat meuble	Talus	200 à 2 000 m	Habitats à substrat meuble le long du talus continental, au-delà de l'accore du plateau, et quelques habitats de fjords profonds le long de la côte. Certains habitats de fjords le long de la côte se situent également dans cette fourchette de profondeur.
Talus à substrat dur	Talus	200 à 2 000	Habitats à substrat dur le long du talus continental, au-delà de l'accore du plateau. Certains habitats de fjords le long de la côte se situent également dans cette fourchette de profondeur.
Canyons	Talus	200 à 2 000	Canyons sous-marins, vallées à parois abruptes creusées dans le fond marin du

Classe d'habitats	Catégorie d'habitats	Intervalle de profondeur (m)	Description
			talus continental (pouvant s'étendre au plateau continental).
Monts sous-marins	Habitats profonds	> 2000 m	Montagnes submergées d'une hauteur supérieure à 1 000 m au-dessus du fond marin, qui abritent généralement une riche communauté biologique, même lorsque les zones environnantes sont improductives. Les monts sous-marins mesurent plus de 2000 m à partir de leur base, mais les sommets sont parfois moins profonds.
Habitats profonds à substrat meuble	Habitats profonds	> 2000	Habitats à sédiments meubles (sable/limon/vase) au-delà de 2 000 m de profondeur
Habitats profonds à substrat dur	Habitats profonds	> 2000	Habitats à substrat dur (rocheux) > 2 000 m de profondeur
Habitats pélagiques peu profonds	Habitats pélagiques	0 à 200 m	Habitats en eau libre où les organismes sont entourés d'eau (sans surface, ni côté, ni fond); dans la zone pélagique, des eaux de surface jusqu'à 200 m de profondeur. Représentatifs de la zone photique
Habitats pélagiques profonds	Habitats pélagiques	> 200 m	Habitats en eau libre où les organismes sont entourés d'eau (sans surface, ni côté, ni fond); dans la zone pélagique, à plus de 200 m de profondeur. Représentatifs des zones aphotiques et abyssales

2.2.2. Habitats de l'Atlantique

La cartographie des habitats de l'Atlantique aux fins de la cartographie des effets cumulatifs est en cours (figure 3) et les définitions ont été adaptées de Teck *et al.* (2010) et de Kappel *et al.* (2012a, b) (tableau 2). À l'instar du Pacifique, des habitats biogéniques (marais salés, varech, zone d'algues, herbier marin, bioherme de modioles, coraux, éponges et enclos marins d'eau profonde) ont été superposés sur les habitats benthiques de base. Les habitats pélagiques ont été stratifiés selon la profondeur, l'habitat pélagique dans les eaux de moins de 30 m de profondeur étant considéré comme faisant partie de l'habitat benthique (c'est-à-dire entièrement couplé) selon Kappel *et al.* (2012a, b).

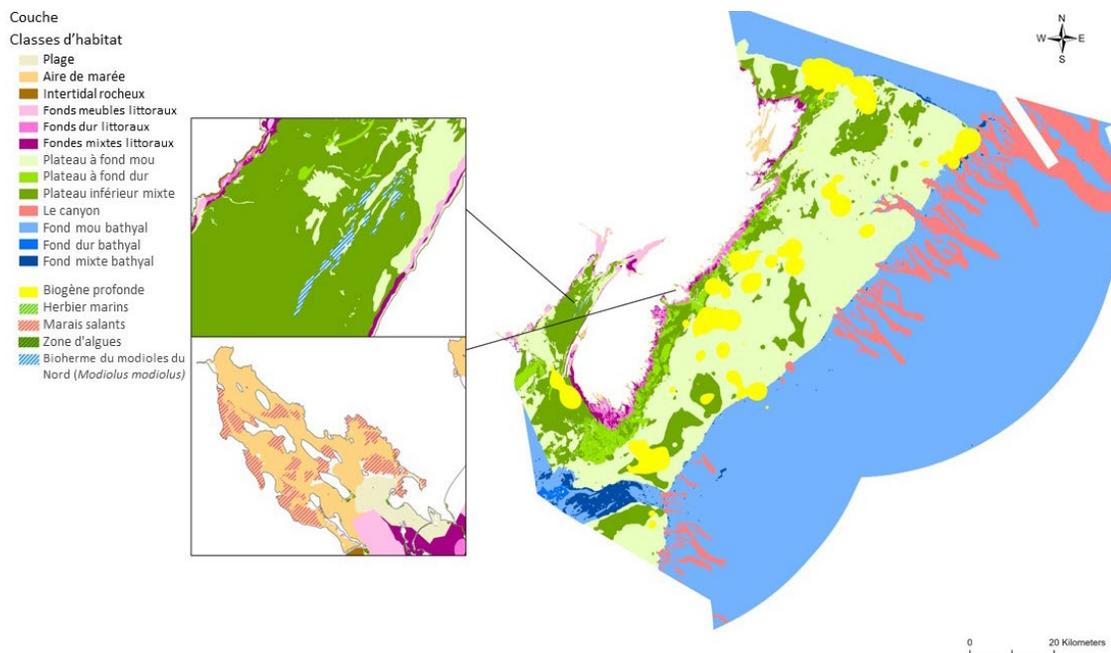


Figure 3 : Classes d'habitats définies pour l'Atlantique canadien (adapté de Kappel et al. 2012a, b). L'habitat de la forêt de varech n'est actuellement pas inclus dans la carte en raison de l'insuffisance des données.

Tableau 2 : Définition des types d'habitats utilisés pour l'Atlantique canadien (adaptée de Kappel et al. 2012a, b).

Classe d'habitats	Catégorie d'habitats	Intervalle de profondeur (m)	Description
Plages	Habitats intertidaux	0 à 2	Habitats littoraux de sable, de galets, de cailloux ou de sédiments mixtes dans la zone de marée
Replats de marée	Habitats intertidaux	0 à 2	Habitats de sable ou de vase non végétalisés dans la zone de marée
Habitats intertidaux rocheux	Habitats intertidaux	0 à 2	Habitats rocheux ou littoraux rocheux dans la zone de marée
Marais salés	Habitats intertidaux	0 à 2	Marais (p. ex., dominés par des espèces de <i>Spartina</i>) ou habitats estuariens ou littoraux végétalisés dans la zone de marée
Varech	Habitats infratidaux	2 à 30	Habitats infratidaux du littoral dominés par des laminariées formant un couvert (p. ex. des espèces de <i>Laminaria</i> , <i>Saccharina</i>)
Zones d'algues	Habitats infratidaux	2 à 30	Habitats infratidaux du littoral dominés par des espèces de fucus
Herbiers marins	Habitats infratidaux	2 à 30	Habitats infratidaux du littoral dominés par l'espèce <i>Zostera marina</i>

Classe d'habitats	Catégorie d'habitats	Intervalle de profondeur (m)	Description
Habitats à substrat meuble du littoral	Habitats infratidaux	2 à 30	Substrat meuble subtidal constitué de vase, de sable et de vase, ou de sable
Habitats à substrat mixte du littoral	Habitats infratidaux	2 à 30	Substrat de sable et de gravier, de sédiments mixtes ou de sédiments de gravier
Habitats à substrat dur du littoral	Habitats infratidaux	2 à 30	Substrat subtidal dur avec blocs, substrat rocheux continu ou discontinu
Biohermes de modioles	Plateaux	30 à 200	Masses récifales formées par l'accumulation de sable et de coquilles de modioles
Plateaux à substrat meuble	Plateaux	30 à 200	Vase, sable et substrats de vase ou de sable
Plateaux à substrat mixte	Plateaux	30 à 200	Substrat de sable et de gravier, de sédiments mixtes ou de gravier
Plateaux à substrat dur	Plateaux	30 à 200	Blocs rocheux, substrat rocheux continu ou discontinu
Habitats pélagiques peu profonds	Plateaux	30 à 200	Habitats en eau libre où les organismes sont entourés d'eau; dans la zone pélagique au-dessus de 200 m et dans toutes les zones situées à plus de 30 m de profondeur. Remarque : la zone pélagique de moins de 30 m de profondeur est considérée comme couplée à l'habitat benthique.
Habitats de substrat meuble bathyaux	Habitats profonds	> 200	Substrat de limon, de vase ou de sable
Habitats de substrat mixte bathyaux	Habitats profonds	> 200	Substrat de sable et de gravier, de sédiments mixtes ou de gravier
Habitats de substrat dur bathyaux	Habitats profonds	> 200	Substrat de galets, de blocs ou de roches
Habitats biogéniques profonds	Habitats profonds	> 200	Zones importantes dominées par des communautés de coraux (Alcyonacea), d'éponges (Porifera) et de plumes de mer (Pennatulacea) d'eau froide
Canyons	Habitats profonds	> 200	Canyons sous-marins, vallées à parois abruptes creusées dans les fonds marins du talus continental
Habitats pélagiques profonds	Habitats profonds	> 200	Habitats en eau libre où les organismes sont entourés d'eau; dans la zone pélagique, à plus de 200 m de profondeur

2.3. ACTIVITÉS HUMAINES ET FACTEURS DE STRESS

Les activités humaines affectent les écosystèmes par le biais d'un ou de plusieurs facteurs de stress (parfois appelés pressions). Les activités humaines sont les actions qui sont menées pour l'utilisation des ressources, le transport ou le tourisme et peuvent comprendre des activités entièrement marines, côtières et terrestres qui ont certains effets sur le milieu marin. Les activités marines se déroulent dans l'océan (p. ex. le transport maritime, la pêche, l'immersion en mer), tandis que les activités côtières se déroulent à l'interface entre la terre et la mer (p. ex. les ports de plaisance, l'aquaculture, les barrages flottants). Dans la cartographie des effets cumulatifs, la représentation spatiale des activités humaines est souvent effectuée au niveau de l'activité (pêche, navigation, aquaculture, etc.), mais peut aussi être effectuée au niveau des facteurs de stress (bruit, polluants, espèces envahissantes, etc.). Un facteur de stress est « tout élément physique, chimique ou biologique qui, à un niveau d'intensité donné, est susceptible de modifier un écosystème ou une ou plusieurs de ses composantes » [traduction] (O *et al.* 2015). Plusieurs facteurs de stress peuvent être associés à une même activité. Les activités et les facteurs de stress pris en compte dans la présente étude sont présentés dans le tableau 3.

La méthode de cartographie des effets cumulatifs traite les activités et les facteurs de stress de la même manière et l'utilisateur peut décider du niveau à employer. Les études précédentes ont généralement attribué un seul facteur de stress représentatif à une activité pour des raisons pratiques (Afflerbach *et al.* 2017; Andersen *et al.* 2015; Ban *et al.* 2010; Clarke Murray *et al.* 2015b; Halpern *et al.* 2009; Kappel *et al.* 2012a; Singh *et al.* 2020; Teck *et al.* 2010). Par exemple, Clarke Murray *et al.* (2015b) ont associé un facteur de stress à chacune des activités incluses dans leur analyse afin d'appliquer la cote de vulnérabilité de ce facteur de stress (voir Clarke Murray *et al.* 2015b, tableau 1). Cependant, certaines activités telles que l'aquaculture et la pêche se voient attribuer une cote de vulnérabilité directement parce que leurs effets sont bien connus grâce à des recherches approfondies, ce qui les rend plus simples à évaluer en tant qu'activité qu'en tant que série de facteurs de stress. Concernant d'autres activités, il se peut que l'on dispose de données sur un facteur de stress associé à l'activité, mais que l'on ne dispose pas d'informations suffisantes sur les autres. Par exemple, des données modélisées sur le bruit des navires dans la région du Pacifique sont disponibles (Erbe *et al.* 2012), mais les données sur les rejets de déchets de navires ne sont pas aussi facilement disponibles.

Au fur et à mesure que les recherches sur les effets des activités humaines sur l'environnement se poursuivent et que des données supplémentaires sont disponibles, de nouvelles possibilités se présenteront afin de soutenir la prise en compte de facteurs de stress multiples provenant d'activités uniques. Ceci, combiné aux progrès des outils d'analyse et à l'augmentation de la puissance de calcul, peut permettre d'attribuer des facteurs de stress multiples à chaque activité, ce qui permet une représentation plus complète des effets cumulatifs.

Chaque activité ou facteur de stress est représenté dans le modèle de cartographie des effets cumulatifs sous la forme d'une valeur d'intensité relative. Les valeurs d'intensité relatives peuvent être dérivées de diverses façons, selon la nature de l'activité ou du facteur de stress, la façon dont ils peuvent interagir avec l'habitat et la disponibilité des données. Par exemple, les intensités relatives peuvent être dérivées de la zone couverte par une empreinte physique (p. ex. construction d'une structure permanente sur le fond marin), de la quantité de polluants rejetés par une source ponctuelle (p. ex. charges de contaminants rejetées par les points de rejets des eaux usées) ou de la durée d'une activité dans chaque cellule de la grille (p. ex. les heures d'effort consacrées à la pêche dans des zones particulières). Pour les activités marines avec des données polygonales ou rectangulaires, l'intensité peut être le nombre d'heures d'effort, le nombre d'événements de pêche par cellule ou le total des captures, et elle est pondérée en fonction de la superficie, le cas échéant. Pour les données ponctuelles côtières et marines ou les caractéristiques linéaires, une densité de noyau peut être appliquée avec la plus

forte intensité à la source, jusqu'à une distance d'effets maximale basée sur des valeurs dérivées de la littérature lorsqu'elles sont disponibles, ou la distance équivalente à la taille minimale des cellules de la grille (Ban *et al.*. 2010, Clarke Murray *et al.* 2015b). Pour les activités terrestres (données polygonales, linéaires ou ponctuelles), un modèle de panache diffus fondé sur le chemin de moindre coût ou une distance de l'effet de densité du noyau peuvent être utilisés afin de répartir les niveaux de facteurs de stress à partir de l'embouchure du bassin versant (Halpern *et al.* 2008, Kappel *et al.* 2012a, b, Clarke Murray *et al.* 2015b). L'hydrodynamique (c'est-à-dire l'océanographie locale) n'est généralement pas prise en compte dans l'application de la densité du noyau ou de la surface du chemin des coûts en raison du manque de données.

Les unités et la plage des valeurs d'intensité varient selon le facteur de stress ou l'activité; par conséquent, il est nécessaire de normaliser les valeurs d'intensité les unes par rapport aux autres. Certaines études ont utilisé des valeurs transformées en logarithmes qui ont ensuite été rééchelonnées de 0 à 1 (Ban *et al.* 2010; Halpern *et al.* 2009; Halpern *et al.* 2008), et d'autres ont classé les valeurs d'intensité en trois classes (0,5 / 1,0 / 1,5) représentant des intensités élevées, moyennes et faibles en utilisant la méthode des seuils naturels, ou encore méthode de Jenks (Clarke Murray *et al.* 2015a, b). Lorsque la majorité des ensembles de données de l'étude sont disponibles sous forme de variables continues, la remise à l'échelle des données de 0 à 1 semble constituer la meilleure méthode de normalisation des données. La méthode des seuils naturels peut s'avérer utile lorsque les données d'activité disponibles sont peu détaillées ou ne sont disponibles que sous forme de données catégorielles. La transformation logarithmique est utile pour réduire l'influence des valeurs aberrantes extrêmes dans certaines couches de données et peut ne pas être nécessaire pour tous les ensembles de données.

*Tableau 3 : Définitions des activités et des facteurs de stress, adaptées de Teck *et al.* 2010, Ban *et al.* 2010, et Clarke Murray *et al.* 2015b. Les termes « altérant l'habitat » et « altérant faiblement l'habitat » font référence à la probabilité attendue d'altération de l'habitat, plutôt qu'à la quantité réelle. Les astérisques simples (*) indiquent les activités et les facteurs de stress propres à l'Atlantique, les astérisques doubles (**) indiquent les activités et les facteurs de stress propres au Pacifique.*

Activités humaines et facteurs de stress	Définition
Aquaculture : poissons à nageoires	Élevage marin de poissons à nageoires, y compris le saumon. Les facteurs de stress peuvent inclure l'apport de biomasse, les effets de l'infrastructure, l'apport de nutriments, l'ombrage, la lumière artificielle et le bruit
Aquaculture : plantes et algues	Culture marine de plantes et d'algues. Les facteurs de stress peuvent inclure l'apport de biomasse, les effets de l'infrastructure, l'apport de nutriments, l'ombrage, la lumière artificielle et le bruit
Aquaculture : mollusques et crustacés	Élevage marin de mollusques et de crustacés. Les facteurs de stress peuvent inclure l'apport de biomasse, les effets de l'infrastructure, l'apport de nutriments, l'ombrage, la lumière artificielle et le bruit
Structures benthiques	Présence de structures reliées au substrat benthique; par exemple, pipelines, structures de communication, plateformes pétrolières et gazières, éoliennes, etc.

Activités humaines et facteurs de stress	Définition
Changement climatique : acidification des océans	Eau de mer de plus en plus acidifiée
Changement climatique : élévation du niveau de la mer	Élévation du niveau de la mer
Changement climatique : changement de la température de la mer	Changement de la température de la mer
Changement climatique : changement du rayonnement ultraviolet	Augmentation de l'exposition aux ultraviolets
Travaux maritimes : modification de la dynamique de l'écoulement de l'eau	Modification de la dynamique de l'écoulement de l'eau en raison de la présence de digues, de quais, de jetées, etc.
Travaux maritimes : altération de l'habitat	Altération de l'habitat par la construction de structures permanentes ou la modification du substrat. L'ajout de digues, de quais et de jetées ajoute un nouveau substrat dur, tandis que la recharge en sable des plages, l'extraction de sable, le remblayage et la remise en état peuvent recouvrir ou supprimer l'habitat existant
Effet direct de l'activité humaine : piétinement	Domages causés par les hommes et les animaux domestiques qui marchent sur le substrat intertidal ou qui pataugent dans les eaux peu profondes
Maladie ou agents pathogènes	Maladies ou agents pathogènes introduits dans l'environnement marin; ils peuvent provenir des eaux usées, des écoulements urbains, de l'aquaculture, de l'eau de ballast, etc. Inclut les bactéries, les champignons, les parasites et les virus qui provoquent des maladies chez l'homme ou chez les organismes marins.
Dragage	Excavation du fond marin par enlèvement du sable, de la vase, des mauvaises herbes, etc. à l'aide d'un appareil de dragage. Les facteurs de stress peuvent inclure les perturbations physiques, la sédimentation et le bruit
Infrastructures énergétiques : gaz naturel liquide*	Structures liées aux terminaux de gaz naturel liquide, y compris les installations de liquéfaction, les installations de stockage, les installations de regazéification et les ports d'importation et d'exportation. Les facteurs de stress peuvent inclure les perturbations physiques, les structures benthiques, le bruit et l'apport de polluants
Infrastructures énergétiques : énergie marémotrice*	Structures liées aux usines d'énergie marémotrice, y compris les turbines, les systèmes de barrage, les sous-stations, les infrastructures connexes et les câbles électriques. Les facteurs

Activités humaines et facteurs de stress	Définition
	de stress peuvent inclure les perturbations physiques, les structures benthiques et le bruit
Pêche : aquarium	Poissons vivants, invertébrés et plantes capturés pour la vente dans l'aquariophilie locale et mondiale. Peut se produire par le biais de pièges, du ramassage à la main et de la collecte en plongée.
Pêche : démersale, altérant l'habitat	<p>Prélèvement de biomasse lors de l'utilisation d'engins de pêche démersale connus pour endommager l'habitat et le substrat.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Exemples de types d'engins de pêche dans l'Atlantique : filet maillant de fond, chalut de fond (à panneaux), palangre de fond, drague à pétoncle, drague hydraulique, chalut à crevettes, dragueur de myes • Exemples de types d'engins de pêche dans le Pacifique : chalut de poissons de fond, plongée/chalut à pétoncle, chalut à crevettes
Pêche : démersale, altérant peu l'habitat, prises accessoires importantes	<p>Prélèvement de biomasse lors de l'utilisation d'engins de pêche démersale, entraînant des prises accessoires importantes susceptibles d'altérer accidentellement l'habitat.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Exemples de types d'engins de pêche dans l'Atlantique : filet maillant, senne • Exemples de types d'engins de pêche dans le Pacifique : lignes et hameçons pour flétan, palangre pour morue charbonnière, lignes et hameçons pour sébaste
Pêche : démersale, altérant peu l'habitat, faibles prises accessoires	<p>Prélèvement de biomasse lors de l'utilisation d'engins dont les prises accessoires sont faibles ou inexistantes et qui peuvent entraîner une altération accidentelle de l'habitat.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Exemples de types d'engins de pêche dans l'Atlantique : pêche en plongée (oursin), pêche au casier (crabe des neiges, homard côtier) • Exemples de types d'engins de pêche dans le Pacifique : casier à crabes, pêche en plongée pour la panope du Pacifique, pêche en plongée pour le pouce-pied, pêche en plongée pour l'oursin vert, pêche en plongée pour le poulpe, casier à crevettes, pêche en plongée pour l'oursin rouge, piège pour la morue charbonnière, ligne et hameçon pour les espèces de l'Annexe II (autres poissons de fond), pêche en plongée pour le concombre de mer
Pêche : altérant peu l'habitat, artisanale	Pêche artisanale utilisant relativement peu de capital et d'énergie, des navires de pêche relativement petits (s'il y en a),

Activités humaines et facteurs de stress	Définition
	<p>effectuant de courtes sorties de pêche, près du rivage, principalement pour la consommation locale.</p> <ul style="list-style-type: none"> Exemples de types d'engins de pêche dans le Pacifique : collecte manuelle, pêche à la ligne, à la senne et au filet maillant
Pêche : pélagique, prises accessoires importantes	<p>Prélèvement de biomasse lors de l'utilisation d'engins pélagiques présentant des taux élevés de captures non ciblées, mais ne posant pas de problèmes connus de destruction de l'habitat benthique.</p> <ul style="list-style-type: none"> Exemples de types d'engins de pêche dans l'Atlantique : pêche à l'appât du hareng de l'Atlantique (filet maillant pélagique), palangre pélagique, chaluts pélagiques, senne coulissante (hareng, maquereau) Exemples de types d'engins de pêche dans le Pacifique : filet maillant à rogue de hareng, senne à rogue de hareng, senne à hareng, senne à krill, filet maillant à saumon, senne à saumon, senne à sardine
Pêche : pélagique, faibles prises accessoires	<p>Prélèvement de biomasse lors de l'utilisation d'engins pélagiques présentant de faibles taux de captures non ciblées et ne posant pas de problèmes connus de destruction de l'habitat.</p> <ul style="list-style-type: none"> Exemples de types d'engins dans l'Atlantique : harpon (espadon, thon), ligne à main, ligne tendue Exemples de types d'engins de pêche dans le Pacifique : cuiller pour la pêche au saumon
Pêche : récréative	<p>Prélèvement de biomasse par les pêcheurs récréatifs; peut causer des dommages accidentels à l'habitat.</p> <ul style="list-style-type: none"> Exemple de l'Atlantique : pêche sportive Exemples de types d'engins de pêche dans le Pacifique : ligne et hameçon anadromes, casier à crabes, ligne et hameçon pour poissons de fond, casier à crevettes
Eau douce : diminution de l'apport	<p>Diminution de l'apport d'eau douce dans les eaux marines en raison de modifications du débit, de la construction de barrages, de la dérivation des terres agricoles, etc.</p>
Eau douce : augmentation de l'apport	<p>Augmentation de l'apport d'eau douce dans les eaux marines en raison de modifications du débit, de la canalisation, etc.</p>
Espèces envahissantes	<p>Espèces non indigènes introduites par le transport maritime, l'aquaculture, l'aquariophilie, l'aménagement du littoral, etc.</p>
Composante marine des opérations forestières**	<p>Stockage et manutention des grumes dans les zones côtières. Les barrages flottants peuvent faire de l'ombre au benthos</p>

Activités humaines et facteurs de stress	Définition
	situé en dessous et les débris ligneux peuvent étouffer le fond marin
Activité militaire	Activités militaires, y compris la formation, la maintenance, le service actif, etc. Les facteurs de stress peuvent inclure les opérations des navires, les sonars, les essais d'explosifs, etc.
Apport de nutriments dans les eaux eutrophes	Ajout d'une charge de nutriments plus importante que d'habitude dans des eaux déjà riches en nutriments
Apport de nutriments dans les eaux mésotrophes**	Ajout d'une charge de nutriments plus importante que d'habitude dans des eaux présentant un niveau intermédiaire de nutriments
Apport de nutriments dans les eaux oligotrophes*	Ajout d'une charge de nutriments plus importante que d'habitude dans des eaux à faible teneur en nutriments
Apport de nutriments : à l'origine de la prolifération d'algues nuisibles	Prolifération d'algues nuisibles causée par l'apport de nutriments. Par exemple, épidémies d'intoxication paralysante par les mollusques à proximité des exutoires de la ville
Apport de nutriments : à l'origine de zones hypoxiques	Oxygène anormalement bas causé par l'apport de nutriments; peut entraîner la mort des poissons
Rejet en mer : engins de pêche perdus	Perte accidentelle de filets, de palangres, etc. qui ne sont pas récupérés
Rejet en mer : débris marins	Rejet accidentel ou intentionnel de débris dans l'océan, provenant d'activités terrestres ou océaniques. P. ex. plastiques, bouteilles, déchets divers
Rejet en mer : naufrages	Épaves nouvelles et historiques, coulées ou échouées, de navires de plaisance et de navires commerciaux. Les facteurs de stress peuvent inclure les perturbations physiques, les nouvelles structures benthiques, le bruit et l'apport de polluants
Rejet en mer : matières toxiques	Les déchets chimiques rejetés dans l'océan peuvent être une activité autorisée ou illégale
Exploitation minière des océans : sable, minéraux, etc.	Exploiter les fonds marins pour en extraire des matériaux de valeur. Il peut s'agir de l'exploitation de cheminées hydrothermales, de plages de nodules, de l'exploitation de gaz/pétrole, de diamants, de sable/gravier ou de l'exploitation de coraux à grande échelle. Les facteurs de stress peuvent inclure les perturbations physiques, la sédimentation et le bruit
Pollution des océans par les navires et les ports	Pollution causée par les navires et les ports. Il peut s'agir d'eau de cale, de rejets d'épurateurs, de débris de peinture antisalissure, de résidus d'huile ou de carburant, de déchets, etc.

Activités humaines et facteurs de stress	Définition
Apport de polluants : atmosphériques	Dépôt atmosphérique de polluants se déposant dans l'air; il peut s'agir de poussières, de carbone noir, de carburéacteur, de métaux lourds
Apport de polluants : inorganiques	Apport de polluants inorganiques, y compris, mais sans s'y limiter, les métaux lourds, les oligo-éléments, les acides minéraux, les métaux, les composés métalliques, les sels inorganiques, les sulfates, les cyanures, les produits pétroliers, les peintures antisalissures, l'eau de cale, etc.
Apport de polluants : lumière	Lumière en dehors de la plage naturelle de l'habitat. Par exemple, les feux de navigation des navires éclairant les eaux environnantes et les substrats benthiques
Apport de polluants : bruit	Bruit en dehors de l'aire de répartition naturelle de l'habitat. Par exemple, le bruit d'un moteur de bateau ou d'une chaîne d'ancre
Apport de polluants : organiques	Apport de polluants organiques, y compris, mais sans s'y limiter, les insecticides, les herbicides, les PCB, les phtalates, les dioxines
Apport de polluants : écoulements urbains	Eau et matières associées qui s'écoulent des zones urbaines et qui peuvent atteindre l'océan par les rivières, les égouts pluviaux ou les écoulements terrestres
Centrales électriques et usines de dessalement	L'eau est prélevée afin de refroidir les centrales électriques ou pour le dessalement, entraînant le développement de larves, de petites plantes, etc. issues d'une zone située autour des tuyaux de prise d'eau. Il peut également y avoir rejet d'eau chauffée
Recherche scientifique et collecte	Collecte d'organismes pour la recherche, avec prélèvement de biomasse du système. Ramassage manuel ou collecte en scaphandre autonome ou véhicule télécommandé. Les facteurs de stress peuvent inclure le prélèvement de biomasse, les perturbations physiques et le bruit
Expériences de recherche ou levés scientifiques	Domages accidentels ou intentionnels causés par des expériences ou des relevés scientifiques. Biomasse non prélevée. Les facteurs de stress peuvent inclure les perturbations physiques et le bruit
Apport de sédiments : diminution	Ajout de sédiments plus faibles que d'habitude dans l'eau, par exemple, changement de substrat en amont en faveur de sédiments moins mobiles
Apport de sédiments : augmentation	Ajout de sédiments plus importants que d'habitude dans l'eau, par exemple, réduction de la végétation près des rivières, ce qui permet aux sédiments de pénétrer dans l'eau et de s'écouler vers l'océan

Activités humaines et facteurs de stress	Définition
Transport maritime (grands navires)	Perturbation causée par les grands navires, y compris la navigation commerciale, la circulation des traversiers et des bateaux de croisière. Les facteurs de stress peuvent inclure les perturbations physiques dues aux échouages/collisions et à l'ancrage, aux collisions, au bruit, au sillage et à la turbulence
Tourisme : kayak	Perturbation causée par les activités de tourisme et de loisirs en kayak. Les facteurs de stress peuvent inclure des perturbations physiques dues à un échouage accidentel, le fait de traîner des kayaks dans la zone intertidale pour les stocker au-dessus de la ligne de marée haute, et le bruit
Tourisme : navigation de plaisance	Navigation de plaisance, y compris les excursions et l'utilisation personnelle. Les facteurs de stress peuvent inclure le bruit, le sillage et la turbulence, ainsi que les perturbations physiques dues aux échouages/collisions et à l'ancrage qui en découle
Tourisme : plongée en scaphandre autonome	Perturbations physiques causées par les visites répétées des plongeurs en scaphandre autonome et des activités de plongée. Les facteurs de stress peuvent inclure les perturbations physiques dues à l'ancrage et aux plongeurs, la lumière du navire et des plongeurs, et le bruit
Tourisme : surf	Perturbations physiques causées par les surfeurs et leur matériel. Les facteurs de stress peuvent inclure les perturbations physiques dues à la marche dans la zone intertidale pour atteindre les vagues, le bruit et la présence humaine
Tourisme : observation des baleines*	Perturbation causée par les activités d'observation des baleines. Les facteurs de stress peuvent être le bruit, le sillage et la turbulence

2.4. MATRICE DE VULNÉRABILITÉ

La vulnérabilité (ou sensibilité) des composantes de l'écosystème aux facteurs de stress est un élément clé de toute évaluation environnementale et donc de la cartographie des effets cumulatifs. Cependant, toutes les études ne définissent pas la vulnérabilité de la même manière, ce qui peut conduire à des résultats variables et incompatibles.

« L'incidence d'une menace sur une espèce ou un écosystème est déterminée par la vulnérabilité de l'écosystème à cette menace » – Halpern *et al.* (2007)

La vulnérabilité peut être définie comme le potentiel de perte ou la probabilité de perte de biodiversité, comme une combinaison de l'exposition et de l'intensité d'une menace avec ses conséquences ou ses effets (Wilson *et al.* 2005), ou comme la gravité de la réponse d'un système à des effets néfastes résultant de l'exposition, de la sensibilité ou de la capacité d'adaptation d'un système (Adger 2006). Les cotes de vulnérabilité donnent une évaluation relative des effets d'un facteur de stress ou d'une activité sur un écosystème ou ses composantes. La vulnérabilité peut être organisée sous la forme d'une matrice entre les facteurs de stress et les cibles (écosystèmes, habitats ou espèces) afin d'obtenir une cote

relative pour chaque paire (matrice de vulnérabilité). Étant donné la complexité de la normalisation des effets entre les facteurs de stress et les habitats, la plupart des cotes de vulnérabilité ont été déterminées sur la base d'une étude par jugements d'experts ou d'une revue de la littérature (Halpern *et al.* 2007; Maxwell *et al.* 2013; Teck *et al.* 2010). Les cotes obtenues sont utilisées comme facteurs de pondération dans le modèle de cartographie des effets cumulatifs lorsqu'il y a une intersection entre un habitat et un facteur de stress ou une activité.

2.5. FORMULE DES EFFETS CUMULATIFS

Les cotes d'effets cumulatifs (I_c) sont calculées selon l'équation 1 :

$$I_c = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m D_i * E_j * \mu_{i,j} \quad (1)$$

où D_i est la valeur transformée en logarithmique et normalisée (par exemple, échelonnée entre 0 et 1) d'une activité anthropique i , E_j est la présence ou l'absence d'un habitat ou d'un écosystème j (1 ou 0, respectivement), et $\mu_{i,j}$ est la pondération de la vulnérabilité pour l'activité anthropique i et l'écosystème j (d'après Teck *et al.* 2010), compte tenu de n activités et de m écosystèmes. Les valeurs pour toutes les activités et tous les types d'habitats ont été additionnées pour chaque cellule de la grille afin d'obtenir la cote d'effets cumulatifs par cellule dans la zone d'étude.

3. CARTOGRAPHIE DES EFFETS CUMULATIFS AU CANADA

Jusqu'à présent, les efforts visant à cartographier les effets cumulatifs sur les habitats marins au Canada se sont principalement concentrés sur la région du Pacifique. La première étude menée par Ban et ses collègues (2010) a adapté à la région du Pacifique les méthodes appliquées dans la région du courant de Californie. Clarke Murray et ses collègues (2015b) ont par la suite apporté des améliorations méthodologiques supplémentaires à l'analyse et ont généré des cotes d'effets cumulatifs actualisées en utilisant des ensembles de données plus récents lorsqu'ils étaient disponibles.

3.1. BAN ET AL. 2010

La méthode de cartographie des effets cumulatifs a été appliquée pour la première fois aux habitats marins du Pacifique canadien par Ban *et al.* (2010) (figure 4). Ils ont procédé à une revue de la littérature afin d'explorer les liens entre chaque activité se déroulant dans le Pacifique canadien et les facteurs de stress prédominants, et ont croisé ces facteurs de stress avec le tableau de vulnérabilité de Teck *et al.* (2010). Les cotes de vulnérabilité dans les matrices de Teck *et al.* (2010) ont ensuite été adaptées aux activités et facteurs de stress spécifiques au Pacifique canadien. Les cotes de vulnérabilité pour la pêche commerciale dans le Pacifique canadien ont été affinées sur la base des types d'engins de pêche, comme indiqué dans Chuenpagdee *et al.* (2003). Une discussion détaillée sur la matrice de vulnérabilité actuellement utilisée dans la région du Pacifique est présentée à la section 4.1.3.

Les avancées méthodologiques mises en œuvre par Ban *et al.* (2010) comprennent la définition explicite d'une zone autour de chaque activité qui dénote une zone d'influence probable, représentée par une décroissance linéaire. Cela tient compte des effets qui peuvent s'étendre au-delà de l'empreinte immédiate d'une activité ou d'une source ponctuelle, l'intensité des effets diminuant à mesure que l'on s'éloigne de l'activité. Cette méthode a été appliquée aux activités terrestres et marines, et seules les activités terrestres côtières situées à proximité de la zone d'effets probables ont été incluses dans l'analyse.

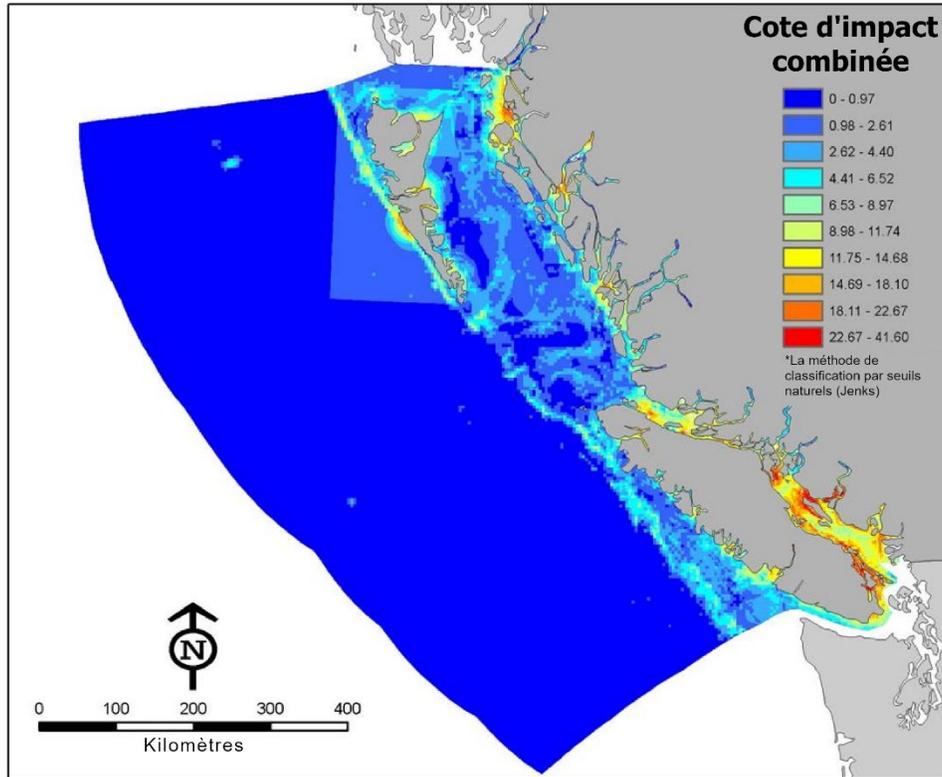


Figure 4 : Première carte des effets cumulatifs pour le Pacifique canadien (d'après Ban et al. 2010)

3.2. CLARKE MURRAY ET AL. 2015

L'application de la méthode de cartographie des effets cumulatifs au Pacifique canadien par Clarke Murray *et al.* (2015b) a inclus plusieurs changements par rapport à l'application par Ban *et al.* (2010), grâce à une plus grande puissance de calcul et à l'automatisation. Dans cette analyse, des données nouvelles et actualisées sur les activités ont été incluses, l'analyse des effets sur les terres a été améliorée de manière à inclure les activités des bassins hydrographiques comportant de grandes rivières et des ruisseaux se jetant directement dans l'océan Pacifique, et les classes d'habitats ont été actualisées de manière à inclure des données sur les habitats intertidaux et les récifs d'éponges.

Les activités humaines ont été divisées en quatre types de données : activités terrestres, côtières, marines et de pêche.

1. Les activités terrestres ont été cartographiées sous forme de points, de lignes ou de polygones, et normalisées en fonction de la taille du bassin versant afin de créer un indice qui est appliqué à l'embouchure de l'estuaire avec une décroissance linéaire de la densité du noyau, de façon à représenter une distance d'effets par rapport au volume du débit de la rivière.
2. Les activités côtières ont été représentées par des points ou des polygones, qui ont été utilisés pour créer une décomposition linéaire de la densité du noyau.
3. Les activités entièrement marines ont été représentées par des empreintes de polygones.
4. Les activités de pêche ont été représentées par l'intensité de l'effort de pêche dans des cellules de grille, des zones statistiques ou des polygones, en fonction de la pêche.

Pour chaque activité cartographiée, un facteur de stress représentatif a été déterminé à l'aide d'une revue de la littérature, le facteur de stress identifié étant utilisé pour se référer à la matrice de vulnérabilité de Teck *et al.* (2010), en suivant la méthode de Ban *et al.* (2010). Afin de représenter les effets supplémentaires de la présence d'un navire de pêche en plus du principal facteur de stress de l'activité, le facteur de stress de la navigation de plaisance a également été ajouté aux couches d'activités de pêche (p. ex., un événement impliquant un chalut de pêche se voit attribuer la cote du facteur de stress de la pêche destructrice, ainsi que la cote de la navigation de plaisance associée au navire).

Les classes d'habitats benthiques ont été mises à jour avec les données intertidales, et les classes d'habitats biogéniques (varechs, herbiers marins et récifs d'éponges) ont été séparées du benthos. Les habitats biogènes ont été superposés aux substrats de manière à ce que les effets puissent se produire à la fois sur l'habitat biogène (p. ex. l'herbier marin) et sur l'habitat sous-jacent (p. ex. le substrat meuble peu profond). Une liste complète des modifications apportées aux habitats peut être consultée dans Clarke Murray *et al.* (2015b), tableau supplémentaire 3. Pour les habitats non évalués dans l'étude de Teck *et al.* (2010), tels que les habitats dont la profondeur est connue, mais dont le substrat est inconnu (ou non défini), les cotes de vulnérabilité ont été calculées ou attribuées sur la base des cotes d'habitat existantes (tableau 4).

Tableau 4 : Les cotes de vulnérabilité qui ont été calculées ou attribuées sur la base des cotes d'habitat existantes de Teck et al. (2010), comme indiqué dans Clarke Murray et al. (2015b), tableau supplémentaire 4.

Habitat	Cote de vulnérabilité
Habitat intertidal meuble	Moyenne des vasières intertidales et des plages intertidales
Habitat intertidal non défini	Moyenne de l'intertidal meuble et de l'intertidal dur
Habitat peu profond non défini	Moyenne du substrat meuble peu profond et du substrat dur peu profond
Plateau non défini	Moyenne du plateau meuble et du plateau dur
Talus non défini	Moyenne du talus à substrat meuble et du talus à substrat dur
Habitat profond non défini	Moyenne du substrat meuble profond et du substrat dur profond
Récifs d'éponges	Les récifs spongieux de la Colombie-Britannique se trouvent en grande partie en eaux profondes et présentent des caractéristiques similaires à celles des monts sous-marins, c'est pourquoi la cote de vulnérabilité des monts sous-marins a été utilisée

En réponse à une critique courante de la méthode, selon laquelle la résolution des habitats et des facteurs de stress est trop grossière au regard de l'utilisation souhaitée de l'analyse (Halpern et Fujita 2013), la forme et la taille des polygones concernant les couches d'habitat ont été préservées dans l'intersection avec les couches d'activité humaine, plutôt que de rasteriser les données de sorte qu'un seul habitat soit représenté dans chaque cellule de la grille. Cette méthode permet la présence de plusieurs habitats dans une cellule de la grille et l'inclusion de zones d'habitats qui peuvent être plus petites que la cellule de la grille. Les activités marines qui se produisent sous forme d'empreintes ont également été conservées sous forme de données polygonales. Les données d'activité disponibles dans les résolutions grossières ont été limitées aux zones où elles peuvent raisonnablement se produire. Par exemple, les données sur la

pêche à la panope du Pacifique disponibles dans les cellules de la grille de 4 × 4 km étaient limitées aux habitats peu profonds et meubles, où la pêche à la panope du Pacifique est la plus susceptible d'être pratiquée (figure 5).

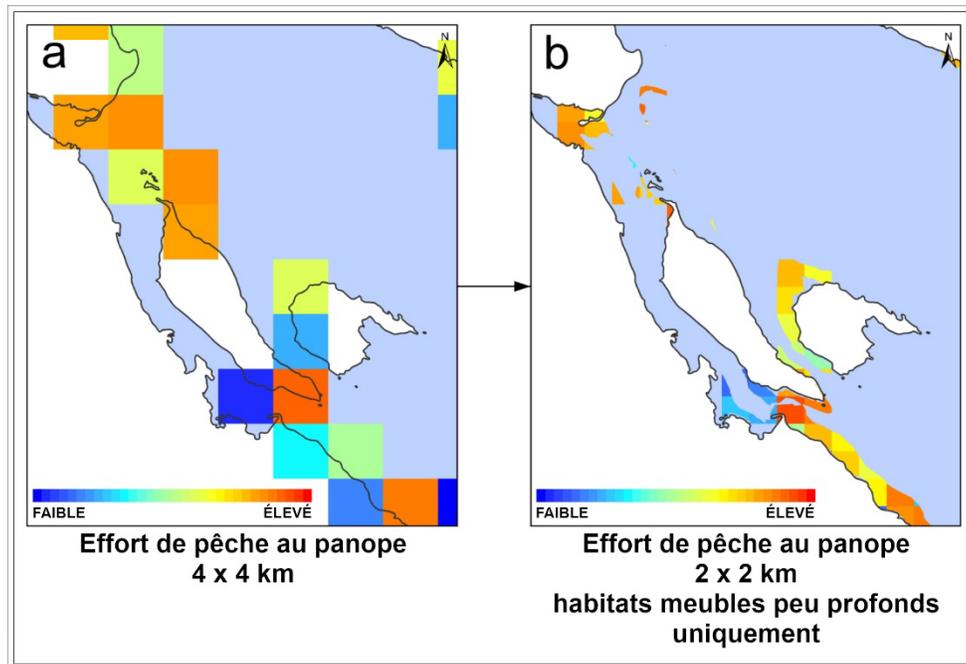


Figure 5 : Illustration de l'amélioration de l'application des données relatives à l'effort de pêche à l'ensemble de données sur la pêche de la panope du Pacifique (figure 1 dans Clarke Murray et al. 2015b).

Les classements concernant la gravité des effets des engins de pêche par région (sur une échelle de 0 à 10) de Fuller *et al.* (2008) ont été utilisés afin de pondérer les cotes de vulnérabilité des pêcheries, de manière à affiner les situations dans lesquelles la catégorie de facteurs de stress ne reflétait pas correctement la variabilité des effets d'un type d'engin de pêche à l'autre. Par exemple, les pêcheries de morue charbonnière au piège et en plongée étaient initialement associées au même facteur de stress : démersales non destructives, faibles prises accessoires. Cependant, on sait que les pêcheries de plongée ont des effets beaucoup plus faibles sur les habitats de fond, ce qui se traduit par un classement de gravité des effets des engins et une pondération de vulnérabilité inférieurs, par rapport aux grands pièges à morue charbonnière (Fuller *et al.* 2008). Cette méthode d'affinement de la cote de vulnérabilité s'est avérée mieux refléter les différences d'effets entre les pêcheries qui relèvent de la même catégorie de facteurs de stress, mais qui utilisent des types d'engins dont le niveau d'effets sur les habitats est très différent (Agbayani *et al.* 2015). Une liste complète des cotes de gravité des effets des engins utilisés pour la cartographie du Pacifique est présentée dans Clarke Murray *et al.* (2015b), tableau supplémentaire 5. La carte des effets cumulatifs qui en résulte concernant la région du Pacifique est présentée dans la figure 6.

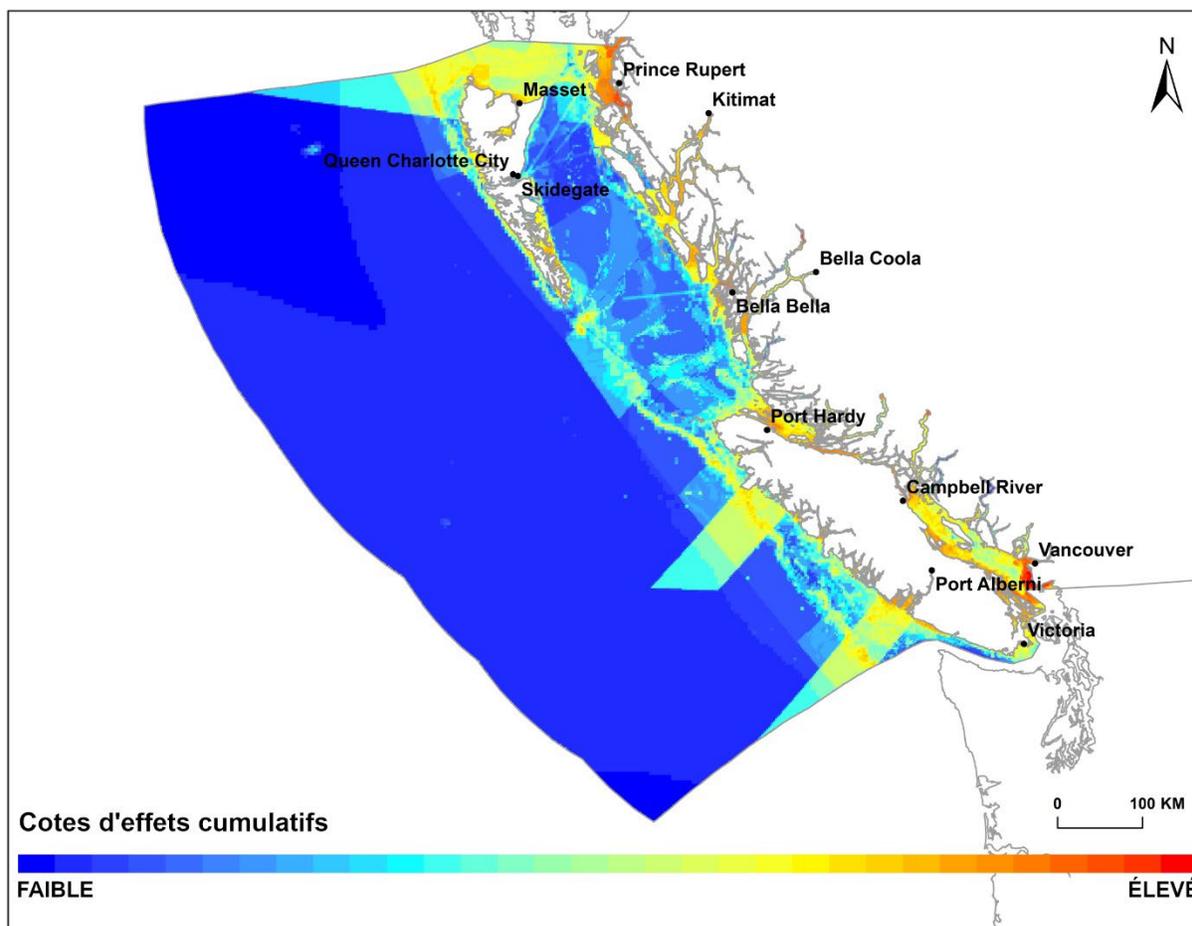


Figure 6 : Carte des effets cumulatifs de Clarke Murray et al. (2015b).

3.3. MISE À JOUR CONCERNANT LE PACIFIQUE

L'effort de planification spatiale marine visant à mettre à jour les cartes des effets cumulatifs dans le Pacifique a suivi les méthodes utilisées par Clarke Murray *et al.* (2015b), avec des couches de données actualisées et des avancées méthodologiques. L'analyse mise à jour actuelle utilisera une grille de planification à plus haute résolution (1 × 1 km). La couche d'habitat marin a été mise à jour avec des données de bathymétrie et de substrat à plus haute résolution, et comprendrait des données mises à jour sur les limites des monts sous-marins, les herbiers marins et les récifs d'éponges². Des mises à jour des données sur l'activité humaine ont été incluses lorsqu'elles étaient disponibles, et l'analyse a permis d'intégration de plusieurs facteurs de stress multiples dans la mesure du possible. Les cartes mises à jour ont été achevées en 2024³.

² [Catégories d'habitat marin du Pacifique](#)

³ [Impacts cumulés des activités anthropiques et des facteurs de stress sur les écosystèmes marins du Pacifique canadien](#)

3.4. MARITIMES

Comme dans le Pacifique, la cartographie des effets cumulatifs dans la région des Maritimes a suivi les méthodes de Clarke Murray *et al.* (2015b), utilisant également une grille de planification à haute résolution (1 × 1 km), mais avec des adaptations régionales qui tiennent compte des différences entre les habitats et les activités humaines. La couche d'habitat marin a été compilée à partir de sources multiples qui ont déjà cartographié et classifié différentes parties du benthos (substrats du littoral ou de plateau), à différentes profondeurs (du littoral à 100 m ou à plus de 200 m de profondeur), ou qui ont ciblé des zones d'intérêt particulières (zones benthiques importantes pour les coraux et les éponges, biohermes de modioles, fucus). Toutes les couches d'activité humaine ont été inclus lorsqu'ils étaient disponibles, en donnant la priorité aux sources de données mesurées au cours de la décennie précédente. La disponibilité des sources de données variait considérablement dans la région des Maritimes, certaines étant mesurées à des fréquences ou à des résolutions spatiales beaucoup plus élevées (p. ex. le trafic maritime commercial, certaines activités de pêche), d'autres étant estimées à partir de modèles (p. ex. l'apport de nutriments provenant de sources terrestres, les modèles de répartition des espèces envahissantes), tandis que d'autres encore contiennent des emplacements de sources ponctuelles (p. ex. l'aquaculture, les activités récréatives) et manquent de mesures d'intensité associées. Les classements de gravité des effets des engins spécifiques à la région atlantique, utilisés pour pondérer les cotes de vulnérabilité des différents types d'engins classés dans la même catégorie de facteurs de stress liés à la pêche, ont été adaptés de Fuller *et al.* (2008) pour les types d'engins de pêche de la côte Est, qui diffèrent dans de nombreux cas de ceux utilisés dans le Pacifique. Les cartographier des effets cumulatifs ont été complétées en 2023¹.

4. ÉVALUATION DE LA MATRICE DE VULNÉRABILITÉ DES OCÉANS CANADIENS

La vulnérabilité des habitats marins aux facteurs de stress a été estimée à l'aide d'un jugement d'experts fondé sur les diverses composantes supposées rendre les espèces ou les écosystèmes plus sensibles aux perturbations. La matrice de vulnérabilité utilisée dans le Pacifique canadien (Clarke Murray *et al.* 2015b) est basée sur les matrices définies pour le courant de Californie (Teck *et al.* 2010), avec quelques modifications visant à tenir compte des différences entre les deux régions. La même matrice de Teck a été utilisée dans d'autres applications mondiales et régionales de la cartographie des effets cumulatifs fondée sur l'habitat, à une exception près. Une matrice de vulnérabilité a ensuite été élaborée pour les côtes du Massachusetts par Kappel *et al.* (2012a) en utilisant la même méthodologie que Teck *et al.* (2010), mais en interrogeant des experts travaillant dans les écosystèmes marins de la région de la Nouvelle-Angleterre. Les efforts de cartographie des effets cumulatifs dans la région des Maritimes s'appuient sur le modèle de Kappel *et al.* (2012a) parce que le cadre géographique et le contexte écologique sont plus semblables. La matrice de vulnérabilité de l'Atlantique est destinée à être utilisée dans l'ensemble de la région, y compris les Maritimes, Terre-Neuve-et-Labrador et les régions du Golfe. L'effort de cartographie actuel visant à soutenir la planification spatiale marine n'a lieu que dans la région des Maritimes. Nous évaluons ici l'applicabilité de ces deux matrices de vulnérabilité aux écosystèmes canadiens.

4.1. COTES DE LA MATRICE

4.1.1. Courant de Californie (Teck *et al.* 2010)

Teck *et al.* (2010) ont calculé les cotes de vulnérabilité comme la somme pondérée de cinq critères de vulnérabilité : l'échelle spatiale, la fréquence, l'effet trophique, le pourcentage de changement dans la biomasse et le temps de récupération (tableau 5; équation 2) :

$$Vulnérabilité = \sum_{k=1 \dots 5} W_k S_{i_k}^j \quad (2)$$

où $S_{i_k}^j$ est la valeur du critère k pour le facteur de stress i dans l'écosystème j , et W_k est la pondération attribuée au critère k , de sorte que la somme de W_k est égale à 1. Afin de calculer ces cotes, il fallait connaître à la fois la valeur de chaque critère et sa pondération associée (c'est-à-dire l'importance relative accordée par un expert lors de l'évaluation de la vulnérabilité d'un écosystème à un facteur de stress particulier). Teck *et al.* (2010) ont déterminé leurs cotes de vulnérabilité en interrogeant des experts. Afin d'estimer la valeur de chaque critère ($S_{i_k}^j$), il a été demandé aux experts de juger (accepter ou réviser) une valeur donnée pour chaque critère de vulnérabilité pour chaque combinaison d'écosystème et de facteur de stress. Les experts ont été invités séparément à classer une série de scénarios hypothétiques comportant différents facteurs de stress anthropiques et écosystèmes, en fonction des effets négatifs attendus de l'homme au niveau de l'écosystème. Cet exercice de classement a été utilisé afin de déterminer la pondération des critères (W_k) que les experts attribuent implicitement aux cinq critères de vulnérabilité, de sorte que les cinq critères ne sont pas limités à une pondération égale lorsqu'ils sont combinés en une seule cote de vulnérabilité. Les pondérations des critères ont été calculées à l'aide d'une approche fondée sur la théorie de la décision (c'est-à-dire en appliquant un modèle de décision multicritère et une méthodologie statistique d'inversion probabiliste aux résultats de l'enquête auprès des experts), multipliées par les valeurs moyennes des critères (calculées à partir de la population d'experts interrogés lors du premier exercice), puis additionnées pour les cinq critères afin d'obtenir la cote globale de vulnérabilité (équation 2). Les experts de Californie (Teck *et al.* 2010) et du Massachusetts (Kappel *et al.* 2012a, b) ont accordé la plus grande importance aux critères de vulnérabilité que sont l'effet trophique et le pourcentage de variation de la biomasse, bien que l'importance de ces critères diffère d'un endroit à l'autre (Californie : 89 %; Massachusetts : 81,1 %). Les mêmes critères de pondération ont été appliqués à tous les écosystèmes et à tous les facteurs de stress afin de permettre une comparaison directe entre les combinaisons d'écosystèmes et de facteurs de stress. Le modèle défini a ensuite été utilisé afin de calculer la cote de vulnérabilité de toutes les combinaisons d'habitats et de facteurs de stress.

Tableau 5 : Critères de vulnérabilité utilisés afin de calculer la vulnérabilité par Teck *et al.* (2010).

Critères de vulnérabilité	Description
Échelle spatiale	Échelle spatiale (km ²) à laquelle un seul élément d'une activité affecte l'écosystème, à la fois directement et indirectement, par exemple l'échelle spatiale d'un seul chalut plutôt que de l'ensemble de la pêche au chalut.
Fréquence	Fréquence annuelle moyenne (jours par an) de l'activité en un lieu donné dans une région donnée.
Effet trophique	Étendue primaire de la vie marine affectée par une activité au sein d'un écosystème et d'une région donnés.
Pourcentage de variation	Degré d'effet de l'activité sur l'espèce, le(s) niveau(x) trophique(s) ou l'état « naturel » de l'ensemble de l'écosystème.
Temps de récupération	Temps moyen (en années) nécessaire pour que l'espèce, le(s) niveau(x) trophique(s) ou l'ensemble de la communauté concerné(s) revienne(nt) à

Critères de vulnérabilité	Description
	son (leur) état antérieur, « naturel », après avoir été perturbé(s) par une activité particulière.

La matrice de vulnérabilité pour la région du courant de Californie (Teck *et al.* 2010) a évalué 19 écosystèmes et 53 facteurs d'activité et de stress, dans le cadre d'une enquête réalisée par 107 experts. La matrice obtenue a été utilisée dans des applications régionales dans le monde entier (Afflerbach *et al.* 2017; Andersen *et al.* 2015; Ban *et al.* 2010; Clarke Murray *et al.* 2015b; Micheli *et al.* 2013; Selkoe *et al.* 2009). Les combinaisons présentant les cotes les plus élevées sont le changement climatique : acidification des océans sur les talus à substrat meuble (3,4) et dans les zones intertidales rocheuses (3,1), et les espèces envahissantes sur les plages (3,0). Le facteur de stress ayant la cote de vulnérabilité le plus élevée est le changement climatique : acidification des océans (2,5). Les écosystèmes les plus vulnérables sont les plages et les vasières (1,1), suivis des zones intertidales rocheuses, des récifs suspendus et des marais salants (1,0).

4.1.2. Massachusetts (Kappel *et al.* 2012a, b)

L'élaboration de la matrice de vulnérabilité concernant la région du Massachusetts (Kappel *et al.* 2012a) a reposé sur l'utilisation de la même méthodologie que Teck *et al.* (2010). Les auteurs ont évalué 14 écosystèmes et 58 facteurs d'activité et de stress. Cinquante-sept experts de la région de la Nouvelle-Angleterre ont accepté de participer. Au total, 87 enquêtes sur la vulnérabilité des écosystèmes ont été réalisées (car certains experts connaissaient plus d'un écosystème) et 35 enquêtes de classement ont été effectuées. Les combinaisons les mieux cotées dans la matrice résultante sont le changement climatique : changement de la température de la mer sur le replat de marée (6,1) et les maladies et agents pathogènes sur le plateau à substrat meuble (6,1). D'autres facteurs de stress présentant des cotes de vulnérabilité élevées sont liés à l'activité du changement climatique : le changement de la température de la mer (4,6), suivi du changement du rayonnement ultraviolet (3,4) et de l'acidification des océans (3,4). Les écosystèmes les plus vulnérables sont les plateaux à substrat dur (2,8), suivis par les habitats à substrat meuble du littoral (2,3). Comparées à la matrice de vulnérabilité du courant de Californie générée par Teck *et al.* (2010), les cotes pour la région du Massachusetts présentaient une fourchette légèrement plus large (0 à 6,1 contre 0 à 3,4 pour Teck *et al.*). Cette différence peut être due aux différences de pondération des critères dérivées des différents groupes d'experts interrogés dans les régions du courant de Californie et du Massachusetts lors du calcul des cotes de vulnérabilité (Kappel *et al.* 2012a).

4.1.3. Pacifique canadien (Clarke Murray *et al.* 2015b)

La matrice de vulnérabilité de Halpern *et al.* (2010) a été modifiée afin d'être utilisée dans le Pacifique canadien (Ban *et al.* 2010; Clarke Murray *et al.* 2015b). Les récifs d'éponges hexactinellides n'étaient pas présents dans la région évaluée par Teck *et al.* (2010), ils ont donc été adaptés à partir de la cote de vulnérabilité des monts sous-marins, sur les conseils de l'un des auteurs de Teck *et al.* (2010). Les facteurs de stress liés à la pêche dans la matrice ont été adaptés en modifiant les cotes de vulnérabilité de la pêche avec les cotes de gravité des effets des types d'engins de pêche, conformément à Chuenpagdee *et al.* (2003), sur la base d'une évaluation des effets des engins de pêche spécifique au Canada par Fuller *et al.* (2008). En outre, de manière à tenir compte de la nature tridimensionnelle de l'océan, les habitats ont été divisés en classes de profondeur benthique, peu profonde et profonde, conformément à la

méthodologie précédente (Ban *et al.* 2010). La matrice relative au Pacifique canadien présentée dans Clarke Murray *et al.* (2015b) contient 47 activités humaines et 26 habitats.

4.1.4. Atlantique canadien (Kappel *et al.* 2012a,b)

La matrice de vulnérabilité relative aux eaux de l'Atlantique canadien a été adaptée de Kappel *et al.* (2012b). Bien qu'ils aient mené une enquête indépendante auprès d'experts régionaux de la Nouvelle-Angleterre, Kappel *et al.* (2012b) n'ont pas été en mesure de déterminer les cotes de vulnérabilité concernant plusieurs combinaisons d'écosystèmes et de facteurs de stress. Les cotes relatives aux combinaisons manquantes d'écosystèmes et de facteurs de stress ont été complétées à partir de Teck *et al.* (2010), en étant rééchelonnées afin de correspondre à la gamme de cotes concernant la matrice de la région du Massachusetts, étant donné que les cotes médianes de vulnérabilité de tous les facteurs de stress et habitats étaient plus élevées dans Kappel *et al.* (2012b). Par exemple, les forêts de varech, les habitats bathyaux à substrat dur et les canyons n'ont pas été inclus dans Kappel *et al.* (2012b). Les cotes pour ces habitats ont donc été insérées avec les cotes rééchelonnées de Teck *et al.* (2010). Deux habitats biogéniques, le bioherme de modioles et l'habitat biogénique profond (coraux, éponges et plumes de mer), n'ont pas été inclus dans les matrices de Teck *et al.* (2010) ni dans celles de Kappel *et al.* (2012b), ils ont donc été insérés avec les cotes de vulnérabilité rééchelonnées de Teck *et al.* (2010) pour les récifs suspensivores et les monts sous-marins, respectivement (suivant Clarke Murray *et al.* 2015b). Comme quatre facteurs de stress liés à l'infrastructure énergétique n'ont pas été inclus dans Teck *et al.* (2010), nous avons procédé à une revue de la littérature afin de combler les lacunes des habitats manquants. Les cotes de vulnérabilité pour les habitats à substrat « mixte » (voir le tableau 2), qui n'apparaissent pas non plus dans les matrices de Teck et de Kappel, ont été calculées en faisant la moyenne des cotes des habitats à substrat dur et à substrat meuble dans les mêmes gammes de profondeur (p. ex., pour chaque facteur de stress, les cotes de vulnérabilité pour les habitats à substrat mixte du littoral ont été calculées en faisant la moyenne des cotes des habitats à substrat dur et à substrat meuble du littoral; conformément à Clarke Murray *et al.* 2015b). La matrice obtenue pour l'Atlantique canadien contient 54 activités humaines et 21 habitats.

4.2. POURQUOI LES COTES DE VULNÉRABILITÉ VARIENT-ELLES SELON LES RÉGIONS?

Les conditions biogéographiques diffèrent entre les côtes canadiennes du Pacifique, de l'Arctique et de l'Atlantique (MPO 2009) en raison du large éventail de conditions océanographiques et hydrodynamiques, ainsi que des différences dans l'exposition actuelle et historique aux facteurs de stress anthropiques entre les régions. Par conséquent, les vulnérabilités ne devraient pas être équivalentes d'une côte à l'autre (Gunderson *et al.* 2016; Murphy *et al.* 2021). Par exemple, le cycle biologique, la phénologie et les assemblages généraux d'espèces de la zostère marine (*Zostera marina*) sont similaires sur les côtes de l'Atlantique, du Pacifique et de l'Arctique (Murphy *et al.* 2021). Toutefois, en raison des conditions biogéographiques différentes, les zostères marines se sont adaptées différemment à ces conditions d'une côte à l'autre, ou ont une morphologie différente ou des espèces associées, ce qui peut influencer sur la manière dont elles réagissent aux effets de l'activité humaine (Murphy *et al.* 2021). La variation des régimes d'énergie physique (mesurée comme une combinaison de la contrainte de cisaillement de la limite benthique et de la profondeur) entre les régions peut déterminer la vulnérabilité (en particulier le temps de récupération) des substrats benthiques aux effets des engins de pêche en contact avec le fond (Grabowski *et al.* 2014). La vulnérabilité aux invasions d'espèces non indigènes peut également varier d'une côte à l'autre, en raison des différents niveaux de pression de propagation et de colonisation et du

degré de similitude entre les espèces de salissures marines de la coque et du port dans les communautés réceptrices (Sylvester *et al.* 2011). Plutôt que d'essayer de trouver une concordance entre les écosystèmes côtiers de l'Atlantique et du Pacifique et les experts, les auteurs ont choisi d'utiliser des matrices distinctes entre les côtes afin de tenir compte de leurs propriétés biogéographiques différentes.

4.3. EXAMEN PRÉALABLE DES MATRICES

Les cotes de vulnérabilité dans les matrices de Teck *et al.* (2010) et de Kappel *et al.* (2012b) ont été évaluées aux fins de leur utilisation dans les habitats canadiens. On a demandé l'opinion d'experts compétents de l'écosystème dans un examen préalable des cotes et des classements de la vulnérabilité du Pacifique et de l'Atlantique. Les équipes de l'Atlantique et du Pacifique ont collaboré à la création de l'instrument d'enquête, mais ont mené les enquêtes séparément afin de s'assurer que les résultats étaient spécifiques aux écosystèmes régionaux appropriés (Murphy *et al.* 2021). Des feuilles de calcul individuelles ont été créées pour chaque habitat, énumérant la vulnérabilité à chaque activité ou facteur de stress sur différentes lignes (voir l'exemple à l'Annexe 1). Les experts interrogés ont été invités à examiner et à comparer les cotes pour un seul habitat, évaluant ainsi la vulnérabilité du point de vue de l'habitat, plutôt que du point de vue des facteurs de stress. Afin de simplifier le processus d'examen, les cotes de vulnérabilité relative ont été réparties en cinq classes (négligeable, faible, moyenne, élevée et extrême) en utilisant les seuils naturels de Jenks (tableau 6; version R 4.0.4, package BAMMtools, R Studio, version 1.2.5019).

Tableau 5 : Classes de cotes de vulnérabilité créées pour les enquêtes régionales d'experts du Pacifique et de l'Atlantique.

Classes de cotes de vulnérabilité	Plage de valeurs du Pacifique	Plage de valeurs de l'Atlantique
Négligeable	0	0
Faible	> 0,1 à ≤ 0,6	> 0,1 à ≤ 1,2
Moyenne	> 0,6 à ≤ 1,2	> 1,2 à ≤ 2,3
Élevée	> 1,2 à ≤ 2	> 2,3 à ≤ 3,5
Extrême	> 2 à ≤ 3,4	> 3,5 à ≤ 6,1

Les experts ont été identifiés sur la base de leur historique de publication sur les habitats respectifs et les experts contactés pouvaient suggérer d'autres experts. La liste complète des experts chargés de l'examen préalable est présentée à l'annexe 4. Chaque expert a été invité à examiner la liste hiérarchisée des classes de vulnérabilité pour un habitat particulier, toutes activités et tous facteurs de stress confondus. S'ils n'étaient pas d'accord avec l'emplacement relatif d'un facteur de stress, les experts pouvaient suggérer des changements : une autre classe ou un déplacement au sein d'une classe. L'instrument d'enquête prévoyait un espace afin d'inclure la justification des changements, des commentaires et des citations à l'appui. Avant d'être envoyé aux experts, le questionnaire a été testé auprès de deux collègues qui n'étaient pas directement impliqués dans l'enquête et a été mis à jour en fonction de leurs commentaires. Les enquêtes sur le Pacifique et l'Atlantique ont été envoyées à des experts sur leurs côtes respectives.

Dans le cadre d'un processus Delphi, les feuilles de calcul remplies ont été compilées par habitat et les changements de classe proposés sur la base des commentaires des experts ont été renvoyés au même groupe d'experts afin qu'ils les commentent et les examinent à nouveau.

Les experts pouvaient consulter les modifications et les commentaires anonymes des autres experts et les approuver ou les réfuter.

Les feuilles de calcul complétées lors du deuxième cycle d'examen ont été utilisées afin de formuler des recommandations finales concernant les modifications à apporter aux classes de vulnérabilité. Sur la base des commentaires et des suggestions des experts, nous avons déplacé les activités ou les facteurs de stress dans les nouvelles classes proposées à l'aide d'un ensemble de règles communes. Des règles supplémentaires ont été appliquées lorsque les experts suggéraient des classes différentes, même après l'étape combinée. Si les deux experts suggéraient un changement dans la même direction, mais pas dans la même classe, nous avons effectué le changement le plus conservateur. Si un expert proposait un changement (avec justification) alors qu'un autre expert proposait un changement dans la même direction (sans justification), nous avons opté pour la classe proposée par le premier expert. Si un expert proposait un changement (avec justification) et que le second expert ne faisait pas de commentaire, nous avons adopté la classe proposée. Dans les rares cas de désaccord entre les experts, la modification suggérée par la majorité a été adoptée. En cas d'égalité, ce sont les auteurs qui ont tranché.

Les classements proposés ont ensuite été convertis en cotes numériques. Lorsqu'un expert suggérait un emplacement relatif (p. ex. entre deux autres facteurs de stress ou au sommet d'une classe), la cote du facteur de stress était attribuée à cette cote. Lorsqu'une classe a été modifiée et qu'aucun emplacement spécifique n'a été indiqué, elle a été déplacée vers la valeur numérique la plus proche de cette classe de manière à obtenir le changement le plus conservateur. Des changements prudents ont été apportés parce que les cotes originales étaient le résultat d'un exercice de jugement d'experts vaste et approfondi. Les révisions et modifications proposées pour les deux matrices sont présentées à la section 4.3.1.

4.3.1. Suggestions d'ajouts, de suppressions ou de modifications

4.3.1.1. Matrice du Pacifique

Des enquêtes sur le Pacifique ont été envoyées à 35 experts, et 29 enquêtes complétées ont été renvoyées par 24 experts au total. Les cotes de chacun des habitats du Pacifique ont fait l'objet d'un examen par au moins un expert, à l'exception du canyon. De nombreux experts ont posé des questions de clarification et ont inclus des citations dans leurs commentaires, ce qui témoigne d'un engagement réfléchi à l'égard de l'instrument d'enquête. Pour chaque habitat, les experts ont examiné le classement des facteurs de stress et ont suggéré au moins un changement, tout en incluant des commentaires expliquant la sélection. La matrice révisée inclut les changements proposés (tableau 7). Sur les 988 cotes, 14,8 % (146) ont été modifiées, avec 12,1 % (120) d'augmentation de la valeur (c'est-à-dire une plus grande vulnérabilité), et 2,6 % (26) de diminution (c'est-à-dire une plus faible vulnérabilité).

4.3.1.2. Matrice de l'Atlantique

Les enquêtes sur l'Atlantique ont été envoyées à 52 experts, et 42 enquêtes complétées ont été renvoyées par 33 experts au total. Les cotes de chacun des habitats de l'Atlantique ont fait l'objet d'un examen par plusieurs experts, à l'exception de trois enquêtes sur les habitats qui n'ont été examinées que par un seul expert chacune (plage, habitat à substrat meuble du littoral et habitat pélagique profond). Comme pour les enquêtes menées dans le Pacifique, les experts ont examiné les classements des facteurs de stress et ont suggéré des changements, souvent en fournissant une justification et des citations à l'appui. La matrice révisée avec les changements proposés est présentée dans le tableau 8. Des changements ont été apportés à 20 % des cotes de la matrice, 9,2 % des cotes ayant augmenté en valeur (c'est-à-dire une plus

grande vulnérabilité) et 10,8 % des cotes ayant diminué en valeur (c'est-à-dire une plus faible vulnérabilité).

4.3.1.3. Autres suggestions :

Plusieurs experts, sur les deux côtes, ont suggéré que des facteurs de stress supplémentaires soient pris en compte dans les matrices, car ils estimaient qu'aucune activité ou facteur de stress existant dans la matrice de vulnérabilité ne décrivait de manière adéquate les effets de ces facteurs de stress identifiés. Dans le Pacifique, la température de l'air a été suggérée par les experts afin de tenir compte de l'exposition à l'air dans la zone intertidale. « Le changement climatique : changement de la température de la mer » fait actuellement partie de la matrice et la tendance à long terme de la température de l'air sera prise en compte dans les changements de la température de la mer.

Dans l'Atlantique, la désoxygénation due au changement climatique a été suggérée par un expert afin que soient pris en compte les effets extrêmes des environnements à faible teneur en oxygène, en particulier pour les habitats biogéniques en eaux profondes. Un autre expert a attiré notre attention sur l'intérêt commercial croissant pour la récolte de varech sauvage (sur la côte atlantique et dans le monde entier), qui aurait un effet extrême sur les forêts de varech en cas de niveaux de récolte élevés. Nous reconnaissons l'importance de ces facteurs de stress émergents; cependant, nous n'avons pas été en mesure de les intégrer pour le moment car les effets directs et indirects de ces activités sur d'autres habitats sont mal compris (c'est-à-dire qu'il n'y a pas d'estimations existantes de la vulnérabilité de tous les habitats à ces facteurs de stress émergents particuliers), et nous ne disposons pas de suffisamment de renseignements pour estimer ces activités dans l'ensemble de la région (c'est-à-dire que nous n'avons pas de cartes spatiales exactes de leur étendue régionale). Ces facteurs de stress pourraient être ajoutés dans de futures applications avec des avis d'experts et une revue de la littérature.

Tableau 6 : Matrice de vulnérabilité révisée pour la côte du Pacifique. Les cotes de vulnérabilité qui ont été modifiées au cours de l'examen préalable de la matrice sont indiquées en gras avec une flèche indiquant le sens du changement. Remarque : les cotes relatives aux habitats à substrat mixte n'apparaissent pas dans ce tableau, car aucune étude d'experts n'a été consultée pour ces habitats.

Activités et facteurs de stress	Plages intertidales	Habitats intertidaux durs	Habitats intertidaux meubles	Vasières	Herbiers marins	Forêts de varech	Habitats à substrat dur peu profonds	Habitats à substrat meuble peu profonds	Plateaux à substrat dur	Plateaux à substrat meuble	Talus à substrat dur	Talus à substrat meuble	Habitats profonds à substrat dur	Habitats profonds à substrat meuble	Monts sous-marins	Récifs d'éponges	Canyons	Habitats pélagiques peu profonds	Habitats pélagiques profonds
Aquaculture : poissons à nageoires	0,2 ↑	0,2	0,1 ↑	0,0	0,3	0,7 ↑	1,0	0,1 ↑	0,7	0,9	0,0	0,5	0,0	0,7 ↑	0,0	2,3 ↑	0,0	1,2	0,0
Aquaculture : plantes et algues	0,0	0,8	0,2	0,7 ↑	0,4	0,7 ↑	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7 ↑	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Aquaculture : mollusques et crustacés	0,7 ↑	1,0	0,7 ↑	1,3 ↑	1,6	0,7 ↑	0,7 ↑	0,5	1,1 ↑	0,2	0,0	0,0	0,0	0,7 ↑	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0
Structures benthiques	1,4	0,9	1,9	2,4	1,1 ↓	1,6	1,7	1,4	2,4	2,2	2,3	1,4	0,0	1,3 ↑	0,0	0,7 ↑	2,3	0,4	0,0
Changement climatique : acidification des océans	1,8	1,7 ↓	2,1	2,4	1,1 ↓	2,0	2,2	1,3 ↑	2,7	2,6	3,4	3,4	3,4	2,5	2,6	2,6	2,6	1,8 ↓	2,7
Changement climatique : élévation du niveau de la mer	1,7	2,7	1,8	2,1 ↑	1,9	0,6 ↓	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6
Changement climatique : changement de la température de la mer	1,7	2,7	1,8	1,8	1,9	2,9	2,2	0,0	1,9	1,7	3,4 ↑	3,4 ↑	1,3 ↑	0,5	0,0	1,3 ↑	1,7	2,5	2,1 ↑
Changement climatique : changement du rayonnement ultraviolet	1,8	1,2 ↓	1,8	2,1 ↑	1,5	1,6	1,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,5	0,8
Travaux maritimes : modification de la dynamique de l'écoulement de l'eau	1,3	1,5	1,7	2,0	1,1	1,2	0,7	1,3 ↑	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,3 ↑	0,0	0,0	0,0
Travaux maritimes : altération de l'habitat	1,3	2,7 ↑	1,7	2,1	1,7 ↑	1,4	1,1	1,3 ↑	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	1,3 ↑	0,0	2,3 ↑	0,0	0,2	0,0

Activités et facteurs de stress	Plages intertidales	Habitats intertidaux durs	Habitats intertidaux meubles	Vasières	Herbiers marins	Forêts de varech	Habitats à substrat dur peu profonds	Habitats à substrat meuble peu profonds	Plateaux à substrat dur	Plateaux à substrat meuble	Talus à substrat dur	Talus à substrat meuble	Habitats profonds à substrat dur	Habitats profonds à substrat meuble	Monts sous-marins	Récifs d'éponges	Canyons	Habitats pélagiques peu profonds	Habitats pélagiques profonds
Effet direct de l'activité humaine : piétinement	0,7 ↓	1,6	0,6 ↓	0,3	1,3 ↑	0,1	0,2	0,0 ↓	0,0	0,0 ↓	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Maladie ou agents pathogènes	1,1	1,7 ↑	1,1	1,1	1,3 ↑	1,0	1,0	0,0	1,1	0,9	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	2,3 ↑	1,1	0,7 ↑	0,0
Dragage	1,6	0,2	1,7	1,7	1,7	1,3 ↑	0,7 ↑	1,3 ↑	0,0	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,3 ↑	0,0	0,1	0,0
Pêche : aquarium	0,0	0,6	0,1	0,1	0,1	0,7	0,5 ↓	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Pêche : démersale, altérant l'habitat	0,9	0,7	1,0	1,1	0,6 ↑	0,7 ↑	1,3 ↑	1,2	1,6	2,0	2,3	2,3	2,8	2,2	2,7	2,7	2,5	0,3	0,0
Pêche : démersale, altérant peu l'habitat, prises accessoires importantes	1,3	0,4	1,1	0,9	0,8 ↑	1,2	1,3	0,6	1,3	1,3	1,8	1,3	2,5 ↑	1,3	1,3	1,3	1,3	0,4	0,0
Pêche : démersale, altérant peu l'habitat, faibles prises accessoires	0,8	0,4	0,8	0,7	0,5	1,2	1,2	0,4	1,1	0,8	1,1	1,3 ↑	0,9	0,8	1,3 ↑	0,9	0,8	0,3	0,0
Pêche : altérant peu l'habitat, artisanale	0,7	0,8	0,7	0,6	0,4	0,2	0,3	0,2	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0
Pêche : pélagique, prises accessoires importantes	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,3	0,9	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,7 ↑	0,1	0,0	1,3 ↑	0,0	1,6	1,6
Pêche : pélagique, faibles prises accessoires	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,8	0,0	0,0	0,3	0,0	0,3	0,7 ↑	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1	1,5
Pêche : récréative	1,0	1,2	1,1	1,1	0,9	1,2 ↓	1,4	0,8	1,2	0,4	1,6	0,0	0,7	0,8	0,7	0,7	0,0	1,1	0,0
Eau douce : diminution de l'apport	0,6	1,3 ↑	0,9	1,1	0,8 ↑	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0
Eau douce : augmentation de l'apport	0,9	1,3 ↑	1,1	1,2	0,8	0,8	1,0	0,0	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0
Espèces envahissantes	3,2	2,6	3,1	3,0	1,7	1,2 ↓	1,8	0,6 ↓	1,5	0,7	0,0	0,0	0,7 ↑	1,1	0,35 ↑	1,3 ↑	0,0	0,3	0,0

Activités et facteurs de stress	Plages intertidales	Habitats intertidaux durs	Habitats intertidaux meubles	Vasières	Herbiers marins	Forêts de varech	Habitats à substrat dur peu profonds	Habitats à substrat meuble peu profonds	Plateaux à substrat dur	Plateaux à substrat meuble	Talus à substrat dur	Talus à substrat meuble	Habitats profonds à substrat dur	Habitats profonds à substrat meuble	Monts sous-marins	Récifs d'éponges	Canyons	Habitats pélagiques peu profonds	Habitats pélagiques profonds
Composante marine de la foresterie	0,7 ↑	0,5	1,3 ↑	0,7	1,3 ↑	1,3 ↑	0,0	0,8 ↑	1,3 ↑	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Activité militaire	1,4	0,4	1,1	0,8	0,8	1,0	0,3	0,6	1,3	1,3	1,3	1,2	1,3	1,3 ↑	1,2	1,2	1,3	1,2 ↓	1,4
Apport de nutriments : à l'origine de la prolifération d'algues nuisibles	1,7	1,1	1,7	1,7	0,8 ↓	1,1	1,3	0,5	1,4	1,1	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	1,3 ↑	0,0	1,5	1,8
Apport de nutriments : à l'origine de zones hypoxiques	1,5	0,8	1,6	2,1 ↑	0,9	1,3 ↑	1,3 ↑	1,3 ↑	1,8	1,5	3,4 ↑	1,3 ↑	0,0	0,0	0,0	1,3 ↑	0,0	1,8	2,0
Apport de nutriments : dans les eaux eutrophes	1,5	0,9	1,3	1,3 ↑	0,9	1,3 ↑	1,0	0,3	1,2	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,1	0,9
Apport de nutriments : dans les eaux mésotrophes	1,1	1,0	1,3 ↑	1,2	0,9	1,3 ↑	0,9	0,3	1,3	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,3	1,4	2,1
Rejet en mer : engins de pêche perdus	1,5	1,0	1,5	1,4	0,9	1,1	1,1	0,4	1,2	1,2	1,2	1,3	2,5 ↑	1,2	1,3	1,3	1,2	1,3	1,3
Rejet en mer : débris marins	1,0	0,9	1,0	1,0	0,8 ↑	0,8	0,9	0,4	1,0	0,8	1,0	0,9	0,9	0,8	0,7	1,3 ↑	0,6	1,0	0,8
Rejet en mer : naufrages	1,6	1,5	2,0	2,3	1,1 ↓	1,7	2,1	1,0	2,4	1,8	2,5	1,6	2,5	1,3	2,3	2,3	2,3	0,0	0,0
Rejet en mer : matières toxiques	1,4	0,9	1,5	1,5	1,1	0,9	1,0	1,3 ↑	1,1	1,1	1,4	1,1	1,1	2,2 ↑	1,1	1,3 ↑	1,3	1,1	1,3
Exploitation minière des océans : sable, minéraux, etc.	1,1	0,1	0,6	0,0	0,5	1,3 ↑	0,0	1,3 ↑	0,0	1,3	0,0	2,3 ↑	3,4 ↑	2,2 ↑	0,7 ↑	2,3 ↑	0,0	0,0	0,0
Pollution des océans par les navires et les ports	0,8	1,3	1,1	1,3	0,9	0,9	1,0	0,4	1,0	0,8	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9	1,4	0,0
Apport de polluants : atmosphériques	0,9	1,1	1,1	1,3	1,0	1,0	1,1	0,0	1,2	1,1	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,3	1,6	0,9

Activités et facteurs de stress	Plages intertidales	Habitats intertidaux durs	Habitats intertidaux meubles	Vasières	Herbiers marins	Forêts de varech	Habitats à substrat dur peu profonds	Habitats à substrat meuble peu profonds	Plateaux à substrat dur	Plateaux à substrat meuble	Talus à substrat dur	Talus à substrat meuble	Habitats profonds à substrat dur	Habitats profonds à substrat meuble	Monts sous-marins	Récifs d'éponges	Canyons	Habitats pélagiques peu profonds	Habitats pélagiques profonds
Apport de polluants : inorganiques	1,3	1,2	1,3	1,3	0,9	1,3	1,5	0,8	1,1	1,6	0,0	2,0	0,0	1,9	0,0	0,0	1,3	1,6	1,3
Apport de polluants : lumière	1,2	0,9	1,2	1,2	0,8 ↑	0,1	0,0	0,3	0,0	0,2	0,0	0,0	0,7 ↑	0,1 ↑	0,0	0,0	0,0	0,4	0,8
Apport de polluants : bruit	1,2	0,9	1,2	1,2	0,8 ↑	0,1	0,5 ↑	0,3	0,7 ↑	0,2	0,35 ↑	0,6 ↑	0,7 ↑	0,5 ↑	0,6 ↑	0,7 ↑	0,9 ↑	0,4	0,8
Apport de polluants : organiques	1,9	1,3	1,9	1,9	1,1	1,3	1,5	1,4	1,3	1,5	0,0	2,0	0,0	2,5	0,0	0,0	1,2	1,5	1,3
Apport de polluants : écoulements urbains	1,2	1,1	1,2	1,3 ↑	0,9	0,7	1,2	1,0	0,4	0,9	0,9	1,2	0,0	1,9	0,0	0,0	0,8	1,1	0,8
Centrales électriques et usines de dessalement	1,7	1,5	1,5	1,3	0,5	0,8	1,1	0,5	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,5	0,2
Recherche scientifique et collecte	0,7	0,8	0,6 ↓	0,7	1,3 ↑	0,7	0,7	0,1	0,7	0,9	0,0	1,2 ↓	0,7	0,7	0,7	0,35 ↓	0,7	0,7	0,4
Expériences de recherche ou levés scientifiques	0,7	0,9	0,6 ↓	0,7	0,8	0,7	0,8	0,6 ↓	0,8	1,0	0,0	1,2 ↓	0,9	0,8	0,9	0,9	0,9	1,0	0,5
Apport de sédiments : diminution	1,2	0,8	1,8	2,3	0,8	0,1	0,0	0,6	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Apport de sédiments : augmentation	1,8	1,5	1,6	2,1 ↑	1,6 ↑	2,4 ↑	1,3 ↑	0,8	0,4 ↑	0,1 ↑	1,0	0,0	0,0	1,2	0,0	1,3 ↑	1,4	0,7 ↑	0,0
Transport maritime (grands navires)	1,4	0,2	0,9	0,4	0,3	0,0	0,3	0,0	0,4 ↑	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7 ↑	0,0	1,2 ↓	0,0
Tourisme : kayak	0,4	0,4	0,4	0,4	1,3 ↑	0,6	0,5	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9	0,0
Tourisme : navigation de plaisance	0,2	0,0	0,5	1,3 ↑	1,3 ↑	0,9	1,0	0,0	0,4	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5 ↓	0,0
Tourisme : plongée en scaphandre autonome	0,4 ↑	0,0	0,0	0,0	0,1	1,0	0,5 ↓	0,0	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,35 ↑	0,0	0,0	0,2	0,0
Tourisme : surf	0,4	0,6	0,2	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0

Tableau 7 : Matrice de vulnérabilité révisée pour la côte de l'Atlantique. Les cotes de vulnérabilité qui ont été modifiées au cours de l'examen préalable de la matrice sont indiquées en gras avec une flèche indiquant le sens du changement. Les habitats mixtes sont cartographiés, mais utilisent une cote de vulnérabilité moyenne pour le type d'habitat (par exemple, le plateau à substrat mixte est une moyenne des cotes des classes d'habitats de plateau à substrat meuble et dur). Ces habitats n'ayant pas fait l'objet d'une expertise, ils n'apparaissent pas dans ce tableau.

Activités et facteurs de stress	Plages intertidales	Replats de marée	Habitats intertidaux rocheux	Marais salés	Forêts de varech	Herbiers marins	Zones d' algues	Habitats à substrat meuble du littoral	Habitats à substrat dur du littoral	Biohermes de modioles	Plateaux à substrat meuble	Plateaux à substrat dur	Habitats pélagiques peu profonds	Habitats à substrat meuble bathyaux	Habitats à substrat dur bathyaux	Canyons	Habitats biogéniques profonds	Habitats pélagiques profonds
Aquaculture : poissons à nageoires	0,0	0,2	2,4 ↑	0,9	1,3 ↑	1,4 ↑	2,4 ↑	1,9	2,1	0,0	0,6	3,0	1,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Aquaculture : plantes marines	0,0	0,8	2,0	0,8	0,0	1,4 ↑	0,4	1,8	1,0	0,0	0,6	1,5	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Aquaculture : mollusques	0,9	2,0	2,5	1,4	1,3 ↑	2,4 ↑	1,7	3,5 ↑	2,1	2,7	0,6	2,4	1,3 ↑	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6
Structures benthiques	0,0	3,3	2,8	1,9	1,1 ↓	1,4 ↑	3,7	2,3 ↓	2,6	3,6	3,7 ↑	3,8	1,2 ↓	3,4 ↓	0,0	3,1 ↓	2,3 ↑	1,9
Changement climatique : acidification des océans	1,8	4,3	3,3 ↓	3,5 ↓	2,2 ↓	2,3 ↓	3,2	1,5	4,2 ↑	3,2 ↓	4,4	5,0	4,7	3,4 ↓	4,7	4,7	2,2 ↓	3,7
Changement climatique : élévation du niveau de la mer	4,4	3,4 ↓	4,8	4,6	0,0 ↓	3,5	3,6 ↑	2,0	2,4	1,1 ↓	1,0	1,2 ↓	2,3 ↓	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1
Changement climatique : changement de la température de la mer	4,3	6,1	3,9	2,3 ↓	5,2	2,8	3,8	4,8	4,6	3,9	3,5	5,9	5,1	4,3	4,5 ↑	3,1	4,1 ↑	4,6
Changement climatique : changement du rayonnement ultraviolet	2,1	3,4 ↓	3,3 ↓	3,5 ↓	1,1 ↓	3,5 ↓	3,5 ↓	3,8	3,1	1,1 ↓	0,0	1,2 ↓	3,5 ↓	0,0	0,0	0,0	0,0	3,3
Travaux maritimes : modification de la dynamique de l'écoulement de l'eau	3,6	3,6	3,3 ↓	3,7	2,3 ↑	2,8	2,5	3,2	1,2	4,3	2,3 ↑	1,4	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	1,5

Activités et facteurs de stress	Plages intertidales	Replats de marée	Habitats intertidaux rocheux	Marais salés	Forêts de varech	Herbiers marins	Zones d' algues	Habitats à substrat meuble du littoral	Habitats à substrat dur du littoral	Biohermes de modioles	Plateaux à substrat meuble	Plateaux à substrat dur	Habitats pélagiques peu profonds	Habitats à substrat meuble bathyaux	Habitats à substrat dur bathyaux	Canyons	Habitats biogéniques profonds	Habitats pélagiques profonds
Travaux maritimes : altération de l'habitat	3,7	3,6	3,7	3,7 ↑	2,5	4,2 ↑	3,5	4,2	1,6	4,3	2,3 ↑	1,6	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	1,3
Effet direct de l'activité humaine : piétinement	3,0	2,7	2,0	1,2 ↓	0,2	1,6	0,0	0,8	0,6	0,0	0,5	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9
Maladies et agents pathogènes	2,5 ↑	3,2	2,9	1,8	2,3 ↑	2,3	2,0	1,8	2,5	2,7	6,1	2,5	2,8	2,3	1,3 ↑	2,0	1,3 ↑	2,8
Dragage	2,8	3,3	2,4 ↑	2,4 ↑	1,3 ↑	4,2 ↑	3,4	3,5	3,2	3,9	3,7 ↑	4,1	1,3	2,3 ↑	0,7 ↑	0,0	2,3 ↑	1,8
Infrastructures énergétiques : gaz naturel liquide	1,2	3,1	3,3	1,2 ↓	2,5	2,5	2,5	4,6	2,1	2,4	2,3 ↓	2,3 ↓	2,8	0,0	0,0	0,0	0,0	2,4
Infrastructures énergétiques : marémotrices	1,4	3,0	1,3 ↑	1,2 ↓	2,2 ↓	2,7	2,7	5,9	2,6	1,7	2,3 ↑	3,0	2,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7
Pêche : aquarium	0,0	0,0	0,3	0,3	1,1 ↓	0,0	0,6	0,4	0,9	0,0	0,6	1,9	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7
Pêche : démersale, altérant l'habitat	0,0	3,1	2,4 ↑	0,5	1,3 ↑	4,2 ↑	3,1	3,8	3,5	3,6 ↑	3,7 ↑	3,5	2,2	3,6 ↑	4,5 ↑	4,5	4,8	2,8
Pêche : démersale, altérant peu l'habitat, prises accessoires importantes	0,0	1,1	1,4 ↑	0,8	2,2	1,5 ↑	2,8	2,6	2,5	1,1 ↓	3,5	3,9	1,8	2,7	2,2	2,3	2,3	1,4
Pêche : démersale, altérant peu l'habitat, faibles prises accessoires	0,0	1,1	1,2 ↓	0,7	1,1 ↓	1,4 ↑	2,5	2,1	2,2	2,9	2,2	2,3	1,7 ↓	1,2 ↑	1,7	1,4	2,3 ↑	1,7
Pêche : artisanale (de subsistance), altérant peu l'habitat	0,6	1,0	0,2	0,7	0,4	0,3	0,3	0,0	2,0	1,6	1,0	2,3	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Pêche : pélagique, prises accessoires importantes	0,0	1,0	0,0	0,2	0,5	0,0	2,6	1,5	1,6	0,0	2,9	2,3 ↓	3,2	1,2 ↑	0,7 ↑	1,3 ↑	2,3 ↑	2,9

Activités et facteurs de stress	Plages intertidales	Replats de marée	Habitats intertidaux rocheux	Marais salés	Forêts de varech	Herbiers marins	Zones d'algues	Habitats à substrat meuble du littoral	Habitats à substrat dur du littoral	Biohermes de modioles	Plateaux à substrat meuble	Plateaux à substrat dur	Habitats pélagiques peu profonds	Habitats à substrat meuble bathyaux	Habitats à substrat dur bathyaux	Canyons	Habitats biogéniques profonds	Habitats pélagiques profonds
Pêche : pélagique, faibles prises accessoires	0,0	1,0	0,0	0,2	0,4	0,0	1,7	1,5	1,3	0,0	2,6	2,3	2,8	0,0	0,0	1,3 ↑	2,3 ↑	1,1
Pêche : récréative	1,1	2,1	1,2	2,4 ↑	1,1 ↓	1,1	1,6	1,5	2,5	1,6	2,0	2,8	2,2	0,0	1,3	0,0	2,3 ↑	0,9
Apport d'eau douce : diminution	0,2	0,2	1,7	2,3 ↓	0,4	2,4 ↑	1,1	0,0	3,0	0,0	2,4	3,4	1,3 ↑	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8
Apport d'eau douce : augmentation	0,5	2,4 ↑	2,6	2,3 ↓	1,4	2,3 ↓	1,9	1,9	3,0	1,4	2,7	3,4	2,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8
Espèces envahissantes (provenant du ballast, etc.)	3,6	1,8	3,8	3,5	4,3	2,6	3,6 ↑	2,3 ↓	3,5	3,8	3,3	4,0	3,2	1,2	2,3 ↓	0,0	1,3 ↑	1,2 ↓
Activité militaire	0,0	3,1	0,5	1,3 ↑	1,1 ↓	0,3 ↑	0,9	1,1	2,2	0,0	2,3	1,8	2,4 ↑	2,2	2,3	2,3	0,0 ↓	2,5
Apport de nutriments : à l'origine de la prolifération d'algues nuisibles	0,2	3,6	2,4 ↑	1,7	2,0	2,6	2,3	1,5	2,7	3,8	2,9	3,5	3,1	0,0	0,0	0,0	0,0	1,2
Apport de nutriments : à l'origine d'eaux hypoxiques	0,2	3,6	2,4 ↑	1,9	1,8	4,2 ↑	2,1	3,7	3,2	3,9	3,7 ↑	3,2	2,4 ↑	1,2 ↑	0,0	0,0	0,0	1,1
Apport de nutriments : dans les eaux eutrophes	0,2	4,0	3,6 ↑	2,9	1,6	4,2 ↑	2,3	3,7	3,2	3,9	2,7	3,5 ↓	2,3	0,0	0,0	1,8	0,0	1,1
Apport de nutriments : dans les eaux oligotrophes	0,2	3,6 ↑	0,5	2,5	2,2	2,3	2,9	3,7	1,6	3,9	2,9	3,4	2,4 ↑	0,0	2,1	2,3	0,0	1,1
Rejet en mer : engins de pêche perdus	2,5	1,4	1,1	0,7	1,1 ↓	1,0	2,5	2,3 ↓	2,4	0,9	3,1	2,8	2,4 ↑	2,9	2,3	2,5 ↑	2,3	2,6
Rejet en mer : débris marins (déchets, etc.)	3,6	2,7	2,2	1,6	1,4	0,8	3,1	3,3	2,4	1,1	3,7	2,8	3,1	1,4	1,6	1,3 ↑	1,3	2,9

Activités et facteurs de stress	Plages intertidales	Replats de marée	Habitats intertidaux rocheux	Marais salés	Forêts de varech	Herbiers marins	Zones d' algues	Habitats à substrat meuble du littoral	Habitats à substrat dur du littoral	Biohermes de modioles	Plateaux à substrat meuble	Plateaux à substrat dur	Habitats pélagiques peu profonds	Habitats à substrat meuble bathyaux	Habitats à substrat dur bathyaux	Canyons	Habitats biogéniques profonds	Habitats pélagiques profonds
Rejet en mer : naufrages	0,5	1,2	1,6	0,3	1,1 ↓	0,5	1,8	3,4	1,6	1,8 ↓	2,8	2,0	1,3	2,3	3,1 ↓	1,1 ↓	0,0 ↓	1,5
Rejet en mer : matières toxiques	1,9	3,4	2,6	1,5	1,6	0,7	3,7	2,5 ↑	2,2	3,1	4,3	3,9	2,3	5,2	2,0	4,1 ↑	2,0	2,6
Exploitation minière des océans (sable, minéraux, etc.)	2,3	1,4	1,6	0,7	0,2	1,4 ↑	0,3	3,8	2,3	0,0	3,7 ↑	3,7	2,0	2,3 ↑	0,0	0,0	2,3 ↑	2,9
Pollution des océans (par les navires, les ports, etc.)	3,4	3,2	3,3	2,9	1,6	2,4 ↑	1,7	3,5	3,1	0,0	3,5 ↓	3,8	3,5	2,3 ↓	1,7	1,6	2,3 ↑	2,9
Apport de polluants : atmosphériques	1,0	2,1	1,8	2,8	1,1 ↓	1,8	2,1	0,0	2,3 ↓	1,1 ↓	3,5 ↓	2,3 ↓	3,4	0,0	2,0	2,3	0,0	3,8
Apport de polluants : inorganiques	1,3	2,6	2,0	3,0	2,3	2,0	2,4 ↑	1,4	3,5	2,5	4,7	3,9	2,8	1,2 ↑	1,9	2,3	0,0	2,6
Apport de polluants : lumière	2,1	0,2 ↑	1,0	0,7	0,2	0,3 ↑	2,1	1,0	1,5	1,1 ↓	0,0	1,8	1,5	0,0	1,8	0,0	0,0	1,4
Apport de polluants : bruit	2,2	1,6	0,6	1,2 ↓	0,2	0,3 ↑	0,1	0,5	1,7	1,1 ↓	0,4	2,4	3,5 ↑	1,2 ↑	0,7 ↑	4,1 ↑	1,2 ↑	2,9
Apport de polluants : organiques	2,3	3,0	3,0	3,0	2,3	3,0	2,4 ↑	3,8	3,4	2,7	3,8	3,6	3,5	0,0	2,3	2,2	0,0	3,2
Apport de polluants : déchets, etc. (écoulements urbains)	3,1	2,7	2,1	2,7	1,3	1,9	3,6	4,1	3,1	1,8	3,2	2,4	2,8	0,0	0,7	1,4	0,0	2,1
Centrales électriques et usines de dessalement	0,0	1,5	1,4	2,1	1,4	1,5	3,2	3,1	2,6	0,0	1,3	3,2	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1
Recherche scientifique : collecte	0,6	1,2 ↓	1,7	1,2 ↓	1,1 ↓	0,0 ↓	0,5	1,3	0,9	0,9 ↑	1,8	1,5	0,9	1,2 ↑	1,3	1,1 ↓	1,3	1,6
Recherche scientifique : expériences/levés	0,6	1,2 ↓	1,6	1,2 ↓	1,1 ↓	0,0 ↓	0,5	1,1 ↓	0,6	0,0	2,1	2,2	0,4	0,0	0,0 ↓	1,1 ↓	1,6	0,6

Activités et facteurs de stress	Plages intertidales	Replats de marée	Habitats intertidaux rocheux	Marais salés	Forêts de varech	Herbiers marins	Zones d' algues	Habitats à substrat meuble du littoral	Habitats à substrat dur du littoral	Biohermes de modioles	Plateaux à substrat meuble	Plateaux à substrat dur	Habitats pélagiques peu profonds	Habitats à substrat meuble bathyaux	Habitats à substrat dur bathyaux	Canyons	Habitats biogéniques profonds	Habitats pélagiques profonds
Apport de sédiments : diminution	2,7	2,0	1,2 ↓	4,1	0,0 ↓	1,4	0,8	0,7	1,9	2,9	1,5	2,3 ↓	1,0	0,0	0,7 ↑	0,0	0,0	0,8
Apport de sédiments : augmentation	3,1	3,6	2,4	1,2 ↓	2,5	2,4 ↑	2,4	2,3	2,2	2,5	2,8	2,3 ↓	1,8	0,0	0,7 ↑	2,5	0,0	0,8
Transport maritime (commercial, croisières, traversiers)	0,9	0,9	1,2	1,3 ↑	0,2 ↑	1,7	1,8	0,0	2,8	0,0	1,7	3,2	1,2 ↓	0,0	0,0	2,5 ↑	0,0	0,8
Tourisme : kayak	0,7	0,8	1,1	1,2	1,1	0,5	0,0 ↓	0,0	0,6	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Tourisme : navigation de plaisance	1,4	2,3	1,2 ↓	2,4 ↑	1,1 ↓	2,8	2,2	1,7	2,0	0,0	0,7	1,2	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8
Tourisme : plongée en scaphandre autonome	0,5	0,6	1,1	0,1	1,1 ↓	0,7	1,1 ↓	1,5	1,2	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6
Tourisme : surf	1,2	0,0	0,6	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Tourisme : observation des baleines	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1 ↓	0,0	0,0	0,0	0,6	0,0	0,0	1,9	2,3	0,0	0,0	1,1 ↑	0,0	1,1

5. ANALYSE ET CONCLUSIONS

5.1. APPLICATIONS

Depuis son origine, la cartographie des effets cumulatifs a été appliquée dans de nombreuses régions du monde (Afflerbach *et al.* 2017; Andersen *et al.* 2015; Andersen *et al.* 2017; Halpern *et al.* 2007; Halpern *et al.* 2009; Halpern *et al.* 2015; Halpern *et al.* 2008; Kappel *et al.* 2012; Micheli *et al.* 2013; Selkoe *et al.* 2009). Son attribut le plus puissant est sa capacité à simplifier et à visualiser des informations complexes. Les cartes des effets cumulatifs montrent des différences d'effets entre les zones, mettant en opposition des zones à effet relativement faible et des zones à effet élevé. Les résultats du modèle fournissent une illustration simple des effets cumulatifs qui a été largement citée dans la littérature scientifique et présentée dans les médias grand public (p. ex. National Geographic).

Au-delà de l'illustration, la cartographie des effets cumulatifs a été utilisée afin de prioriser les activités et les facteurs de stress ayant une incidence élevée sur les mesures de gestion ou d'atténuation. Par exemple, Mach *et al.* (2017) ont évalué les effets cumulatifs sur les aires marines protégées en Californie et ont identifié les activités sous contrôle de la gestion locale qui contribuent aux effets cumulatifs dans le contexte du changement climatique mondial. Brown et ses collaborateurs (2014) ont montré que la connaissance du type d'interaction entre les facteurs de stress locaux et mondiaux aidait à prendre des décisions de gestion efficaces concernant les herbiers marins. Wyatt *et al.* (2017) ont modifié la méthode de cartographie des effets cumulatifs afin d'estimer le risque cumulatif sur les habitats que représentent de multiples facteurs de stress le long de la côte atlantique des États-Unis, en constatant différents niveaux de risque pour les écosystèmes côtiers et extracôtiers et en identifiant différentes stratégies de gestion nécessaires afin d'atténuer ce risque. Dans le cadre de recherches récentes, Murphy *et al.* (2022) ont utilisé des seuils quantitatifs connus dans la réponse des herbiers marins aux facteurs de stress afin de fixer des limites quantitatives aux cotes d'effets cumulatifs.

La cartographie des effets cumulatifs peut être utilisée pour déterminer un niveau de référence des effets cumulatifs et comparer le niveau de référence à d'autres scénarios futurs. Clarke Murray *et al.* (2015a) ont comparé les effets cumulatifs actuels avec une augmentation résultant des expansions industrielles proposées. Lonsdale *et al.* (2020) ont mis au point un outil permettant de tenir compte des différences d'échelle temporelle des facteurs de stress, en identifiant le moment où les facteurs de stress se produisent à chaque phase d'un projet (construction, exploitation, déclassement). Hammar *et al.* (2020) ont ajouté une composante scénario à un modèle de cartographie des effets cumulatifs afin de projeter les conséquences positives ou négatives sur les composantes de l'écosystème de différentes alternatives de planification dans le cadre du plan spatial marin relatif aux eaux suédoises de la mer Baltique.

En théorie, la cartographie des effets cumulatifs pourrait être utilisée afin de déterminer les zones à des fins de planification; les zones à faible effet pourraient être des aires protégées potentielles, tandis que les zones à effet élevé pourraient être des cibles pour les efforts de restauration. Les résultats pourraient être utilisés afin de définir les seuils des trois conditions globales pour la mer : dégradée, partagée et sauvage (Agbayani et Murray 2020; Locke *et al.* 2019). De plus, dans le cadre explicite de la planification spatiale marine, les cotes d'effets cumulatifs pourraient servir de couche de coût dans les analyses Marxan afin de déterminer ou comparer les scénarios de planification ou concevoir des réseaux d'aires marines protégées. Les cotes d'effet peuvent également être utilisées dans le cadre de la surveillance ou de la recherche en tant que variable continue pour stratifier l'effort d'échantillonnage, comme cela a été le cas pour l'habitat estuarien dans le cadre de la recherche du partenariat de planification marine pour la côte nord du Pacifique (MaPP) (Wallace et Martone 2021).

5.2. LACUNES ET LIMITES

La cartographie des effets cumulatifs comporte des hypothèses importantes qui doivent être reconnues dans toute application de la méthode (examinée par Halpern et Fujita, 2013). Premièrement, le modèle suppose que les effets des facteurs de stress sont additifs, lorsqu'il y a de plus en plus de preuves que les interactions synergiques et antagonistes sont courantes (Côté *et al.* 2016; Crain *et al.* 2008; Darling et Côté 2008). On suppose que les facteurs de stress ont la même importance et que chacun est réparti uniformément dans sa représentation spatiale (cellule de la grille ou polygone). On suppose aussi que les écosystèmes préoccupants réagissent de façon uniforme et linéaire aux facteurs de stress individuels et aux effets cumulatifs. Les courbes dose-réponse sont généralement non linéaires, mais nécessitent de nombreux essais en laboratoire (p. ex. la contamination des orques par les PCB : Hall *et al.* 2018). Grâce aux progrès réalisés dans la connaissance du système, il serait possible d'appliquer des interactions non additives lorsque cela se justifie.

Le modèle de cartographie des effets cumulatifs comporte des exigences élevées en matière de données, la collecte et le traitement des données constituant la majeure partie du travail dans toute application. Les données de base sont compilées pour des dizaines de couches d'habitat et d'activité et, comme pour tout modèle, les résultats dépendent de la qualité et de la disponibilité des données. Les ensembles de données spatiales sources sont souvent à des échelles et des résolutions différentes et un seul ensemble de données à résolution grossière peut brouiller les résultats. Par exemple, l'ensemble de données sur la pêche à la cuiller du saumon utilisé dans Clarke Murray *et al.* (2015b) n'était disponible que dans de grandes zones statistiques et, par conséquent, les heures consacrées à la pêche étaient réparties sur une zone beaucoup plus vaste que pour d'autres ensembles de données, ce qui donne l'impression qu'il y a eu des effets dans des endroits où l'effort de pêche n'était pas susceptible de se produire.

Comme pour tout modèle, les résultats dépendent fortement de la qualité et de la disponibilité des données et ne doivent pas être interprétés ou extrapolés au-delà de l'échelle de l'application. L'échelle de l'application devrait être proportionnelle à l'échelle de la gestion et de la prise de décision, c'est-à-dire que les applications globales ne doivent pas être ramenées à une échelle réduite afin de prendre des décisions sur les effets locaux. La plupart des analyses sont effectuées à une résolution de 1 à 10 km² et ne conviendraient donc pas pour certaines décisions relatives à la détermination des sites à l'échelle locale, par exemple la sélection de sites d'aquaculture ou le zonage municipal.

La simplification et la visualisation de la cartographie des effets cumulatifs s'accompagnent d'une perte d'informations, car les couches de données de différents types sont normalisées à une échelle unique. Chaque application a des cotes qui reflètent le nombre de couches incluses et ne peut être comparée quantitativement à d'autres régions modélisées, sans une certaine forme de normalisation ou de standardisation. La cote d'effets cumulatifs n'est pas une mesure quantitative ni un prédicteur des effets, mais elle permet d'identifier les zones où les effets sont plus élevés par rapport aux autres zones de la région. À ce jour, les résultats des efforts de cartographie des effets cumulatifs n'ont pas été utilisés dans un contexte politique ou de gestion.

La robustesse des résultats de la cartographie des effets cumulatifs n'est pas souvent testée. Bien que certaines analyses aient montré que les modèles généraux étaient stables face à l'incertitude et au manque de données (Allan *et al.* 2013; Halpern *et al.* 2008; Korpinen *et al.* 2012; Selkoe *et al.* 2009), Stock et Micheli (2016) ont constaté que les facteurs d'influence varient d'une étude à l'autre et d'une zone d'étude à l'autre. Ils ont conclu que les efforts de cartographie des effets cumulatifs devraient comprendre une évaluation des incertitudes et une analyse de sensibilité (Stock et Micheli 2016).

Peu de tests empiriques ont été effectués sur l'applicabilité des cotes aux dimensions de la structure et de la fonction des écosystèmes. L'évaluation globale (Halpern *et al.* 2008) était faiblement corrélée à la richesse en espèces; les zones fortement touchées présentaient une richesse en espèces plus faible (Tittensor *et al.* 2010). Andersen *et al.* (2015) ont constaté des corrélations négatives significatives entre l'état de la biodiversité et les effets cumulatifs dans la mer Baltique, ce qui plaide en faveur de l'évaluation des effets cumulatifs en tant que mesure de l'état global de l'écosystème sur de vastes échelles spatiales. En revanche, les quelques tentatives visant à établir un lien entre les données d'études quantitatives (c'est-à-dire la composition de la communauté benthique, les indices des herbiers marins) et les cotes d'effets cumulatifs à des échelles spatiales plus petites (c'est-à-dire un seul port ou un seul estuaire) ont révélé des relations faibles ou non significatives entre les effets cumulatifs et l'état écologique (Clark *et al.* 2016; Stockbridge *et al.* 2021), ce qui donne à penser que les grands modèles illustrés dans les cartes des effets cumulatifs ne sont pas bien adaptés à la prédiction de l'état écologique à petite échelle.

La plupart des applications ont tendance à être menées au niveau de l'activité, avec un seul facteur de stress attribué à l'activité et une empreinte assortie d'une « zone tampon ». En réalité, les activités humaines produisent de multiples facteurs de stress (p. ex., la navigation commerciale est associée à des dizaines de facteurs de stress selon Hannah *et al.* 2020) qui peuvent également interagir avec des facteurs de stress provenant d'autres activités à proximité. Les progrès récents de la méthode permettent d'attribuer plusieurs facteurs de stress à chaque activité, mais il faut veiller à sélectionner et à appliquer les facteurs de stress de manière uniforme et exhaustive à toutes les activités. L'attribution d'un plus grand nombre de facteurs de stress à des activités bien connues peut fausser les résultats en montrant un effet plus important que des activités moins bien étudiées. Dans la mesure du possible, les facteurs de stress ayant des sources multiples doivent être directement inclus (par exemple, la concentration de nutriments, la modification de l'apport d'eau douce, etc.), plutôt qu'attribués à une activité.

La matrice de vulnérabilité sert de base au modèle et permet de comparer les effets potentiels des facteurs de stress dans différents types d'écosystèmes. La méthode particulière du jugement d'experts créée par Halpern et ses collègues (2007) a permis de normaliser l'évaluation d'activités et de facteurs de stress présentant des caractéristiques différentes et donc directement comparables. L'effort actuel a permis d'évaluer et de mettre à jour les matrices de vulnérabilité pour les côtes du Pacifique et de l'Atlantique à l'aide d'un exercice de jugement d'experts. Les cotes régionales ne sont pas comparables entre elles, car elles sont établies de manière relative au sein de chaque région. Les résultats de la matrice de vulnérabilité sont influencés par la zone d'étude et l'échelle d'information, et un groupe d'experts différent a été consulté pour chaque région. Les experts consultés dans le cadre de cet effort de recherche ont comparé les cotes pour un habitat spécifique. Il pourrait être utile d'examiner plus avant les cotes de vulnérabilité en se concentrant sur les facteurs de stress, comme cela a été fait pour le bruit sous-marin dans le cadre de l'effort actuel. Avec l'évolution de notre connaissance du système au fil du temps, les cotes devraient être revues et évaluées périodiquement. Nous suggérons que les évaluations soient effectuées au moins tous les dix ans ou lorsque des changements importants sont intervenus dans la connaissance du système.

6. REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent remercier les nombreux experts qui ont pris le temps de répondre à l'enquête et de fournir d'excellents conseils sur la vulnérabilité des habitats. Deux collègues ont évalué une version préliminaire de l'instrument d'enquête afin d'en vérifier la clarté et l'utilité avant qu'il ne soit utilisé – merci à L. Hannah et K. Wilson. Nous remercions tous les

participants à la réunion d'évaluation par les pairs du SCAS, dont les idées ont permis de grandement améliorer le document.

7. RÉFÉRENCES CITÉES

- Adger, W.N. 2006. [Vulnerability](#). *Global Environmental Change* **16**(3): 268-281.
- Afflerbach, J.C., Yocum, D., et Halpern, B.S. 2017. Cumulative human impacts in the Bering Strait Region. *Ecosystem Health and Sustainability* **3**(8): 1379888. doi : 10.1080/20964129.2017.1379888.
- Agbayani, S., et Murray, C. 2020. Identifying cumulative impact thresholds: implications for marine spatial planning. *Dans* Salish Sea Ecosystem Conference (Online).
- Agbayani, S., and Murray, C.C. 2024. [Pacific Marine Habitat Classes for Cumulative Impact Mapping](#). *Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci.* **3608**: vii + 33 p.
- Agbayani, S., Picco, C.M., et Alidina, H.M. 2015. [Cumulative impact of bottom fisheries on benthic habitats: A quantitative spatial assessment in British Columbia, Canada](#). *Ocean & Coastal Management* **116**: 423-434.
- Allan, J.D., McIntyre, P.B., Smith, S.D.P., Halpern, B.S., Boyer, G.L., Buchsbaum, A., Burton, G.A., Campbell, L.M., Chadderton, W.L., Ciborowski, J.J.H., Doran, P.J., Eder, T., Infante, D.M., Johnson, L.B., Joseph, C.A., Marino, A.L., Prusevich, A., Read, J.G., Rose, J.B., Rutherford, E.S., Sowa, S.P., et Steinman, A.D. 2013. Joint analysis of stressors and ecosystem services to enhance restoration effectiveness. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **110**(1): 372-377. doi : 10.1073/pnas.1213841110.
- Andersen, J.H., Halpern, B.S., Korpinen, S., Murray, C., and Reker, J. 2015. [Baltic Sea biodiversity status vs. cumulative human pressures](#). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **161**: 88-92.
- Andersen, J.H., Berzaghi, F., Christensen, T., Geertz-Hansen, O., Mosbech, A., Stock, A., Zinglensen, K.B., and Wisz, M.S. 2017. [Potential for cumulative effects of human stressors on fish, sea birds and marine mammals in Arctic waters](#). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **184**: 202-206.
- Ban, N.C., Alidina, H.M., and Ardron, J.A. 2010. [Cumulative impact mapping: Advances, relevance and limitations to marine management and conservation, using Canada's Pacific waters as a case study](#). *Marine Policy* **34**(5): 876-886.
- Beauchesne, D., Cazelles, K., Archambault, P., Dee, L.E., et Gravel, D. 2021. [On the sensitivity of food webs to multiple stressors](#). *Ecology Letters* **24**(10) : 2219-2237.
- Brown, C.J., Saunders, M.I., Possingham, H.P., et Richardson, A.J. 2014. [Interactions between global and local stressors of ecosystems determine management effectiveness in cumulative impact mapping](#). *Diversity and Distributions* **20**(5): 538-546.
- Chuenpagdee, R., Morgan, L.E., Maxwell, S.M., Norse, E.A., et Pauly, D. 2003. Shifting gears: assessing collateral impacts of fishing methods in US waters. *Frontiers in Ecology and the Environment* **1**(10): 517-524. doi : 10.1890/1540-9295
- Clark, D., Goodwin, E., Sinner, J., Ellis, J., et Singh, G. 2016. Validation and limitations of a cumulative impact model for an estuary. *Ocean & Coastal Management* **120**: 88-98. doi : 10.1016/j.ocecoaman.2015.11.013.

-
- Clarke Murray, C., Agbayani, S., et Ban, N.C. 2015a. [Cumulative effects of planned industrial development and climate change on marine ecosystems](#). *Global Ecology and Conservation* **4**: 110-116.
- Clarke Murray, C., Agbayani, S., Alidina, H.M., et Ban, N.C. 2015b. [Advancing marine cumulative effects mapping: An update in Canada's Pacific waters](#). *Marine Policy* **58**: 71-77.
- Clarke Murray, C., Hannah, L., et Locke, A. 2020. A Review of Cumulative Effects Research and Assessment in Fisheries and Oceans Canada. Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci. **3357**: vii + 51 p.
- Côté, I.M., Darling, E.S., et Brown, C.J. 2016. Interactions among ecosystem stressors and their importance in conservation. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* **283**(1824): 20152592. doi : 10.1098/rspb.2015.2592.
- Coll, M., Piroddi, C., Albouy, C., Ben Rais Lasram, F., Cheung, W.W.L., Christensen, V., Karpouzi, V.S., Guilhaumon, F., Mouillot, D., Paleczny, M., Palomares, M.L., Steenbeek, J., Trujillo, P., Watson, R., et Pauly, D. 2012. [The Mediterranean Sea under siege: spatial overlap between marine biodiversity, cumulative threats and marine reserves](#). *Global Ecology and Biogeography* **21**(4): 465-480.
- Crain, C.M., Kroeker, K., et Halpern, B.S. 2008. Interactive and cumulative effects of multiple human stressors in marine systems. *Ecology Letters* **11**(12): 1304-1315.
- Darling, E.S., et Côté, I.M. 2008. [Quantifying the evidence for ecological synergies](#). *Ecology Letters* **11**(12): 1278-1286.
- Duarte, C.M., Agusti, S., Barbier, E., Britten, G.L., Castilla, J.C., Gattuso, J.-P., Fulweiler, R.W., Hughes, T.P., Knowlton, N., Lovelock, C.E., Lotze, H.K., Predragovic, M., Poloczanska, E., Roberts, C., et Worm, B. 2020. Rebuilding marine life. *Nature* **580**(7801): 39-51. doi : 10.1038/s41586-020-2146-7.
- Elliott, M., Borja, A. et Cormier, R., 2020. Activity-footprints, pressures-footprints and effects-footprints – Walking the pathway to determining and managing human impacts in the sea. *Marine Pollution Bulletin*, **155**, p. 111201.
- Erbe, C., MacGillivray, A., et Williams, R. 2012. Mapping cumulative noise from shipping to inform marine spatial planning. *The Journal of the Acoustical Society of America* **132**(5): EL423-EL428. doi :10.1121/1.4758779.
- Fuller, S.D., Picco, C., Ford, J., Tsao, C.-F., Morgan, L.E., Hangaard, D., et Chuenpagdee, R. 2008. How We Fish Matters: Addressing the Ecological Impacts of Canadian Fishing Gear. Ecology Action Centre and Living Oceans Society and Marine Conservation Biology Institute.
- Goodsir, F., Bloomfield, H.J., Judd, A.D., Kral, F., Robinson, L.A., and Knights, A.M. 2015. A spatially resolved pressure-based approach to evaluate combined effects of human activities and management in marine ecosystems. *ICES Journal of Marine Science* **72**(8): 2245-2256. doi : 10.1093/icesjms/fsv080.
- Grabowski, J.H., Bachman, M., Demarest, C., Eayrs, S., Harris, B.P., Malkoski, V., Packer, D., et Stevenson, D. 2014. Assessing the Vulnerability of Marine Benthos to Fishing Gear Impacts. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture* **22**(2): 142-155. doi : 10.1080/10641262.2013.846292.
- Gregg, E.J., Haggarty, D.R., Davies, S.C., Fields, C., Lessard, J. 2021. [Comprehensive marine substrate classification applied to Canada's Pacific shelf](#). *PLOS ONE* **16**(10): e0259156.
-

-
- Gregg, E.J., Lessard, J., Harper, J. 2013. [A spatial framework for representing nearshore ecosystems](#). *Progress in Oceanography* **115**:189-201.
- Gunderson, A.R., Armstrong, E.J., et Stillman, J.H. 2016. Multiple Stressors in a Changing World: The Need for an Improved Perspective on Physiological Responses to the Dynamic Marine Environment. *Annual Review of Marine Science* **8**(1): 357-378. doi : 10.1146/annurev-marine-122414-033953.
- Hall, A.J., McConnell, B.J., Schwacke, L.H., Ylitalo, G.M., Williams, R., et Rowles, T.K. 2018. [Predicting the effects of polychlorinated biphenyls on cetacean populations through impacts on immunity and calf survival](#). *Environmental Pollution* **233**: 407-418.
- Halpern, B.S., and Fujita, R. 2013. [Assumptions, challenges, and future directions in cumulative impact analysis](#). *Ecosphere* **4**(10): art131.
- Halpern, B.S., Frazier, M., Afflerbach, J., Lowndes, J.S., Micheli, F., O'Hara, C., Scarborough, C., & Selkoe, K.A. 2019. [Recent pace of change in human impact on the world's ocean](#). *Sci Rep* **9**, 11609.
- Halpern, B.S., Frazier, M., Potapenko, J., Casey, K.S., Koenig, K., Longo, C., Lowndes, J.S., Rockwood, R.C., Selig, E.R., Selkoe, K.A., et Walbridge, S. 2015. Spatial and temporal changes in cumulative human impacts on the world's ocean. *Nature Communications* **6**(1): 7615. doi : 10.1038/ncomms8615.
- Halpern, B.S., Kappel, C.V., Selkoe, K.A., Micheli, F., Ebert, C.M., Kontgis, C., Crain, C.M., Martone, R.G., Shearer, C., and Teck, S.J. 2009. Mapping cumulative human impacts to California Current marine ecosystems. *Conservation Letters* **2**(3): 138-148. doi : 10.1111/j.1755-263X.2009.00058.x.
- Halpern, B.S., Selkoe, K.A., Micheli, F., et Kappel, C.V. 2007. Evaluating and ranking the vulnerability of global marine ecosystems to anthropogenic threats. *Conservation Biology* **21**(5): 1301-1315. doi : 10.1111/j.1523-1739.2007.00752.x.
- Halpern, B.S., Walbridge, S., Selkoe, K.A., Kappel, C.V., Micheli, F., D'Agrosa, C., Bruno, J.F., Casey, K.S., Ebert, C., Fox, H.E., Fujita, R., Heinemann, D., Lenihan, H.S., Madin, E.M.P., Perry, M.T., Selig, E.R., Spalding, M., Steneck, R., et Watson, R. 2008. A Global Map of Human Impact on Marine Ecosystems. *Science* **319**(5865): 948-952. doi : 10.1126/science.1149345.
- Hammar, L., Molander, S., Pålsson, J., Schmidtbauer Crona, J., Carneiro, G., Johansson, T., Hume, D., Kågesten, G., Mattsson, D., Törnqvist, O., Zillén, L., Mattsson, M., Bergström, U., Perry, D., Caldow, C., et Andersen, J.H. 2020. [Cumulative impact assessment for ecosystem-based marine spatial planning](#). *Science of The Total Environment* **734**: 139024.
- Hannah, L., Thornborough, K., Murray, C.C., Nelson, J., Locke, A., Mortimor, J., Lawson, J., et Thornborough, K. 2020. Modèles conceptuels de séquences des effets pour la navigation maritime commerciale au Canada : effets biologiques et écologiques. Secrétariat canadien de consultation scientifique. Doc. de rech. 2020/077. ix + 212 p.
- Hodgson, E.E. et Halpern, B.S. 2019. Investigating cumulative effects across ecological scales. *Conservation Biology* **33**(1): 22-32. doi : 10.1111/cobi.13125.
- Hodgson, E.E., Halpern, B.S., and Essington, T.E. 2019. Moving Beyond Silos in Cumulative Effects Assessment. *Frontiers in Ecology and Evolution* **7**. doi : 10.3389/fevo.2019.00211.
- Kappel, C.V., Halpern, B.S., et Napoli, N. 2012a. Mapping cumulative impacts of human activities on marine ecosystems. No 03.NCEAS.12. SeaPlan, Boston, MA.

-
- Kappel, C.V., Halpern, B.S., Selkoe, K.A., and Cooke, R.M. 2012b. Eliciting Expert Knowledge of Ecosystem Vulnerability to Human Stressors to Support Comprehensive Ocean Management. *Dans Expert Knowledge and Its Application in Landscape Ecology. Édité par A.H. Perera et C.A. Drew et C.J. Johnson.* Springer New York, New York, NY. pp 253-277.
- Kelly, C., Gray, L., Shucksmith, R.J., and Tweddle, J.F. 2014. [Investigating options on how to address cumulative impacts in marine spatial planning](#). *Ocean & Coastal Management* **102**: 139-148.
- Knights, A.M., Piet, G.J., Jongbloed, R.H., Tamis, J.E., White, L., Akoglu, E., Boicenco, L., Churilova, T., Kryvenko, O., Fleming-Lehtinen, V., Leppanen, J.-M., Galil, B.S., Goodsir, F., Goren, M., Margonski, P., Moncheva, S., Oguz, T., Papadopoulou, K.N., Setälä, O., Smith, C.J., Stefanova, K., Timofte, F., et Robinson, L.A. 2015. An exposure-effect approach for evaluating ecosystem-wide risks from human activities. *ICES Journal of Marine Science* **72**(3): 1105-1115.
- Korpinen, S., Meski, L., Andersen, J.H., et Laamanen, M. 2012. [Les pressions humaines et leur effet potentiel sur l'écosystème de la mer Baltique](#). *Ecological Indicators* **15**(1): 105-114.
- Locke, H., Ellis, E.C., Venter, O., Schuster, R., Ma, K., Shen, X., Woodley, S., Kingston, N., Bhola, N., Strassburg, B.B.N., Paulsch, A., Williams, B., et Watson, J.E.M. 2019. Three global conditions for biodiversity conservation and sustainable use: an implementation framework. *National Science Review* **6**(6): 1080-1082. doi : 10.1093/nsr/nwz136.
- Lonsdale, J.-A., Nicholson, R., Judd, A., Elliott, M., and Clarke, C. 2020. [A novel approach for cumulative impacts assessment for marine spatial planning](#). *Environmental Science & Policy* **106**: 125-135.
- Mach, M.E., Wedding, L.M., Reiter, S.M., Micheli, F., Fujita, R.M., et Martone, R.G. 2017. Assessment and management of cumulative impacts in California's network of marine protected areas. *Ocean & Coastal Management* **137**: 1-11. doi : <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2016.11.028>.
- Marcotte, D., Hung, S.K., et Caquard, S. 2015. Mapping cumulative impacts on Hong Kong's pink dolphin population. *Ocean & Coastal Management* **109** (complet) : 51-63. doi : 10.1016/j.ocecoaman.2015.02.002.
- Maxwell, S.M., Hazen, E.L., Bograd, S.J., Halpern, B.S., Breed, G.A., Nickel, B., Teutschel, N.M., Crowder, L.B., Benson, S., Dutton, P.H., Bailey, H., Kappes, M.A., Kuhn, C.E., Weise, M.J., Mate, B., Shaffer, S.A., Hassrick, J.L., Henry, R.W., Irvine, L., McDonald, B.I., Robinson, P.W., Block, B.A., et Costa, D.P. 2013. Cumulative human impacts on marine predators. *Nature Communications* **4**(1): 2688. doi : 10.1038/ncomms3688.
- Micheli, F., Halpern, B.S., Walbridge, S., Ciriaco, S., Ferretti, F., Fraschetti, S., Lewison, R., Nykjaer, L., and Rosenberg, A.A. 2013. Cumulative Human Impacts on Mediterranean and Black Sea Marine Ecosystems: Assessing Current Pressures and Opportunities. *PLOS ONE* **8**(12): e79889. doi : 10.1371/journal.pone.0079889.
- MPO. 2009. [Élaboration d'un cadre et de principes pour la classification biogéographique des zones marines canadiennes](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO. avis sci. 2009/056.
- Murphy, G.E.P., Dunic, J.C., Adamczyk, E.M., Bittick, S.J., Côté, I.M., Cristiani, J., Geissinger, E.A., Gregory, R.S., Lotze, H.K., O'Connor, M.I., Araújo, C.A.S., Rubidge, E.M., Templeman, N.D., Wong, M.C., et Schindler, D.E. 2021. From coast to coast to coast: ecology and management of seagrass ecosystems across Canada. *FACETS* **6**: 139-179. doi : 10.1139/facets-2020-0020.
-

-
- Murphy, G.E.P., Kelly, N.E., Lotze, H.K., et Wong, M.C. 2022. [Incorporating anthropogenic thresholds to improve understanding of cumulative effects on seagrass beds](#). *FACETS* **7**: 966-987.
- Murray, C.C., Hannah, L.C., Doniol-Valcroze, T., Wright, B.M., Stredulinsky, E.H., Nelson, J.C., Locke, A., et Lacy, R.C. 2021. A cumulative effects model for population trajectories of resident killer whales in the Northeast Pacific. *Biological Conservation*, **257**, 109124.
- O, M., Martone, R., Hannah, L., Greig, L., Boutillier, J., et Patton, S. 2015. An Ecological Risk Assessment Framework (ERAF) for Ecosystem-based Oceans Management in the Pacific Region. [Cadre d'évaluation du risque écologique pour la gestion écosystémique des océans dans la région du Pacifique.] Document de recherche 2014/072 du Secrétariat canadien des avis scientifiques du MPO, SCAS du MPO.
- O'Hara, C.C., Frazier, M., et Halpern, B.S. 2021. [At-Risk Marine Biodiversity Faces Extensive, Expanding, and Intensifying Human Impacts](#). *Science* **372**, no. 6537: 84–87.
- Parravicini, V., Rovere, A., Vassallo, P., Micheli, F., Montefalcone, M., Morri, C., Paoli, C., Albertelli, G., Fabiano, M., et Bianchi, C.N. 2012. [Understanding relationships between conflicting human uses and coastal ecosystems status: A geospatial modeling approach](#). *Ecological Indicators* **19**: 253-263.
- Perry, R.I. 2019. Section 4.3 Ecosystem responses to anthropogenic and natural pressures in the Strait of Georgia, Canada, based on an expert elicitation approach. *Dans* Report of Working Group 28 on Development of Ecosystem Indicators to Characterize Ecosystem Responses to Multiple Stressors. *Révisé par* M. Takahashi et R.I. Perry, p. 245.
- Rubidge, E., Thornborough, K., O, M. 2018. [Ecological Risk Assessment for the Effects of Human Activities on the SGaan Kinghlas-Bowie Seamount Marine Protected Area](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO., Doc. de rech. 2018/012. viii + 98 p. Comprend un résumé en français.
- Selkoe, K.A., Halpern, B.S., Ebert, C.M., Franklin, E.C., Selig, E.R., Casey, K.S., Bruno, J., et Toonen, R.J. 2009. A map of human impacts to a “pristine” coral reef ecosystem, the Papahānaumokuākea Marine National Monument. *Coral Reefs* **28**(3): 635-650. doi : 10.1007/s00338-009-0490-z.
- Singh, G.G., Eddy, I.M.S., Halpern, B.S., Neslo, R., Satterfield, T., et Chan, K.M.A. 2020. Mapping cumulative impacts to coastal ecosystem services in British Columbia. *PLOS ONE* **15**(5): e0220092. doi : 10.1371/journal.pone.0220092.
- Stelzenmüller, V., Lee, J., South, A., et Rogers, S.I. 2010. Quantifying cumulative impacts of human pressures on the marine environment: a geospatial modelling framework. *Marine Ecology Progress Series* **398**: 19-32.
- Stock, A., et Micheli, F. 2016. Effects of model assumptions and data quality on spatial cumulative human impact assessments. *Global Ecology and Biogeography* **25**(11): 1321-1332. doi : 10.1111/geb.12493.
- Stockbridge, J., Jones, A.R., Gaylard, S.G., Nelson, M.J., et Gillanders, B.M. 2021. [Evaluation of a popular spatial cumulative impact assessment method for marine systems: A seagrass case study](#). *Science of The Total Environment* **780**: 146401.
- Sylvester, F., Kalaci, O., Leung, B., Lacoursière-Roussel, A., Murray, C.C., Choi, F.M., Bravo, M.A., Therriault, T.W., et MacIsaac, H.J. 2011. [Hull fouling as an invasion vector: can simple models explain a complex problem?](#) *Journal of Applied Ecology* **48**(2): 415-423.
-

-
- Teck, S.J., Halpern, B.S., Kappel, C.V., Micheli, F., Selkoe, K.A., Crain, C.M., Martone, R., Shearer, C., Arvai, J., Fischhoff, B., Murray, G., Neslo, R., et Cooke, R. 2010. Using expert judgment to estimate marine ecosystem vulnerability in the California Current. *Ecological Applications* **20**(5): 1402-1416. doi : 10.1890/09-1173.1.
- Tittensor, D.P., Mora, C., Jetz, W., Lotze, H.K., Ricard, D., Berghe, E.V., et Worm, B. 2010. Global patterns and predictors of marine biodiversity across taxa. *Nature* **466**(7310): 1098-1101. doi : 10.1038/nature09329.
- Trew, B.T., Grantham, H.S., Barrientos, C., Collins, T., Doherty, P.D., Formia, A., Godley, B.J., Maxwell, S.M., Parnell, R.J., Pikesley, S.K., Tilley, D., Witt, M.J., Metcalfe, K. 2019. [Using Cumulative Impact Mapping to Prioritize Marine Conservation Efforts in Equatorial Guinea](#). *Frontiers in Marine Science* **6**.
- Wallace, N., et Martone, R.G. 2021. Collaborative nearshore monitoring to inform cumulative effects assessment and management on the North Coast of B.C. *Dans Hakai Nearshore Monitoring Seminar Series*.
- Wilson, K., Pressey, R.L., Newton, A., Burgman, M., Possingham, H., et Weston, C. 2005. Measuring and incorporating vulnerability into conservation planning. *Environ Manage* **35**(5): 527-543. doi : 10.1007/s00267-004-0095-9.
- Wyatt, K.H., Griffin, R., Guerry, A.D., Ruckelshaus, M., Fogarty, M., et Arkema, K.K. 2017. Habitat risk assessment for regional ocean planning in the U.S. Northeast and Mid-Atlantic. *PLOS ONE* **12**(12): e0188776. doi : 10.1371/journal.pone.0188776.

ANNEXES

Annexe 1. Exemple relatif à l'instrument d'enquête.

Herbiers marins (0 à 30 m): Habitats résultant de la présence de zostère marine (*Zostera marina*) dans des sédiments meubles (sable/vase) recouverts d'eau. Peuvent être intertidaux ou infratidaux.

Activités humaines et facteurs de stress (Vulnérabilité classée de la plus élevée à la plus faible)	Classes de cotes de vulnérabilité	En cas de changement de classe, quelle est la classe qui reflète le statut du Pacifique ?	Justification du changement (avec les citations)	Commentaires et/ou détails supplémentaires (facultatif)
Changement climatique : acidification des océans	Extrême			
Aquaculture : mollusques et crustacés	Élevée			
Structures benthiques	Élevée			
Changement climatique : élévation du niveau de la mer	Élevée			
Changement climatique : changement de la température de la mer	Élevée			
Changement climatique : changement du rayonnement ultraviolet	Élevée			
Travaux maritimes : altération de l'habitat	Élevée			
Dragage	Élevée			
Espèces envahissantes	Élevée			
Rejet en mer : naufrages	Élevée			
Apport de sédiments : augmentation	Élevée			
Travaux maritimes : modification de la dynamique de l'écoulement de l'eau	Moyenne			
Effet direct de l'activité humaine : piétinement	Moyenne			
Maladie ou agents pathogènes	Moyenne			
Pêche : récréative	Moyenne			
Eau douce : augmentation de l'apport	Moyenne			
Activité militaire	Moyenne			
Apport de nutriments : à l'origine de la prolifération d'algues nuisibles	Moyenne			
Apport de nutriments : à l'origine de zones hypoxiques	Moyenne			
Apport de nutriments dans les eaux eutrophes	Moyenne			
Apport de nutriments dans les eaux mésotrophes	Moyenne			
Rejet en mer : engins de pêche perdus	Moyenne			
Rejet en mer : matières toxiques	Moyenne			
Pollution des océans par les navires et les ports	Moyenne			

Activités humaines et facteurs de stress (Vulnérabilité classée de la plus élevée à la plus faible)	Classes de cotes de vulnérabilité	En cas de changement de classe, quelle est la classe qui reflète le statut du Pacifique ?	Justification du changement (avec les citations)	Commentaires et/ou détails supplémentaires (facultatif)
Apport de polluants : atmosphériques	Moyenne			
Apport de polluants : inorganiques	Moyenne			
Apport de polluants : organiques	Moyenne			
Apport de polluants : écoulements urbains	Moyenne			
Expériences de recherche ou levés scientifiques	Moyenne			
Apport de sédiments : diminution	Moyenne			
Tourisme : navigation de plaisance	Moyenne			
Aquaculture : poissons à nageoires	Faible			
Aquaculture : plantes et algues	Faible			
Pêche : aquarium	Faible			
Pêche : démersale, altérant l'habitat	Faible			
Pêche : démersale, altérant peu l'habitat, prises accessoires importantes	Faible			
Pêche : démersale, altérant peu l'habitat, faibles prises accessoires	Faible			
Pêche : altérant peu l'habitat, artisanale	Faible			
Eau douce : diminution de l'apport	Faible			
Composante marine des opérations forestières	Faible			
Rejet en mer : débris marins	Faible			
Exploitation minière des océans : sable, minéraux, etc.	Faible			
Apport de polluants : lumière	Faible			
Apport de polluants : bruit	Faible			
Centrales électriques et usines de dessalement	Faible			
Recherche scientifique et collecte	Faible			
Transport maritime (grands navires)	Faible			
Tourisme : kayak	Faible			
Tourisme : plongée en scaphandre autonome	Faible			
Tourisme : surf	Faible			
Pêche : pélagique, prises accessoires importantes	Négligeable			
Pêche : pélagique, faibles prises accessoires	Négligeable			

Annexe 2. Liste des experts consultés dans le cadre de l'examen préalable des matrices de vulnérabilité relatives aux écosystèmes de l'Atlantique et du Pacifique

Atlantique	Pacifique
Allison Schmidt	Alex Dalton
Anna Metaxas	Carrie Robb
Brooke Maslo	Cherisse Du Preez
Caroline Longtin	Christopher D. G. Harley
Catherine Johnson	Chris Rooper
Danika van Proosdij	Christine Hansen
Daphne E Themelis	Cliff Robinson
David Burdick	Dana Haggarty
David Drolet	Dominique Bureau
David Garbary	Erin Herder
David J.W. Piper	Heidi Gartner
Ellen Kenchington	Ian Perry
Gary Saunders	Jennifer Boldt
Heather Hunt	Joanne Lessard
Heike Lotze	Katie Gale
Hilary Moors-Murphy	Lyanne Curtis
Javier Murillo	Rebecca Martone
Jeffery Clements	Robert DeWreede
Jen Frail-Gauthier	Sally Leys
Jessica Sameoto	Sarah Dudas
John O'Brien	Sharon Jeffery
Katleen Robert	Stephanie Kraft Archer
Kira Krumhansl	Tammy Norgard
Luke Anthony Poirier	Travis G. Gerwing
Marjolaine Blais	Verena Tunnicliffe
Melisa Wong	
Patrick Gagnon	
Paul Snelgrove	
Peter Auster	
Peter Galbraith	
Philippe Archambault	
Robert Gregory	
Thomas Guyondet	
Urs Neumeier	