

L'évaluation des impacts cumulés dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent : vers une planification systémique de l'exploitation des ressources

David Beauchesne, Cindy Grant, Dominique Gravel et Philippe Archambault

Volume 140, numéro 2, été 2016

Le Saint-Laurent

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/1036503ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/1036503ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

La Société Provancher d'histoire naturelle du Canada

ISSN

0028-0798 (imprimé)

1929-3208 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Beauchesne, D., Grant, C., Gravel, D. & Archambault, P. (2016). L'évaluation des impacts cumulés dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent : vers une planification systémique de l'exploitation des ressources. *Le Naturaliste canadien*, 140(2), 45–55. <https://doi.org/10.7202/1036503ar>

Résumé de l'article

L'intensification de l'empreinte humaine dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent impose une planification systémique de l'exploitation des ressources marines. Une évaluation régionale des impacts cumulés dans le Saint-Laurent demeure pourtant encore attendue. Un nombre important d'activités (p. ex. transport maritime, pêche, aquaculture) caractérise l'exploitation humaine du Saint-Laurent. Ces activités imposent plusieurs stressseurs environnementaux (p. ex. destruction de l'habitat) affichant un chevauchement spatial croissant. Individuellement, ils peuvent affecter la structure et le fonctionnement des écosystèmes. Imposés simultanément, les stressseurs peuvent agir en synergie et entraîner des effets non linéaires imprévisibles. Ces effets demeurent largement incompris et conséquemment ignorés lors d'évaluations d'impacts environnementaux, qui demeurent orientées sur des espèces ou secteurs uniques et l'approbation de projets. Plusieurs défis relatifs aux impacts cumulés dans le Saint-Laurent doivent être relevés : 1) améliorer l'état des connaissances des impacts de multiples stressseurs sur les écosystèmes, 2) améliorer l'applicabilité des méthodes d'évaluation d'impacts cumulés, 3) identifier des indicateurs d'impacts cumulés, 4) créer un protocole de suivi environnemental et d'impacts humains, et de partage de données et 5) développer une capacité de gestion adaptative pour le Saint-Laurent. La planification systémique de l'utilisation des ressources naturelles au sein du Saint-Laurent nécessitera une vision intégrative de la structure et du fonctionnement des écosystèmes ainsi que des vecteurs de stress qui leur sont imposés. Une telle approche ne sera réalisable que lorsque nous aurons développé les infrastructures et les outils nécessaires à une gestion écosystémique du Saint-Laurent.

L'évaluation des impacts cumulés dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent: vers une planification systémique de l'exploitation des ressources

David Beaudesne, Cindy Grant, Dominique Gravel et Philippe Archambault

Résumé

L'intensification de l'empreinte humaine dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent impose une planification systémique de l'exploitation des ressources marines. Une évaluation régionale des impacts cumulés dans le Saint-Laurent demeure pourtant encore attendue. Un nombre important d'activités (p. ex. transport maritime, pêche, aquaculture) caractérise l'exploitation humaine du Saint-Laurent. Ces activités imposent plusieurs stressseurs environnementaux (p. ex. destruction de l'habitat) affichant un chevauchement spatial croissant. Individuellement, ils peuvent affecter la structure et le fonctionnement des écosystèmes. Imposés simultanément, les stressseurs peuvent agir en synergie et entraîner des effets non linéaires imprévisibles. Ces effets demeurent largement incompris et conséquemment ignorés lors d'évaluations d'impacts environnementaux, qui demeurent orientées sur des espèces ou secteurs uniques et l'approbation de projets. Plusieurs défis relatifs aux impacts cumulés dans le Saint-Laurent doivent être relevés: 1) améliorer l'état des connaissances des impacts de multiples stressseurs sur les écosystèmes, 2) améliorer l'applicabilité des méthodes d'évaluation d'impacts cumulés, 3) identifier des indicateurs d'impacts cumulés, 4) créer un protocole de suivi environnemental et d'impacts humains, et de partage de données et 5) développer une capacité de gestion adaptative pour le Saint-Laurent. La planification systémique de l'utilisation des ressources naturelles au sein du Saint-Laurent nécessitera une vision intégrative de la structure et du fonctionnement des écosystèmes ainsi que des vecteurs de stress qui leur sont imposés. Une telle approche ne sera réalisable que lorsque nous aurons développé les infrastructures et les outils nécessaires à une gestion écosystémique du Saint-Laurent.

MOTS CLÉS : activités humaines, effets non linéaires, gestion adaptative, stressseurs environnementaux, synergie

Abstract

The intensification of human activity in the Estuary and Gulf of St. Lawrence (Canada) imposes the need for a systematic planning approach for the use of marine resources. There is, however, currently no regional cumulative impact assessment for the St. Lawrence. Many of the human activities in this area (e.g., shipping, fisheries and aquaculture) impose environmental threats (e.g., habitat destruction) that may jeopardize ecosystem structure and function. Increasingly, these threats are overlapping spatially, which induces synergies causing unpredictable non-linear effects on ecosystems. These effects are still poorly understood and consequently neglected in environmental impact assessments, which remain focused on single species or sectors, and on the approval of specific projects. To efficiently evaluate cumulative impacts in the St. Lawrence, it will be important to: 1) improve our knowledge concerning the impacts of multiple threats to ecosystems; 2) improve the accessibility to, and the applicability of, cumulative impact tools; 3) identify relevant human and environmental indicators of cumulative impacts; 4) create a data sharing, and human impact and environmental monitoring protocol; and 5) develop an adaptive management approach for the St. Lawrence. Systematic planning of the use of natural resources in the St. Lawrence will require an integrated overview of the structure and function of its ecosystems, and of the sources of stresses affecting them. Such an approach will only be feasible once the necessary infrastructures and tools for ecosystem-based management of the area have been developed.

KEYWORDS: adaptive management; environmental stressors; human activities; non-linear effects; synergy

Introduction

Que ce soit à travers des activités comme la pêche ou le transport maritime, l'homme impose de profonds changements sur la structure et le fonctionnement des écosystèmes marins et compromet leur intégrité (Myers et Worm, 2003; Worm et collab., 2006; Estes et collab., 2011). L'intensification des activités humaines entraîne un chevauchement spatial croissant des différents stressseurs, de telle sorte que peu de milieux demeurent libres de l'empreinte humaine (Halpern et collab., 2008b, 2015). L'intégrité des écosystèmes est ainsi attaquée sur plusieurs fronts, avec des conséquences parfois imprévisibles.

David Beaudesne est candidat au doctorat en océanographie à l'Institut des sciences de la mer (ISMER) de l'Université du Québec à Rimouski (UQAR).

david.beaudesne@uqar.ca.

Cindy Grant est auxiliaire de recherche à l'ISMER.

cindy_grant@uqar.ca.

Dominique Gravel est professeur au Département de biologie de l'Université de Sherbrooke.

dominique_gravel@usherbrooke.ca.

Philippe Archambault est professeur à l'ISMER et codirecteur du réseau Notre Golfe.

philippe_archambault@uqar.ca

Les activités humaines en milieu marin ont ainsi été collectivement qualifiées de syndromes d'ordre supérieur de changements globaux océaniques (Duarte, 2014; Boonstra et collab., 2015). Les impacts cumulés ont alors été identifiés comme principale priorité de recherche en sciences marines par plus de 2 000 scientifiques venant des sciences physiques, écologiques et sociales (Rudd, 2014) et sont mentionnés répétitivement parmi les questions de recherche marine prioritaires au Canada (CCA, 2012).

La disponibilité et l'accessibilité aux ressources marines augmentent rapidement l'intérêt porté à l'estuaire et au golfe du Saint-Laurent (EGSL). Ce vaste écosystème est d'ailleurs actuellement identifié en tant que vecteur clé pour la croissance économique du Québec (Gouvernement du Québec, 2015). Cette stratégie maritime laisse présager un accroissement imminent des activités humaines au sein d'un écosystème où les impacts des pressions anthropiques actuelles demeurent largement incompris (Dufour et Ouellet, 2007; Benoît et collab., 2012).

L'intensification de l'empreinte humaine dans le Saint-Laurent imposerait une planification systémique de l'exploitation (c'est-à-dire toute activité extractive ou non extractive) de ses ressources marines. À l'instar de la planification systémique de la conservation (Margules et Pressey, 2000), la planification systémique de l'exploitation des ressources viserait à suivre une démarche objective et proactive de gestion, basée sur des objectifs clairs et qui intègre l'ensemble des activités susceptibles d'affecter les ressources naturelles. L'accumulation des impacts imposés à la structure et au fonctionnement des écosystèmes du Saint-Laurent demeure toutefois encore largement incomprise, comme ailleurs sur le monde (Halpern et collab., 2008b; Halpern et Fujita, 2013). Les évaluations d'impacts environnementaux canadiennes sont ainsi encore aujourd'hui orientées sur des espèces ou des secteurs uniques et se concentrent davantage sur l'approbation de projets (Dubé et collab., 2006; Duinker et Greig, 2006; Crowder et Norse, 2008).

Il se dégage ainsi une incohérence entre la volonté d'assurer une gestion durable des ressources, nécessitant une vision holistique, et une gestion isolée des stress sur les écosystèmes. Une évaluation des impacts cumulés dans le Saint-Laurent demeure ainsi inexistante. L'objectif de cet article est d'établir un état des connaissances sur les impacts cumulés dans le Saint-Laurent. Nous identifions également les principaux défis de recherche et de gestion à relever afin de permettre une évaluation des impacts cumulés efficace pour le Saint-Laurent.

Les impacts cumulés au Canada

Pour définir convenablement les impacts cumulés, il importe de définir certaines notions. Une activité humaine est un processus par lequel l'homme exploite ou altère un milieu naturel (p. ex. la pêche; Halpern et collab., 2007). Un stressor environnemental est un processus d'origine naturelle ou anthropique pouvant perturber un milieu au-delà de ses limites de tolérance (Kappel et collab., 2012). L'extraction de biomasse occasionnée par la pêche peut ainsi être considérée comme un stressor environnemental. Similairement, une

variable d'état, comme la température, peut également entraîner un stress environnemental lorsqu'elle varie au-delà de ses limites naturelles de variabilité. Ces anomalies peuvent alors être caractérisées et considérées comme des stressors environnementaux. Une perturbation est l'effet mesurable d'un ou plusieurs stressors sur des variables biotiques ou abiotiques (Dunne et collab., 2002; Montoya et collab., 2009). Finalement, un impact est un changement mesuré en comparant un point initial à un point final pour un indicateur et une intensité de référence (Dubé et collab., 2006).

Les impacts cumulés correspondent à l'accumulation ou à l'accroissement progressif d'un ou de plusieurs impacts sur le milieu naturel (Peterson et collab., 1987). La législation canadienne définit les impacts cumulés comme : *L'impact sur l'environnement résultant des effets d'un projet combinés à ceux d'autres projets et activités antérieurs, actuels et imminents (Loi canadienne sur l'évaluation environnementale, 1992)*. Cette définition considère, entre autres, des échelles spatiales et temporelles variables, les interactions avec d'autres activités passées, présentes et futures, l'importance relative des impacts et leur intensité (Hegmann et collab., 1999). De façon plus imagée, les impacts cumulés s'apparentent à la mort par un millier de coupures (Therivel et Ross, 2007).

L'évaluation des impacts cumulés permet de considérer l'ensemble des stressors imposés sur un milieu naturel (Hegmann et collab., 1999; Dubé et collab., 2006; Krausman et Harris, 2011). Le processus d'évaluation des impacts cumulés ne cherche pas à remplacer les évaluations d'impacts ciblées sur des secteurs ou des espèces particulières, qui demeurent essentielles. Ces évaluations négligent toutefois de considérer les interactions et le chevauchement spatiotemporel entre les activités et les processus par lesquels elles affectent l'intégrité des milieux perturbés (Halpern et collab., 2008a). L'évaluation des impacts cumulés agit ainsi en tant qu'extension à ces évaluations pour favoriser une gestion systémique de l'exploitation du milieu naturel (Krausman et Harris, 2011).

L'incohérence entre la législation relative à l'évaluation des impacts cumulés et l'application réelle de ces évaluations est manifeste; le processus se concentre davantage sur l'approbation de projets individuels plutôt que sur la protection environnementale (Duinker et Greig, 2006). En effet, une approche par secteur ou par espèce est habituellement adoptée lors de l'évaluation des impacts de projets (Dubé et collab., 2006; Crowder et Norse, 2008), ignorant de fait les interactions potentielles de multiples pressions environnementales exercées simultanément. Une image partielle et une approche réactive se dégagent alors des pratiques usuelles d'évaluation des impacts environnementaux, menant plusieurs scientifiques à dénoncer les performances d'un système jugé imparfait et nécessitant une restructuration majeure (Kennett, 1999; Duinker et Greig, 2006).

Évaluation des impacts cumulés

Plusieurs méthodologies ont été développées afin d'évaluer les impacts cumulés (voir Krausman et Harris, 2011). Dans le cadre de cet article, nous nous concentrerons toutefois sur les exercices récents qui étudient les impacts cumulés en

milieu marin. Plusieurs exemples peuvent être trouvés dans la littérature (p. ex. Halpern et collab., 2008b, 2015; Vörösmarty et collab., 2010; Korpinen et collab., 2013). L'étude de Halpern et collab. (2008b) a enclenché une transition vers une étude systémique des impacts cumulés sur les océans. Cette étude a démontré que peu d'écosystèmes demeurent aujourd'hui libres de l'empreinte humaine à l'échelle planétaire et que la majorité des écosystèmes sont affectés par de multiples stressseurs environnementaux. Ce constat est d'ailleurs supporté par la majorité des études similaires (p. ex. Ban et Alder, 2008; Ban et collab., 2010; Micheli et collab., 2013). Une mise à jour de l'évaluation initiale (Halpern et collab., 2015) a également démontré un accroissement des impacts cumulés entre 2008 et 2013 sur près de 60 % du globe.

Les résultats obtenus par ces 2 études (Halpern et collab., 2008b, 2015) nous fournissent l'unique évaluation d'impacts cumulés sur les écosystèmes du Saint-Laurent. On y observe des impacts cumulés d'intensité faible ou intermédiaire, ainsi qu'une augmentation des impacts cumulés entre 2008 et 2013. Il s'agit toutefois d'une comparaison planétaire qui permet uniquement une comparaison des impacts relatifs imposés sur les différentes régions du globe. Cette analyse néglige conséquemment les particularités locales et les données à fine résolution disponibles à l'échelle du Saint-Laurent. Par exemple, des données d'hypoxie (< 30 % saturation d'oxygène) globale étant indisponibles, ce facteur de stress n'a pu être considéré. Il s'agit toutefois d'un enjeu d'importance identifié pour le Saint-Laurent (Benoît et collab., 2012) et pour lequel des données spatiales y sont actuellement disponibles (p. ex. Gilbert et collab., 2007). De la même manière, des données d'anomalies de températures de surface à fine résolution associées aux changements climatiques sont disponibles à l'échelle régionale (Galbraith et collab., 2012). Ce constat étant partagé pour d'autres régions, plusieurs analyses ont été effectuées à des échelles locales et régionales afin de raffiner les résultats obtenus à l'échelle planétaire, permettant ainsi de capturer plus fidèlement les particularités d'une région d'intérêt (Halpern et collab., 2009; Selkoe et collab., 2009). Ces analyses permettent alors de guider convenablement les gestionnaires en leur fournissant des évaluations adaptées à leurs besoins, à l'échelle où sont prises les décisions.

Évaluation régionale des impacts cumulés dans le Saint-Laurent

L'approche préconisée par Halpern et collab. (2008b) nécessite la caractérisation de 3 types de variables en vue de calculer un score d'impacts cumulés, soit : 1) une cartographie des stressseurs environnementaux dans le lieu d'étude, 2) une cartographie des éléments naturels d'intérêt (p. ex. écosystèmes ou espèces) et 3) une évaluation de la vulnérabilité des éléments naturels aux stressseurs environnementaux. Ces éléments sont ensuite croisés spatialement afin d'évaluer la co-occurrence, ou l'exposition, des éléments naturels d'intérêt aux stressseurs environnementaux. Une approche intégrative pour l'étude de l'écologie du Saint-Laurent est déjà bien documentée et permet

d'identifier des milieux d'intérêt écologiques. Citons par exemple l'identification des habitats benthiques, épipélagiques et côtiers (Dutil et collab., 2011, 2012), l'identification des zones d'intérêt écologique et biologique (ZIEB; Savenkoff et collab., 2007) et la cartographie des types de communautés benthiques dans le nord du golfe du Saint-Laurent (Moritz et collab., 2013).

L'évaluation des impacts cumulés nécessite une étape additionnelle, c'est-à-dire l'évaluation du chevauchement spatial entre les milieux naturels et l'ensemble des stressseurs environnementaux historiques, actuels et émergents (figure 1). Cette vision intégrative demeure toutefois absente pour l'évaluation des sources de stress dans le Saint-Laurent. À notre connaissance, les rapports de Dufour et Ouellet (2007) et Benoît et collab. (2012) sont les seuls ouvrages récents offrant une vue d'ensemble des différentes activités humaines et des sources de stress environnementaux dans le Saint-Laurent. Ces derniers ont identifié divers enjeux environnementaux en fonction de leur importance et leur probabilité d'agir cumulativement dans l'EGSL. La description des stressseurs du Saint-Laurent provient essentiellement de ces 2 rapports, à moins d'indication contraire.

Le potentiel d'exploitation des ressources fait du Saint-Laurent un vecteur économique d'une importance capitale pour le Québec et le Canada. Les principales activités économiques sont la pêche commerciale, le transport maritime, le tourisme et l'aquaculture (tableau 1). Les pêches commerciales et récréatives touchent, dans le Saint-Laurent, une cinquantaine d'espèces incluant les poissons de fond, les poissons pélagiques, les mollusques et les crustacés, de même que les algues et les phoques. La pression exercée par les activités de pêche sur les stocks a entraîné, au cours des dernières décennies, l'essor de l'aquaculture. Près de 2000 sites aquacoles sont recensés dans l'EGSL, mais presque tous sont concentrés dans le sud du golfe. Les côtes de l'Île-du-Prince-Édouard, de la Nouvelle-Écosse et du Nouveau-Brunswick produisent ainsi la quasi-totalité des moules et des huîtres d'élevage issues de l'EGSL.

Mis à part le potentiel commercial de ses espèces, le Saint-Laurent soutient le commerce de marchandises diverses et de nombreux navires y transitent chaque année. Avec plus de 40 ports en mesure d'accueillir des navires commerciaux, l'EGSL est en tête de liste lorsqu'il est question de transport maritime dans l'est du pays. De plus, avec la navigation de plaisance et l'augmentation du nombre de croisières et d'excursions en mer, le Saint-Laurent est non seulement un atout économique dans les secteurs de l'exploitation des ressources naturelles et du transport maritime, mais également un lieu d'intérêt pour l'industrie touristique.

Le Saint-Laurent accueillera également diverses activités émergentes, tandis que d'autres actuellement pratiquées s'intensifieront dans un futur rapproché. La stratégie maritime québécoise prévoit, entre autres, une amélioration et une augmentation des capacités des infrastructures portuaires, une augmentation du trafic maritime à caractère industriel et touristique, et une valorisation des produits issus des activités

Tableau 1. Principales activités humaines au sein de l’EGSL décrites en fonction des stressseurs environnementaux qui leur sont associés (inspiré de Dufour et Ouellet, 2007; Benoît et collab., 2012). Ne sont pas présentes dans ce tableau les boucles de rétroaction à travers lesquelles un stressseur peut affecter une autre activité humaine, telle que l’hypoxie qui influence la distribution des ressources halieutiques et ainsi les activités de pêche commerciale.

Activité	Sous-activité	Stress environnementaux															
		Acidification	Apports d’eau douce	Collisions	Contaminants	Courants/masses d’eau	Déchets/eaux usées	Destruction de l’habitat	Déversements accidentels hydrocarbures	Éléments nutritifs/déchets organiques	Élimination en mer	Espèces envahissantes	Hypoxie	Obstruction du courant	Parasites/maladies	Perturbation/dérangement	Prélèvement de la biomasse
Pêches	Pêche commerciale et récréative						X	X	X							X	X
	Usines de transformation						X				X				X		
Aquaculture*									X		X		X	X			
Transport maritime	Entretiens des voies navigables*		X		X			X		X						X	
	Transport de marchandises et de personnes*			X	X		X		X		X					X	
	Transport relié aux activités de pêche			X	X		X		X							X	
	Infrastructures portuaires*							X						X			
Production hydroélectrique	Modification du bassin versant	X	X		X				X			X					
Activités en milieu terrestre	Établissements humains	X				X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	
	Activités industrielles	X			X		X			X		X					
	Agriculture	X	X		X		X			X		X					
Industrie pétrolière et gazière en mer	Prospection sismique															X	
	Forage exploratoire							X								X	
	Exploitation**	X			X		X	X	X	X		X				X	
Tourisme	Aménagement côtier				X		X	X	X							X	
	Navigation de plaisance*			X	X		X		X		X					X	

*Activités ou sous-activités pour lesquelles une intensification est prévisible dans un futur rapproché

**Activités ou sous-activités émergentes

de pêche et d’aquaculture (Gouvernement du Québec, 2015). La présence d’hydrocarbures suscite également un intérêt grandissant pour l’EGSL, avec le prospect Old Harry chevauchant la limite entre le Québec et Terre-Neuve, et plus de 60 000 km de relevés sismiques effectués depuis les années 1960 (MPO, 2013a). Malgré un moratoire en place depuis 1997 pour la portion québécoise du golfe, un intérêt clair est attribué à l’exploration des hydrocarbures dans le Saint-Laurent (p. ex. MPO 2013b), suggérant qu’une exploitation des hydrocarbures peut être pressentie dans le Saint-Laurent. Des activités de pêche émergente, comme l’exploitation du concombre de mer (*Cucumaria frondosa*), sont également en essor dans le Saint-Laurent (p. ex. Campagna et collab., 2005).

Finalement, les changements climatiques vont vraisemblablement imposer des changements importants sur la structure et le fonctionnement des écosystèmes du Saint-Laurent et pourraient exacerber l’impact de stressseurs déjà observés dans le Saint-Laurent comme les anomalies de températures de surface (Dufour et Ouellet, 2007).

Impacts combinés de multiples stressseurs environnementaux

L’étendue spatiotemporelle et le chevauchement important des activités humaines peuvent multiplier les stressseurs environnementaux imposés sur une quantité considérable de

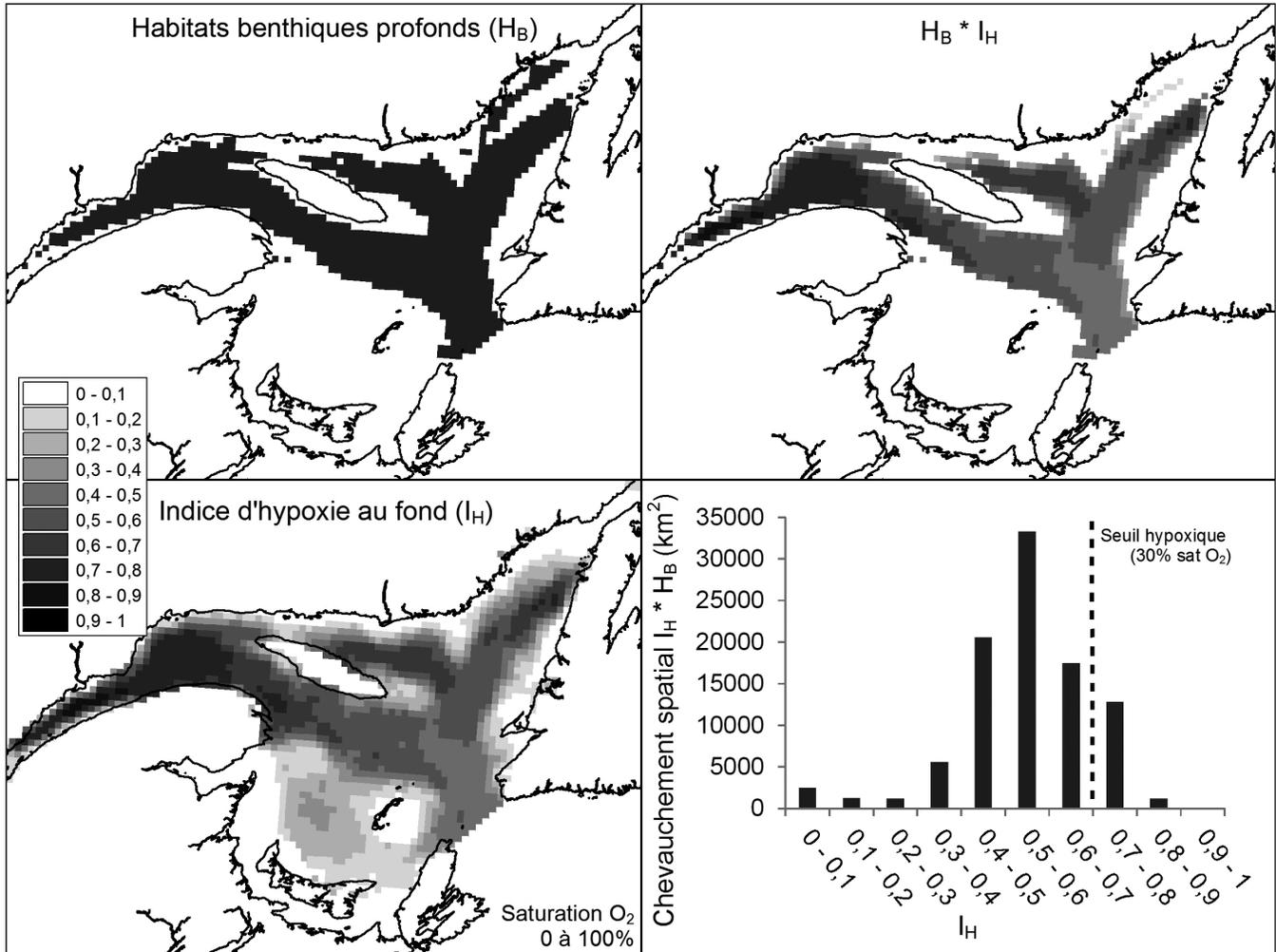


Figure 1. Cartographie des habitats benthiques profonds H_B et d'un indice d'hypoxie I_H pour l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent. L'indice d'hypoxie a été calculé en normalisant les valeurs de saturation en oxygène au fond entre 0 et 1, de telle sorte que la saturation en oxygène diminue plus la valeur de l'indice tend vers 1. La combinaison des habitats benthiques ($H_B * I_H$) permet de visualiser le chevauchement spatial entre les 2 variables. L'histogramme présente la superficie des habitats benthiques en fonction de classes d' I_H . Cette cartographie met en évidence la nécessité de considérer l'exposition des éléments écologiques d'intérêt aux différents stressors qui leur sont imposés. Les données d'habitats benthiques profonds et de saturation en oxygène proviennent de Dutil et collab. (2011).

ressources et de processus écologiques (MacDonald, 2000). D'abord, l'ensemble des activités humaines pratiquées dans le Saint-Laurent peut perturber directement et de plusieurs façons la biodiversité, par exemple la destruction de l'habitat et l'extraction de biomasse par la pêche (tableau 1). De plus, plusieurs activités humaines peuvent être à la source de stress indirect, comme le dérangement engendré par le trafic maritime et l'exploitation des hydrocarbures (tableau 1). Même individuellement, chaque stressor peut affecter la structure et le fonctionnement des écosystèmes (Jackson et collab., 2001; Steffen et collab., 2007). Ainsi, la surpêche a entraîné une chute du stock de poissons démersaux du Saint-Laurent (Frank et collab., 2005). En contrepartie, certaines activités de pêche semblent avoir atteint un seuil de perturbation au-delà duquel l'application de stress supplémentaire n'affecte plus les communautés (Moritz et collab., 2015). Le trafic maritime affecte également le comportement de mammifères marins dans le Saint-Laurent (p. ex. Lesage et

collab., 1999). À l'inverse, des impacts positifs peuvent parfois être observés, par exemple lors d'accroissement de la biomasse d'espèces commerciales sous certains sites d'aquaculture de moules aux Îles-de-la-Madeleine et à l'Île-du-Prince-Édouard (Clynick et collab., 2008; D'Amours et collab., 2008; Drouin et collab., 2015).

Imposés simultanément ou lors d'ajouts successifs, les stressors environnementaux possèdent toutefois un fort potentiel d'interactions (Worm et collab., 2002) qui peut entraîner des effets écologiques synergiques ou antagonistes difficiles à prédire (figure 2; Crain et collab., 2008; Darling et Côté, 2008; Halpern et collab., 2008a; Krausman et Harris, 2011). Les impacts cumulés de multiples stressors peuvent ainsi être supérieurs ou inférieurs à la somme de leur impact respectif (figure 2). Malgré cela, les analyses d'impacts cumulés continuent généralement de supposer des effets additifs entre stressors. Les effets non linéaires peuvent s'exprimer selon divers mécanismes. Par exemple, l'acidification peut causer des

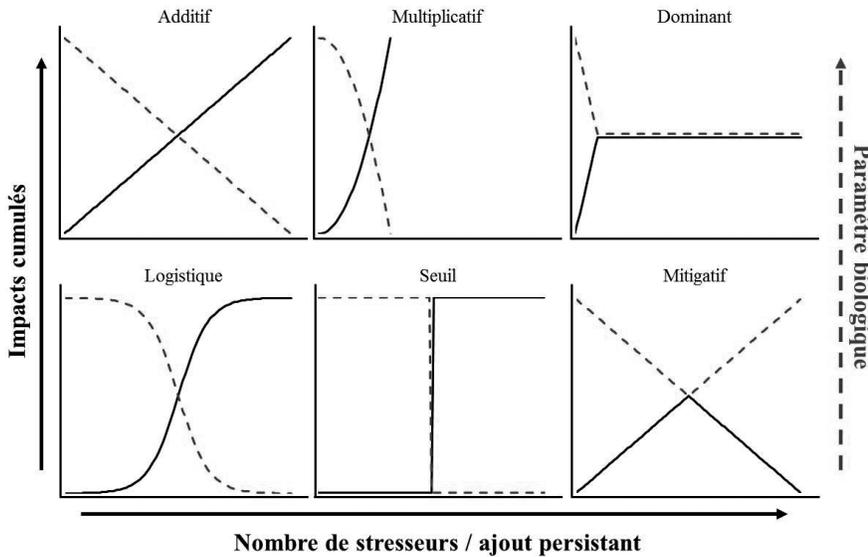


Figure 2. Représentation théorique de l'évolution des impacts cumulés en fonction de l'ajout d'un stressleur unique ou d'autres stresseurs. Les impacts cumulés sont également représentés par un marqueur biologique de changement au niveau d'une variable d'intérêt (p. ex. abondance ou connectivité d'un réseau). Les stresseurs peuvent interagir de plusieurs façons : les impacts totaux peuvent correspondre à la somme des impacts individuels, les impacts de plusieurs activités peuvent causer une multiplication des effets individuels, un stressleur unique peut dominer l'effet des autres stresseurs, les impacts peuvent croître logistiquement ou abruptement lors de l'atteinte d'un seuil de tolérance, et l'effet d'un stressleur peut être antagoniste à celui d'un autre et ainsi mitiger son effet. Finalement, les impacts totaux observés peuvent correspondre à une combinaison de plusieurs de ces cas théoriques (inspirée de Peterson et collab. (1987) et Halpern et collab. (2008a)).

écosystème (Adams, 2005; Montoya et collab., 2009; Burns et collab., 2014). La chute des poissons démersaux du Saint-Laurent a ainsi entraîné des cascades trophiques dans le golfe (Frank et collab., 2005). Les effets non linéaires pressentis demeurent toutefois inconnus (deYoung et collab., 2008; Halpern et Fujita, 2013; Côté et collab., 2016). Ces derniers sont ainsi largement ignorés dans le cadre d'évaluations d'impacts cumulés, qui assument généralement une relation linéaire additive entre le nombre de stresseurs et les impacts totaux observés (Halpern et collab., 2008b).

Le cas de la morue du golfe du Saint-Laurent

La morue (*Gadus morhua*) fournit un exemple intéressant des impacts de multiples stresseurs environnementaux et de la nécessité d'adopter une approche intégrative lors d'évaluations d'impacts. La morue a connu un déclin draconien dans les années 1990 ayant mené à l'imposition de moratoires sur l'exploitation des poissons de fond et éventuellement à sa désignation *en voie de disparition* (stock

problèmes respiratoires par hypercapnie chez certaines espèces, qui nécessitent alors un apport accru en oxygène (Pörtner et collab., 2005; Mucci et collab., 2011). Ainsi, chaque effet peut être bénin lorsque pris individuellement, mais les conséquences de stress faibles qui sont néanmoins synchronisées peuvent être dramatiques. L'effet de l'acidification peut ainsi être exacerbé lorsqu'on l'observe en milieu pauvre en oxygène (Pörtner et collab., 2005; Mucci et collab., 2011). Bien que les effets individuels puissent être aisément prévisibles au-delà d'un seuil individuel, comme le cas de l'hypoxie, la gestion de ces stresseurs devient incertaine sous ces seuils lorsque plusieurs stresseurs en interactions sont présents (figure 3).

Des effets non linéaires peuvent également survenir en raison de la complexité des interactions biotiques formant la structure des communautés, qui peut être à la base d'une propagation indirecte des perturbations au sein des écosystèmes (Yodzis, 2000; Montoya et collab., 2009; O'Gorman et Emmerson, 2009). Puisque les impacts des stresseurs peuvent être très contrastés entre espèces, la réponse des communautés aux stresseurs multiples dépend de la co-tolérance des espèces à chaque stressleur (Vinebrooke et collab., 2004). La communauté intègre ainsi l'ensemble des stress pouvant affecter l'abondance, la diversité et l'état des individus, des populations et des communautés au sein d'un

de morue du nord du golfe) par le Comité pour la situation des espèces en péril au Canada (COSEPAC). À la suite de ce déclin causé par une surpêche importante, la température de l'eau, la pression de prédation sur les juvéniles, la compétition pour les ressources et les pêcheries semblent maintenant agir en synergie pour limiter le rétablissement de ce stock de morue (Bundy et Fanning, 2011; Bousquet et collab., 2014). L'échec du rétablissement semble donc causé par une combinaison de facteurs environnementaux, d'interactions biotiques avec des prédateurs et des compétiteurs et par les activités humaines. Il est donc clair que seule l'adoption d'une approche intégrative, autant pour les variables environnementales que pour les vecteurs de stress, permet une compréhension adéquate de la situation de la morue dans le golfe du Saint-Laurent.

Défis de recherche et de gestion

L'étude des impacts cumulés constitue un enjeu essentiel pour le Saint-Laurent. Cet enjeu demeure particulièrement complexe à plusieurs égards, et de nombreux défis d'ordre législatif, économique, social et scientifique doivent être relevés. Nous présentons ainsi 5 défis de recherche et de gestion prioritaires en vue de permettre une évaluation des impacts cumulés dans le Saint-Laurent.

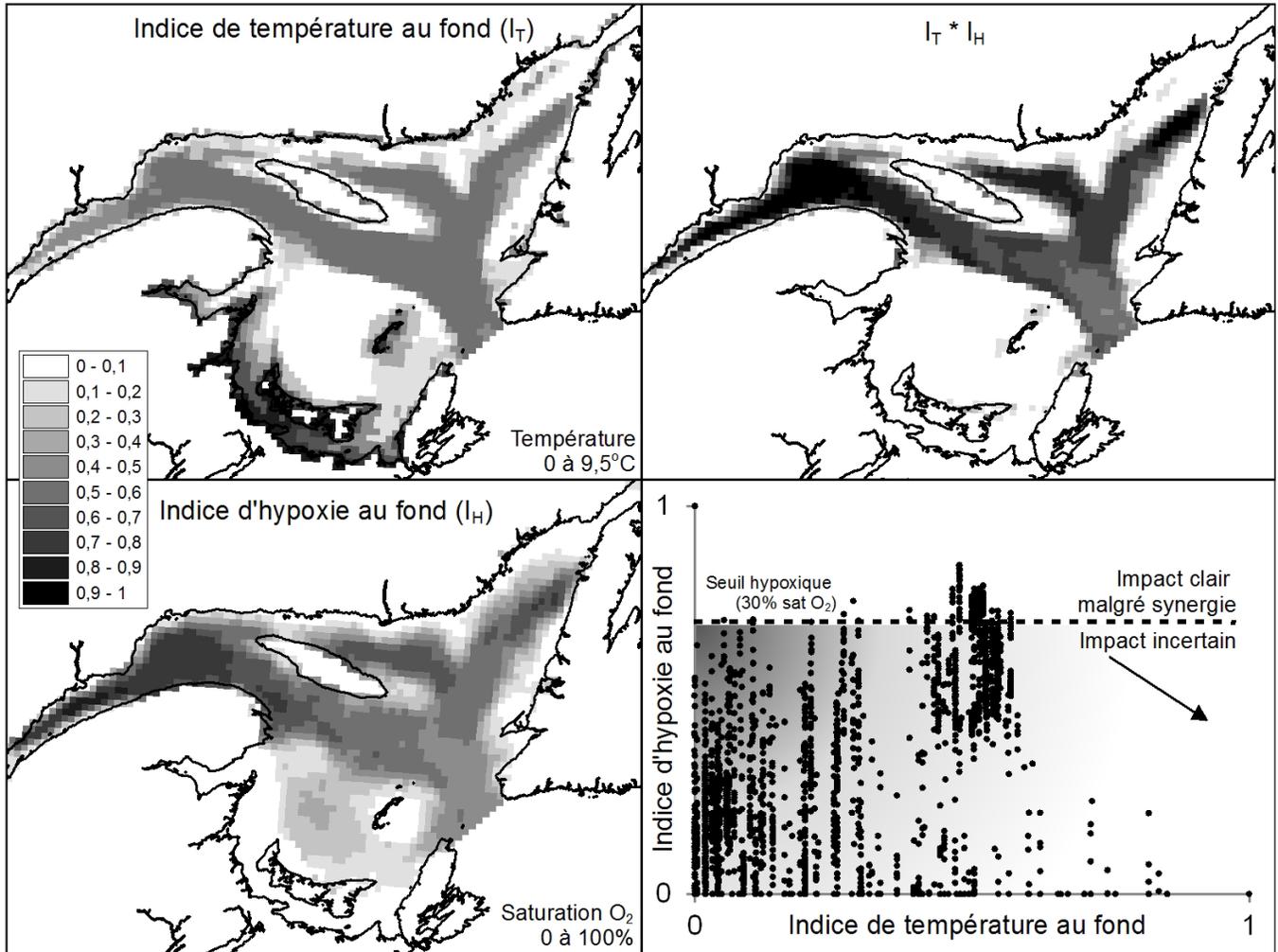


Figure 3. La cartographie d'indices de température I_T et d'hypoxie I_H pour l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent révèle l'importance d'étudier les impacts cumulés. Les indices ont été calculés en normalisant les valeurs de température moyenne et de saturation en oxygène au fond entre 0 et 1, de telle sorte que plus les températures augmentent et la saturation en oxygène diminue, plus la valeur de leur indice tend vers 1. La combinaison des 2 indices ($I_T * I_H$) permet de visualiser l'interaction spatiale entre les 2 variables. Le graphique de I_H en fonction de I_T fournit une représentation graphique de l'interaction entre les 2 variables. Le seuil hypoxique nous sert de limite conceptuelle au-delà de laquelle un impact du stresser est aisément prévisible malgré une interaction avec la température qui exacerbe son effet. Tel que représenté par la zone ombragée du graphique, les effets sont incertains sous ce seuil, les zones foncées étant plus à risque. Les données de température et de saturation en oxygène proviennent de Dutil et collab. (2011).

Défi 1. Améliorer l'état des connaissances des impacts de stressers multiples sur la structure et le fonctionnement des écosystèmes

Les interactions pressenties entre de multiples stressers et leur propagation non linéaire au sein des communautés demeurent largement incomprises (Côté et collab., 2016). La diversité des stressers imposés cause une multiplication des chemins d'impacts potentiels (MacDonald, 2000; Montoya *et al.*, 2009). L'utilisation d'approches expérimentales pour l'étude des impacts cumulés est ainsi limitée à cause du nombre de stressers et de leurs interactions potentielles. Les études expérimentales s'intéressent alors typiquement à un nombre limité de stressers sur des espèces ou communautés

restreintes (p. ex. McElroy, 2014), limitant les généralisations possibles de ces études. L'approfondissement des fondements théoriques sur les effets de multiples stressers est ainsi indispensable à une compréhension des impacts cumulés sur les écosystèmes (Côté et collab., 2016)

Pour répondre à ces lacunes, nous suggérons l'établissement d'un programme scientifique visant l'acquisition de connaissances théoriques sur les effets de multiples stressers sur les composantes des écosystèmes. À l'instar de plusieurs expériences qui ont révélé le rôle bénéfique d'une biodiversité croissante sur le fonctionnement des écosystèmes (Duffy, 2009), nous suggérons de mettre en place des expérimentations stressers-fonctionnement des écosystèmes (SFE). En variant le nombre de stressers, nous évaluerons la

fréquence et les conditions menant à des effets non linéaires. De plus, puisque des effets non linéaires peuvent être causés par les interactions indirectes au sein des communautés, nous recommandons de porter une attention toute particulière à l'étude des impacts de multiples stressseurs sur la structure des communautés.

Défi 2. Améliorer et faciliter l'applicabilité des méthodes d'évaluation des impacts cumulés

Diverses suppositions de base sont adoptées par les méthodes d'évaluation des impacts cumulés (Halpern et Fujita, 2013), comme l'additivité de l'impact des stressseurs (voir défi 1) et l'utilisation typique des écosystèmes comme échelle d'organisation écologique d'intérêt pour les analyses (Halpern et collab., 2008b; Ban et collab., 2010; Allan et collab., 2013). Les analyses à l'échelle des écosystèmes assument toutefois une réponse identique des composantes des écosystèmes à l'ensemble des stressseurs. Des méthodes considérant ces limitations devraient ainsi être élaborées. Par contre, l'accroissement de la complexité des méthodologies nécessite habituellement une expertise approfondie et une quantité considérable de données, limitant leur applicabilité dans le cadre d'évaluations des impacts cumulés (Krausman et Harris, 2011). Nous suggérons donc le développement d'outils accessibles, nécessitant une quantité de données minimale, et considérant la complexité des composantes structurant les écosystèmes. Par exemple, diverses approches prédictives, comme les modèles de répartition d'espèces (p. ex. Phillips et collab., 2006) et les modèles de structure des communautés (p. ex. Gravel et collab., 2013; Albouy et collab., 2014), permettent de caractériser la structure complexe des écosystèmes aisément à partir d'une quantité restreinte de données. Utilisés en combinaison avec une cartographie des stressseurs du Saint-Laurent, ces derniers pourraient améliorer et faciliter les processus d'évaluation d'impacts environnementaux.

Défi 3. Identifier des indicateurs d'impacts cumulés pour le Saint-Laurent

L'utilisation d'indicateurs permet de prioriser et d'optimiser les efforts déployés en identifiant des éléments qui capturent une part importante des changements observés ou anticipés dans un milieu d'intérêt (Pereira et collab., 2013). De plus, les indicateurs appuient le développement de protocoles standardisés permettant des comparaisons à l'échelle régionale à partir de données récoltées localement (Pereira et collab., 2013). Nous suggérons donc d'identifier des indicateurs permettant de capturer convenablement les impacts cumulés dans le Saint-Laurent. Des indicateurs environnementaux standardisés provenant d'une initiative internationale récente qui identifie des variables essentielles de biodiversité (VEB) pourraient guider cette initiative (p. ex. répartition et abondance des espèces, diversité taxonomique et structure des habitats; Pereira et collab., 2013). Nous suggérons également de démarrer une initiative similaire visant l'identification de variables essentielles

de stressseurs (VES) afin d'identifier et de standardiser des variables caractérisant les stressseurs environnementaux d'origine anthropique et naturelle dans le Saint-Laurent. Finalement, nous suggérons de poursuivre les travaux dans le domaine de l'identification de signaux précurseurs de changements qui permettent de définir et de détecter des signaux révélateurs de transitions écologiques (p. ex. augmentation de la variabilité et de l'autocorrélation dans un système; Boettiger et collab., 2013). L'identification et le suivi de ce type d'indicateurs permettraient d'anticiper des changements environnementaux majeurs au sein du Saint-Laurent en vue d'opérer dans un mode de gestion de risques environnementaux proactif.

Défi 4. Créer un protocole de suivi environnemental et humain et une plateforme de partage d'informations

Un défi de gestion devrait viser à accroître l'accessibilité et la disponibilité de données caractérisant la structure des écosystèmes et les activités humaines, ce qui représente un enjeu majeur pour permettre une évaluation intégrative de l'état du Saint-Laurent. Nous suggérons ainsi l'établissement d'un protocole de suivi environnemental et humain dédié à l'évaluation systémique de l'état des écosystèmes et de l'intensité des activités humaines dans l'EGSL. Ce protocole devrait impérativement valoriser des suivis existants (p. ex. pêches plurispécifiques de Pêches et Océans Canada; MPO, 2015), qui pourraient permettre une évaluation de base des impacts cumulés dans le Saint-Laurent. Certaines de ces données ne sont toutefois pas standardisées à l'échelle du Saint-Laurent et n'ont pas pour objectif la planification systémique de l'exploitation des ressources. Un protocole de suivi ayant cet objectif spécifique devrait ainsi être élaboré et devrait viser le suivi périodique des indicateurs éventuellement identifiés par l'atteinte du défi 3 et l'application de méthodes d'évaluation d'impacts cumulés (p. ex. Halpern et collab., 2008b). Des protocoles et programmes internationaux déjà élaborés, comme ceux issus du *Group on Earth Observations Biodiversity Observation Network* (GEO BON; Scholes et collab., 2012) et du *Census of Marine Life* (CoML, 2010) pourraient également guider une telle initiative afin de favoriser sa cohérence avec d'autres projets ailleurs dans le monde.

De plus, ce protocole devrait impérativement viser un partage efficace et une standardisation régionale des données récoltées entre les régions administratives du Saint-Laurent (Québec, Terre-Neuve-et-Labrador, Nouvelle-Écosse, Nouveau-Brunswick et Île-du-Prince-Édouard). Ce protocole devrait valoriser des plateformes actuellement en place, comme l'Observatoire global du Saint-Laurent (OGSL, 2016) et des réseaux comme *Notre Golfe* (Archambault et collab., 2016, dans ce numéro). Un accent tout particulier devrait être donné par tous les acteurs académiques, gouvernementaux et privés à l'accès libre aux données, un élément qui encouragerait l'application d'une démarche scientifique rigoureuse et transparente telle qu'appliquée dans un système de révision par les pairs.

Défi 5. Développer une capacité de gestion adaptative pour le Saint-Laurent

Les défis identifiés visent essentiellement l'élaboration d'approches diagnostiques permettant l'évaluation des impacts cumulés. Ces dernières sont nécessaires afin d'assurer une gestion efficace d'un milieu d'intérêt. Par contre, tous les stressors ne peuvent être gérés similairement ou avec autant de succès, et certains imposent des changements qui sont inévitables, comme les changements climatiques. Les outils de gestion adoptés doivent ainsi avoir la capacité d'intégrer les particularités inhérentes à l'ensemble des stressors considérés conjointement. De plus, les outils diagnostiques proposés ne seront vraisemblablement pas développés à court terme. Dans l'intérim, il importe alors d'employer des mesures de gestion robustes face à l'incertitude associée aux effets de multiples stressors sur les milieux naturels (Côté et collab., 2016). Nous suggérons ainsi de développer une capacité de gestion adaptative conséquente à une approche de gestion écosystémique (p. ex. Rice et Rochet, 2005) permettant de considérer les bouleversements inévitables et l'incertitude associée à ces derniers en vue d'assurer le maintien de la structure et du fonctionnement des écosystèmes du Saint-Laurent.

Conclusion

L'intensification imminente des activités humaines dans le Saint-Laurent met en évidence la nécessité d'adopter une approche de planification systémique de l'exploitation de ses ressources naturelles. Toutefois, l'état des connaissances sur les pressions exercées sur le Saint-Laurent nous permet d'obtenir qu'une compréhension imparfaite des impacts cumulés. À long terme, il nous apparaît ainsi impératif de viser l'amélioration de nos connaissances sur les effets de multiples stressors sur la structure et le fonctionnement des écosystèmes, le développement de méthodologies robustes et accessibles d'évaluation d'impacts cumulés, l'identification d'indicateurs régionaux standardisés capturant convenablement les impacts cumulés et de consolider le tout au sein d'un protocole d'acquisition, de suivi et de partage des données visant la planification systémique de l'exploitation des ressources naturelles. Finalement, une approche de gestion adaptative permettrait de tester et d'employer, à court terme, des mesures de gestion robustes face à l'incertitude associée aux effets de multiples stressors sur les écosystèmes du Saint-Laurent. La planification systémique de l'utilisation des ressources naturelles au sein du Saint-Laurent requiert une vision intégrative des écosystèmes et des vecteurs de stress qui leur sont imposés. Une telle approche ne sera réalisable que lorsque nous aurons développé ces infrastructures et ces outils, nécessaires à une gestion écosystémique du Saint-Laurent.

Remerciements

Nous remercions le Fonds de recherche québécois nature et technologie (FRQNT) et le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) pour

l'aide financière. Ce projet est soutenu par Québec-Océan, le réseau *Notre Golfe*, le Centre de la Science de la Biodiversité du Québec (CSBQ) et le réseau CHONeII. ◀

Références

- ADAMS, S.M., 2005. Assessing cause and effect of multiple stressors on marine systems. *Marine Pollution Bulletin*, 51 : 649-657. doi:10.1016/j.marpolbul.2004.11.040.
- ALBOUY, C., L. VELEZ, M. COLL, F. COLLOCA, F. LE LOC'H, D. MOUILLOT et D. GRAVEL, 2014. From projected species distribution to food-web structure under climate change. *Global Change Biology*, 20 : 730-741. doi:10.1111/gcb.12467.
- ALLAN, J.D., P.B. MCINTYRE, S.D.P. SMITH, B.S. HALPERN, G.L. BOYER, A. BUCHSBAUM, G.A. BURTON, L.M. CAMPBELL, W.L. CHADDERTON, J.J.H. CIBOROWSKI, P.J. DORAN, T. EDER, D.M. INFANTE, L.B. JOHNSON, C.A. JOSEPH, A.L. MARINO, A. PRUSEVICH, J.G. READ, J.B. ROSE, E.S. RUTHERFORD, S.P. SOWA et A.D. STEINMAN, 2013. Joint analysis of stressors and ecosystem services to enhance restoration effectiveness. *Proceedings National Academy of Sciences*, 110 : 372-377. doi:10.1073/pnas.1213841110.
- ARCHAMBAULT, P., C. GRANT, R. AUDET, B. BADER, D. BOURGAULT, M. CUSSON, S. DOYON, D. DUMONT, S. LAMALLE, M. LEVASSEUR, É. MORIN, É. PELLETIER, I. SCHLOSS, G. ST-ONGE, G. THERRIAL, H. TREMBLAY, J.-É. TREMBLAY, R. TREMBLAY et S. PLANTE, 2016. *Notre Golfe* : l'émergence d'un réseau intersectoriel pour l'étude de l'environnement socioécologique du golfe du Saint-Laurent. *Le Naturaliste canadien*, 140 (2) : 41-44.
- BAN, N. et J. ALDER, 2008. How wild is the ocean? Assessing the intensity of anthropogenic marine activities in British Columbia, Canada. *Aquatic Conservation Marine and Freshwater Ecosystems*, 18 : 55-85. doi:10.1002/aqc.816.
- BAN, N., H.M. ALIDINA et J.A. ARDRON, 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 : 876-886. doi:10.1016/j.marpol.2010.01.010.
- BENOÎT, H.P., J.A. GAGNÉ, C. SAVENKOFF, P. OUELLET et M.-N. BOURASSA, 2012. Rapport sur l'état des océans pour la zone de gestion intégrée du golfe du Saint-Laurent (GIGSL). Rapport manuscrit canadien des sciences halieutiques et aquatiques 2986, 79 p.
- BOETTIGER, C., N. ROSS et A. HASTINGS, 2013. Early warning signals: The charted and uncharted territories. *Theoretical Ecology*, 6 : 255-264.
- BOONSTRA, W.J., K.M. OTTOSEN, A.S.A. FERREIRA, A. RICHTER, L.A. ROGERS, M.W. PEDERSEN, A. KOKKALIS, H. BARDARSON, S. BONANOMI, W. BUTLER, F.K. DIEKERT, N. FOUZAI, M. HOLMA, R.E. HOLT, K.Ø. KVILE, E. MALANSKI, J.I. MACDONALD, E. NIEMINEN, G. ROMAGNONI, M. SNICKARS, B. WEIGEL, P. WOODS, J. YLEYINEN et J.D. WHITTINGTON, 2015. What are the major global threats and impacts in marine environments? Investigating the contours of a shared perception among marine scientists from the bottom-up. *Marine Policy*, 60 : 197-201. doi:10.1016/j.marpol.2015.06.007.
- BOUSQUET, N., E. CHASSOT, D.E. DUPLISEA et M.O. HAMMILL, 2014. Forecasting the major influences of predation and environment on cod recovery in the northern Gulf of St. Lawrence. *PLoS ONE* 9, e82836. doi:10.1371/journal.pone.0082836.
- BUNDY, A. et L.P. FANNING, 2005. Can Atlantic cod (*Gadus morhua*) recover? Exploring trophic explanations for the non-recovery of the cod stock on the eastern Scotian Shelf. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 62 : 1474-1489. doi:10.1139/f05-086.
- BURNS, T.P., K.A. ROSE et A.L. BRENKERT, 2014. Quantifying direct and indirect effects of perturbations using model ecosystems. *Ecological Modelling*, 293 : 69-80. doi:10.1016/j.ecolmodel.2013.12.017.
- CAMPAGNA, S., J. LAMBERT et P. ARCHAMBAULT, 2005. Abondance et distribution du concombre de mer (*Cucumaria frondosa*) et prises accidentelles obtenues par dragage entre Matane et Cap-Gaspé (Québec) en 2004. Rapport technique canadien des sciences halieutiques et aquatiques 2620, ix + 61 p.

- COML, 2010. Census of marine life, a decade of discovery. Disponible en ligne à : <http://www.coml.org>. [Visité le 16-04-08].
- CCA, 2012. 40 priority research questions for ocean science in Canada. Council of Canadian Academies (CCA), The Core Group on Ocean Science in Canada, Ottawa, ii + 22 p.
- CLYNICK, B.G., C.W. MCKINDSEY et P. ARCHAMBAULT, 2008. Distribution and productivity of fish and macroinvertebrates in mussel aquaculture sites in the Magdalen islands (Québec, Canada). *Aquaculture*, 283 : 203-210.
- CÔTÉ, I.M., E.S. DARLING et C.J. BROWN, 2016. Interactions among ecosystem stressors and their importance in conservation. *Proceedings of the Royal Society B*, 283 : 20152592. doi:10.1098/rspb.2015.2592.
- CRAIN, C.M., K. KROEKER et B.S. HALPERN, 2008. Interactive and cumulative effects of multiple human stressors in marine systems. *Ecology Letters*, 11 : 1304-1315. doi:10.1111/j.1461-0248.2008.01253.x.
- CROWDER, L. et E. NORSE, 2008. Essential ecological insights for marine ecosystem-based management and marine spatial planning. *Marine Policy*, 32 : 772-778. doi:10.1016/j.marpol.2008.03.012.
- D'AMOURS, O., P. ARCHAMBAULT, C.W. MCKINDSEY et L.E. JOHNSON, 2008. Local enhancement of epibenthic macrofauna by aquaculture activities. *Marine Ecology Progress Series*, 371 : 73-84.
- DARLING, E.S. et I.M. CÔTÉ, 2008. Quantifying the evidence for ecological synergies. *Ecology Letters*, 11 : 1278-1286. doi:10.1111/j.1461-0248.2008.01243.x.
- DEYOUNG, B., M. BARANGE, G. BEAUGRAND, R. HARRIS, R.I. PERRY, M. SCHEFFER et F. WERNER, 2008. Regime shifts in marine ecosystems: Detection, prediction and management. *Trends in Ecology and Evolution*, 23 : 402-409. doi:10.1016/j.tree.2008.03.008.
- DROUIN, A., P. ARCHAMBAULT, B. CLYNICK, K. RICHER et C.W. MCKINDSEY, 2015. Influence of mussel aquaculture on the distribution of vagile benthic macrofauna in Îles de la Madeleine, eastern Canada. *Aquaculture Environment Interactions*, 6 : 175-183.
- DUARTE, C.M., 2014. Global change and the future ocean: A grand challenge for marine sciences. *Frontiers in Marine Science*, 1 : 63. doi:10.3389/fmars.2014.00063.
- DUBÉ, M., B. JOHNSON, G. DUNN, J. CULP, K. CASH, K. MUNKITTRICK, I. WONG, K. HEDLEY, W. BOOTY, D. LAM, O. RESLER et A. STOREY, 2006. Development of a new approach to cumulative effects assessment: A northern river ecosystem example. *Environmental Monitoring and Assessment*, 113 : 87-115. doi:10.1007/s10661-005-9098-0.
- DUFFY, J.E., 2009. Why biodiversity is important to the functioning of real-world ecosystems. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7 : 437-444. doi:10.1890/070195.
- DUFOR, R. et P. OUELLET, 2007. Rapport d'aperçu et d'évaluation de l'écosystème marin de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent. Rapport technique canadien des sciences halieutiques et aquatiques 2744F, vii + 123 p.
- DUINKER, P.N. et L.A. GREIG, 2006. The impotence of cumulative effects assessment in Canada: Ailments and ideas for redeployment. *Journal of Environmental Management*, 37 : 153-161. doi:10.1007/s00267-004-0240-5.
- DUNNE, J.A., R.J. WILLIAMS et N.D. MARTINEZ, 2002. Network structure and biodiversity loss in food webs: Robustness increases with connectance. *Ecology Letters*, 5 : 558-567. doi:10.1046/j.1461-0248.2002.00354.x.
- DUTIL, J.D., S. PROULX, P.M. CHOUINARD et D. BORCARD, 2011. A hierarchical classification of the seabed based on physiographic and oceanographic features in the St. Lawrence. Rapport technique canadien des sciences halieutiques et aquatiques 3009, vii + 72 p.
- ESTES, J.A., J. TERBORGH, J.S. BRASHARES, M.E. POWER, J. BERGER, W.J. BOND, S.R. CARPENTER, T.E. ESSINGTON, R.D. HOLT, J.B.C. JACKSON, R.J. MARQUIS, L. OKSANEN, T. OKSANEN, R.T. PAINE, E.K. PIKITCH, W.J. RIPPLE, S.A. SANDIN, M. SCHEFFER, T.W. SCHOENER, J.B. SHURIN, A.R.E. SINCLAIR, M.E. SOULÉ, R. VIRTANEN et D.A. WARDLE, 2011. Trophic downgrading of planet Earth. *Science*, 333 : 301-306. doi:10.1126/science.1205106.
- FRANK, K.T., B. PETRIE, J.S. CHOI et W.C. LEGGETT, 2005. Trophic cascades in a formerly cod-dominated ecosystem. *Science*, 308 : 1621-1623. doi:10.1126/science.1113075.
- GALBRAITH, P.S., P. Larouche, J. CHASSÉ et B. PETRIE, 2012. Sea-surface temperature in relation to air temperature in the Gulf of St. Lawrence: Interdecadal variability and long term trends. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 77-80 : 10-20. doi:10.1016/j.dsr2.2012.04.001.
- GILBERT, D., D. CHABOT, P. ARCHAMBAULT, B. RONDEAU et S. HÉBERT, 2007. Appauvrissement en oxygène dans les eaux profondes du Saint-Laurent marin: causes possibles et impacts écologiques. *Le Naturaliste canadien*, 131 (1) : 67-75.
- GOVERNEMENT DU QUÉBEC, 2015. Stratégie maritime, la stratégie maritime à l'horizon 2030, plan d'action 2015-2020. Gouvernement du Québec, Québec, vii + 78 p.
- GRAVEL, D., T. POISOT, C. ALBOUY, L. VELEZ et D. MOUILLOT, 2013. Inferring food web structure from predator-prey body size relationships. *Methods in Ecology and Evolution*, 4 : 1083-1090. doi:10.1111/2041-210X.12103.
- HALPERN, B.S. et R. FUJITA, 2013. Assumptions, challenges, and future directions in cumulative impact analysis. *Ecosphere*, 4. doi:10.1890/ES13-00181.1.
- HALPERN, B.S., K.S. SELKOE, F. MICHELI et C.V. KAPPEL, 2007. Evaluating and ranking the vulnerability of global marine ecosystems to anthropogenic threats. *Conservation Biology*, 21 : 1301-1315. doi:10.1111/j.1523-1739.2007.00752.x.
- HALPERN, B.S., K.L. MCLEOD, A.A. ROSENBERG et L.B. CROWDER, 2008a. Managing for cumulative impacts in ecosystem-based management through ocean zoning. *Ocean and Coastal Management*, 51 : 203-211. doi:10.1016/j.ocecoaman.2007.08.002.
- HALPERN, B.S., S. WALBRIDGE, K.A. SELKOE, C.V. KAPPEL, F. MICHELI, C. D'AGROSA, J.F. BRUNO, K.S. CASEY, C. EBERT, H.E. FOX, R. FUJITA, D. HEINEMANN, H.S. LENIHAN, E.M.P. MADIN, M.T. PERRY, E.R. SELIG, M. SPALDING, R. STENECK et R. WATSON, 2008b. A global map of human impact on marine ecosystems. *Science*, 319 : 948-952. doi:10.1126/science.1149345.
- HALPERN, B.S., C.V. KAPPEL, K.A. SELKOE, F. MICHELI, C.M. EBERT, C. KONTGIS, C.M. CRAIN, R.G. MARTONE, C. SHEARER et S.J. TECK, 2009. Mapping cumulative human impacts to California Current marine ecosystems. *Conservation Letters*, 2 : 138-148. doi:10.1111/j.1755-263X.2009.00058.x.
- HALPERN, B.S., M. FRAZIER, J. POTAPENKO, K.S. CASEY, K. KOENIG, C. LONGO, J.S. LOWNDES, R.C. ROCKWOOD, E.R. SELIG, K.A. SELKOE et S. WALBRIDGE, 2015. Spatial and temporal changes in cumulative human impacts on the world's ocean. *Nature Communications*, 6 : 7615. doi:10.1038/ncomms8615.
- HEGMANN, G., C. COCKLIN, R. CREASEY, S. DUPUIS, A. KENNEDY, L. KINGSLEY, W. ROSS, H. SPALING et D. STALKER, 1999. Cumulative effects assessment practitioner's guide. Préparé par AXYS Environmental Consulting Ltd. et le CEA Working Group for the Canadian Environmental Assessment Agency, Hull, 134 p.
- JACKSON, J.B.C., M.X. KIRBY, W.H. BERGER, K.A. BJORNDAAL, L.W. BOTSFORD, B.J. BOURQUE, R.H. BRADBURY, R. COOKE, J. ERLANDSON, J.A. ESTES, T.P. HUGHES, S. KIDWELL, C.B. LANGE, H.S. LENIHAN, J.M. PANDOLFI, C.H. PETERSON, R.S. STENECK, M.J. TEGNER et R.R. WARNER, 2001. Historical overfishing and the recent collapse of coastal ecosystems. *Science*, 293 : 629-637. doi:10.1126/science.1059199.
- KAPPEL, C.V., B.S. HALPERN, K.A. SELKOE et R.M. COOKE, 2012. Eliciting expert knowledge of ecosystem vulnerability to human stressors to support comprehensive ocean management. Dans : PERERA, A.H., C.A. DREW et C.J. JOHNSON (édit.). *Expert knowledge and its application in landscape ecology*. Springer, New York, p. 253-277.
- KENNETT, S.A., 1999. Towards a new paradigm for cumulative effects management. *Canadian Institute of Resources Law Occasional Paper #8*, Calgary, xii + 58 p.

- KORPINEN, S., M. MEIDINGER et M. LAAMANEN, 2013. Cumulative impacts on seabed habitats: An indicator for assessments of good environmental status. *Marine Pollution Bulletin*, 74: 311-319. doi:10.1016/j.marpolbul.2013.06.036.
- KRAUSMAN, P.R. et L.K. HARRIS, 2011. Cumulative effects in wildlife management: Impact mitigation, 1^{re} édition. CRC Press, Boca Raton, xiv + 262 p.
- LESAGE, V., C. BARRETTE, M.C. KINGSLEY et B. SJARE, 1999. The effect of vessel noise on the vocal behavior of belugas in the St. Lawrence River estuary, Canada. *Marine Mammal Science*, 15: 65-84. doi:10.1111/j.1748-7692.1999.tb00782.x.
- LOI CANADIENNE SUR L'ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE, 1992. L.C. 1992, c 37, art. 16(1)(a).
- MACDONALD, L.H., 2000. Evaluating and managing cumulative effects: Process and constraints. *Journal of Environmental Management*, 26: 299-315. doi:10.1007/s002670010088.
- MARGULES, C.R. et R.L. PRESSEY, 2000. Systematic conservation planning. *Nature*, 405: 243-253. doi:10.1038/35012251.
- MCELROY, D.J., 2014. Temporal contingencies associated with multiple anthropogenic disturbances in shallow marine assemblages. Thèse de doctorat, Université de Sydney, Sydney, 189 p.
- MICHELI, F., B.S. HALPERN, S. WALBRIDGE, S. CIRIACO, F. FERRETTI, S. FRASCHETTI, R. LEWISON, L. NYKJAER et A.A. ROSENBERG, 2013. Cumulative human impacts on Mediterranean and Black Sea marine ecosystems: Assessing current pressures and opportunities. *PLoS ONE*, 8: e79889. doi:10.1371/journal.pone.0079889.
- MONTOYA, J., G. WOODWARD, M.C. EMMERSON et R.V. SOLÉ, 2009. Press perturbations and indirect effects in real food webs. *Ecology*, 90: 2426-2433. doi:10.1890/08-0657.1.
- MORITZ, C., M. LÉVESQUE, D. GRAVEL, S. VAZ, D. ARCHAMBAULT et P. ARCHAMBAULT, 2013. Modelling spatial distribution of epibenthic communities in the Gulf of St. Lawrence (Canada). *Journal of Sea Research*, 78: 75-84. doi:10.1016/j.seares.2012.10.009.
- MORITZ, C., D. GRAVEL, L. SAVARD, C.W. MCKINDSEY, J.-C. BRÉTHES et P. ARCHAMBAULT, 2015. No more detectable fishing effect on Northern Gulf of St Lawrence benthic invertebrates. *ICES Journal of Marine Science*, 72: 2457-2466. doi:10.1093/icesjms/fsv124.
- MPO, 2007. Zones d'importance écologique et biologique (ZIEB) de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent: identification et caractérisation. Secrétariat canadien de consultation scientifique du MPO, Avis scientifique 2007/016, Ottawa, 15 p.
- MPO, 2013a. Plan de gestion intégrée du golfe du Saint-Laurent. Pêches et Océans Canada (MPO). MPO/2013-1898, Ottawa, vi + 32 p.
- MPO, 2013b. Examen scientifique du programme de forage d'exploration de la zone prometteuse de Old Harry. Secrétariat canadien de consultation scientifique – réponse des sciences 2013/014, Ottawa, 59 p.
- MPO, 2015. Données du relevé plurispécifique au chalut de fond de septembre de la région du Golfe. Pêches et Océans Canada, Ottawa.
- MUCCI, A., M. STARR, D. GILBERT et B. SUNDBY, 2011. Acidification of lower St. Lawrence estuary bottom waters. *Atmosphere-Ocean*, 49: 206-218. doi:10.1080/07055900.2011.599265.
- MYERS, R.A. et B. WORM, 2003. Rapid worldwide depletion of predatory fish communities. *Nature*, 423: 280. doi:10.1038/nature01610.
- OGSL, 2016. Observatoire global du Saint-Laurent. Disponible en ligne à: <http://www.ogsl.ca>. [Visité le 16-04-08]
- O'GORMAN, E.J. et M.C. EMMERSON, 2009. Perturbations to trophic interactions and the stability of complex food webs. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106: 13393-13398. doi:10.1073/pnas.0903682106.
- PEREIRA, H.M., S. FERRIER, M. WALTERS, G.N. GELLER, R.H.G. JONGMAN, R.J. SCHOLLES, M.W. BRUFORD, N. BRUMMITT, S.H.N. BUTCHART et A.C. CARDOSO, 2013. Essential biodiversity variables. *Science*, 339: 277-278. doi:10.1126/science.1229931.
- PETERSON, E.B., Y.H. CHAN, N.M. PETERSON, G.A. CONSTABLE, R.B. CATON, C.S. DAVIS, R.R. WALLACE et G.A. YARRANTON, 1987. Cumulative effects assessment in Canada: An agenda for action and research. Canadian Environmental Assessment Research Council, Hull, 63 p.
- PHILLIPS, S.J., R.P. ANDERSON et R.E. SCHAPIRE, 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190: 231-259. doi:10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026.
- PÖRTNER, H.O., M. LANGENBUCH et B. MICHAELIDIS, 2005. Synergistic effects of temperature extremes, hypoxia, and increases in CO₂ on marine animals: From Earth history to global change. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 110: C09S10. doi:10.1029/2004JC002561.
- RICE, J.C. et M.-J. ROCHET, 2005. A framework for selecting a suite of indicators for fisheries management. *ICES Journal of Marine Science*, 62: 516-527. doi:10.1016/j.icesjms.2005.01.003.
- RUDD, M.A., 2014. Scientists' perspectives on global ocean research priorities. *Marine Affairs and Policy*, 1, 36. doi:10.3389/fmars.2014.00036.
- SCHOLLES, R.J., M. WALTERS, E. TURAK, H. SAARENMAA, C.H. HEIP, É.Ó. TUAMA, D.P. FAITH, H.A. MOONEY, S. FERRIER, R.H. JONGMAN, I.J. HARRISON, T. YAHARA, H.M. PEREIRA, A. LARIGAUDERIE et G. GELLER, 2012. Building a global observing system for biodiversity. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, Open issue 4, 139-146. doi:10.1016/j.cosust.2011.12.005.
- SELKOE, K.A., B.S. HALPERN, C.M. EBERT, E.C. FRANKLIN, E.R. SELIG, K.S. CASEY, J. BRUNO et R.J. TOONEN, 2009. A map of human impacts to a "pristine" coral reef ecosystem, the Papahānaumokuākea Marine National Monument. *Coral Reefs*, 28: 635-650. doi:10.1007/s00338-009-0490-z.
- STEFFEN, W., P.J. CRUTZEN et J.R. MCNEILL, 2007. The Anthropocene: Are humans now overwhelming the great forces of nature. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 36: 614-621. doi:10.1579/0044-7447(2007)36[614:TAAHNO]2.0.CO;2.
- THERIVEL, R. et B. ROSS, 2007. Cumulative effects assessment: Does scale matter? *Environmental Impact Assessment Review*, 27: 365-385. doi:10.1016/j.eiar.2007.02.001.
- VINEBROOKE, R.D., K.L. COTTINGHAM, J. NORBERG, M. SCHEFFER, S.I. DODSON, S.C. MABERLY et U. SOMMER, 2004. Impacts of multiple stressors on biodiversity and ecosystem functioning: The role of species co-tolerance. *Oikos*, 104: 451-457. doi:10.1111/j.0030-1299.2004.13255.x.
- VÖRÖSMARTY, C.J., P.B. MCINTYRE, M.O. GESSNER, D. DUDGEON, A. PRUSEVICH, P. GREEN, S. GLIDDEN, S.E. BUNN, C.A. SULLIVAN, C.R. LIERMANN et P.M. DAVIES, 2010. Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, 467: 555-561. doi:10.1038/nature09440.
- WORM, B., H.K. LOTZE, H. HILLEBRAND et U. SOMMER, 2002. Consumer versus resource control of species diversity and ecosystem functioning. *Nature*, 417: 848. doi:10.1038/nature00830.
- WORM, B., E.B. BARBIER, N. BEAUMONT, J.E. DUFFY, C. FOLKE, B.S. HALPERN, J.B.C. JACKSON, H.K. LOTZE, F. MICHELI, S.R. PALUMBI, E. SALA, K.A. SELKOE, J.J. STACHOWICZ et R. WATSON, 2006. Impacts of biodiversity loss on ocean ecosystem services. *Science*, 314: 787-790. doi:10.1126/science.1132294.
- YODZIS, P., 2000. Diffuse effects in food webs. *Ecology*, 81: 261-266. doi:10.1890/0012-9658(2000)081[0261:DEIFW]2.0.CO;2.