

Le système d'identification automatique (AIS), un outil pour la gestion d'aires marines protégées : revue des applications au parc marin du Saguenay–Saint-Laurent

Samuel Turgeon, Cristiane C. A. Martins, Clément Chion et Nadia Ménard

Volume 142, numéro 2, été 2018

20^e anniversaire du parc marin du Saguenay–Saint-Laurent : recherche, conservation et mise en valeur

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/1047154ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/1047154ar>

[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

Turgeon, S., Martins, C. C. A., Chion, C. & Ménard, N. (2018). Le système d'identification automatique (AIS), un outil pour la gestion d'aires marines protégées : revue des applications au parc marin du Saguenay–Saint-Laurent. *Le Naturaliste canadien*, 142(2), 127–139. <https://doi.org/10.7202/1047154ar>

Résumé de l'article

Les diverses conséquences des activités de navigation sur le milieu marin sont maintenant reconnues et de plus en plus documentées, en particulier sur les mammifères marins. Dans les dernières années, les gouvernements se sont engagés à rehausser le niveau de protection du milieu marin, notamment par la création d'aires marines protégées. Le système d'identification automatique (AIS), implémenté à l'origine pour la sécurité maritime et la gestion du trafic, est devenu un outil indispensable pour la gestion des activités de navigation dans un contexte de conservation de l'environnement marin. Afin de présenter différentes applications des données AIS dans la gestion d'une aire marine protégée, nous utilisons comme étude de cas le parc marin du Saguenay–Saint-Laurent, reconnu pour la diversité des espèces de mammifères marins qui le fréquentent et pour l'intensité du trafic maritime. Les exemples portent sur la description de l'utilisation de l'espace maritime par les activités de navigation, sur l'évaluation et la modélisation de leurs effets environnementaux et sur le suivi de la conformité à des mesures de gestion. En plus d'illustrer les différents avantages d'utilisation des données AIS, une revue critique sur les limites de ces données en conservation est également présentée.

Le système d'identification automatique (AIS), un outil pour la gestion d'aires marines protégées : revue des applications au parc marin du Saguenay–Saint-Laurent

Samuel Turgeon, Cristiane C. A. Martins, Clément Chion et Nadia Ménard

Résumé

Les diverses conséquences des activités de navigation sur le milieu marin sont maintenant reconnues et de plus en plus documentées, en particulier sur les mammifères marins. Dans les dernières années, les gouvernements se sont engagés à rehausser le niveau de protection du milieu marin, notamment par la création d'aires marines protégées. Le système d'identification automatique (AIS), implémenté à l'origine pour la sécurité maritime et la gestion du trafic, est devenu un outil indispensable pour la gestion des activités de navigation dans un contexte de conservation de l'environnement marin. Afin de présenter différentes applications des données AIS dans la gestion d'une aire marine protégée, nous utilisons comme étude de cas le parc marin du Saguenay–Saint-Laurent, reconnu pour la diversité des espèces de mammifères marins qui le fréquentent et pour l'intensité du trafic maritime. Les exemples portent sur la description de l'utilisation de l'espace maritime par les activités de navigation, sur l'évaluation et la modélisation de leurs effets environnementaux et sur le suivi de la conformité à des mesures de gestion. En plus d'illustrer les différents avantages d'utilisation des données AIS, une revue critique sur les limites de ces données en conservation est également présentée.

MOTS CLÉS : AIS, aire marine protégée, conservation des mammifères marins, trafic maritime

Abstract

The diverse impacts of shipping activities on the marine environment are now recognized and increasingly documented, particularly with regards to marine mammals. In recent years, governments have committed to enhancing the protection of the marine environment, notably through the creation of marine protected areas. The Automatic Identification System (AIS), originally introduced for maritime safety and traffic control, has become an essential tool for the management of shipping activities for the conservation of marine environments. The present paper uses the Saguenay–St. Lawrence Marine Park (Québec, Canada), recognized for its high diversity of marine mammals and intensive traffic, to highlight the different potential uses of AIS data in the management of a marine protected area. Examples presented include describing baseline vessel use of a maritime area, assessing and modelling the environmental impacts of the shipping activities, and monitoring compliance to management measures. The different benefits of using AIS data in a conservation context are illustrated, and their limitations are outlined.

KEYWORDS: AIS, marine mammal conservation, marine protected area, maritime traffic

Introduction

Les écosystèmes marins sont soumis à des pressions anthropiques grandissantes (Halpern et collab., 2015) parmi lesquelles la navigation compte pour une part significative. Les aires marines protégées étant souvent une destination récréotouristique de plaisance et commerciale, elles n'échappent pas à ces pressions. Des connaissances sur les activités de navigation sont essentielles pour la création et la gestion des aires marines protégées (Hoyt, 2011). L'évaluation des risques liés à ces activités sur les écosystèmes ou sur une espèce en particulier nécessite une caractérisation de la structure spatio-temporelle du trafic maritime (Robards et collab., 2016). Ces informations sont essentielles dans la planification de l'espace maritime (*marine spatial planning*) afin d'aider la prise de décision visant à assurer une utilisation durable des écosystèmes marins (Shelmerdine, 2015).

Samuel Turgeon, Cristiane C. A. Martins et Nadia Ménard sont membres de l'équipe de conservation au parc marin du Saguenay–Saint-Laurent pour Parcs Canada.

Samuel Turgeon est cartographe et géographe et s'intéresse à l'analyse spatiale de données scientifiques pour supporter la conservation des écosystèmes marins.

Cristiane C. A. Martins est océanographe et spécialiste sur l'écologie des mammifères marins ainsi que fondatrice et consultante scientifique de Tryphon Océans.

Nadia Ménard est écologiste et s'intéresse particulièrement à l'utilisation des connaissances scientifiques pour la conservation des écosystèmes marins.

Clément Chion est professeur associé au département des Sciences naturelles de l'Université du Québec en Outaouais (UQO) et s'intéresse à la modélisation des interactions entre les activités humaines et les écosystèmes et leurs impacts sur les ressources naturelles.

Correspondance : samuel.turgeon@pc.gc.ca

Les conséquences des activités de navigation sur les écosystèmes marins sont maintenant reconnues et de plus en plus documentées. Elles peuvent être ressenties à l'échelle de l'habitat (p. ex., le bruit sous-marin; Weilgart, 2007), l'introduction d'espèces envahissantes (Bailey, 2015) et des déversements de produits pétroliers (Beyer et collab., 2016) ou à l'échelle des individus (p. ex., le dérangement et les collisions avec les mammifères marins; Laist et collab., 2001; Senigaglia et collab., 2016) et l'introduction de pathogènes (Gollasch et collab., 2015). Les conséquences de la navigation sur les mammifères marins sont l'une des principales menaces au rétablissement de plusieurs populations à l'échelle internationale (Clapham, 2016) et nationale (p. ex., Beauchamp et collab., 2009; MPO, 2012).

Encore récemment, les données sur le trafic maritime étaient plutôt rares ou peu accessibles et souvent résumées par des statistiques globales, ce qui limitait sa compréhension et la mise en place de mesure visant à mitiger ses conséquences (Robards et collab., 2016). Le système d'identification automatique (AIS pour *Automatic Identification System*), implanté à l'origine pour la sécurité maritime et pour la gestion du trafic, est devenu le standard pour le suivi et l'acquisition de données sur le trafic maritime. En science de la conservation, Robards et collab. (2016) décrivent 3 domaines d'application des données AIS: 1) décrire l'utilisation d'un territoire par le trafic maritime; 2) évaluer ou modéliser les impacts environnementaux actuels ou potentiels; 3) effectuer le suivi de la conformité à des mesures de gestion.

Pour atténuer les conséquences des activités anthropiques sur les écosystèmes marins et en vertu des Objectifs d'Aichi pour la biodiversité, dont l'objectif 11 vise une protection de 10 % des zones marines et côtières d'ici 2020 (CDB, 2010), l'établissement d'aires marines protégées est appelé à augmenter au cours des prochaines années à l'échelle mondiale. Parallèlement à cette croissance du réseau d'aires marines protégées, la flotte mondiale de navires est également en augmentation (Frisk, 2012). Au Canada, pays signataire de la Convention sur la diversité biologique, le gouvernement fédéral a pris ces mêmes engagements et une hausse du trafic maritime y est également attendue, notamment avec la Stratégie maritime du Québec (Gouvernement du Québec, 2015).

Dans ce contexte d'engagements envers une protection accrue du milieu marin, de croissance du trafic maritime et d'une reconnaissance grandissante des conséquences de la navigation, notamment sur les mammifères marins, le présent article a pour objectif d'illustrer différentes utilisations de la technologie AIS pour la gestion d'aires marines protégées et la conservation des mammifères marins. Le parc marin du Saguenay–Saint-Laurent, la première aire marine protégée légalement créée au Canada, servira d'étude de cas. Une revue critique sur les limites des données AIS en conservation sera également présentée.

Matériels et méthodes

Aire d'étude

Le parc marin du Saguenay–Saint-Laurent est une aire d'alimentation pour différentes espèces de rorquals (figure 1).

De plus, environ 77 % de la superficie du parc marin fait partie de l'habitat essentiel du béluga du Saint-Laurent (*Delphinapterus leucas*), une espèce en voie de disparition (COSEPAC, 2014; MPO, 2012). Il est également l'un des endroits au Canada où le trafic maritime est le plus dense (Simard et collab., 2014), principalement en saison estivale (Chion et collab., 2009). En plus de la voie maritime du Saint-Laurent qui le traverse, le parc marin supporte une importante industrie d'excursions aux baleines (53 permis émis en 2017 par Parcs Canada). De plus, 3 routes de traversiers traversent le parc, dont une à l'année et deux saisonnières. En saison estivale, le parc marin est également fréquenté par les plaisanciers, et 11 marinas se trouvent à proximité. S'ajoutent à ce volume de trafic, des bateaux de recherche scientifique, des navettes, des écoles de voile, des kayaks et des bateaux de surveillance ou de services. De mai à octobre 2007, le nombre total de transits dans le parc marin avait été estimé à $51\,796 \pm 5\,680$ (Chion et collab., 2009). En raison de ce fort volume, la gestion des activités de navigation et de ses conséquences sur les écosystèmes, principalement sur les mammifères marins, est au cœur de plusieurs mesures de conservation en place au parc marin. Le Règlement sur les activités en mer dans le parc marin du Saguenay–Saint-Laurent encadre ces activités.

Système d'identification automatique (AIS)

L'AIS est un système d'échange continu et automatisé de messages entre navires et stations terrestres par radio VHF (*Very High Frequency*). Ce système a été développé et implanté pour la sécurité maritime (p. ex., pour éviter les collisions entre navires) et pour la gestion du trafic (p. ex., pour les administrations portuaires). L'AIS transmet des messages contenant des données dynamiques (c.-à-d. la position du navire [GPS], sa vitesse sur le fond, sa route, son cap vrai, sa vitesse angulaire de giration), des données statiques (c.-à-d. le numéro d'identité du service mobile maritime du navire [MMSI], le numéro d'enregistrement à l'Organisation Maritime Internationale [OMI], son indicatif d'appel radio, le nom du navire, la classe de navire et ses dimensions) ainsi que des données saisies manuellement par l'opérateur (c.-à-d. l'état de la navigation, la destination, l'heure probable d'arrivée à destination et le tirant d'eau). Selon l'élévation de l'antenne, les messages peuvent être captés jusqu'à environ 20 milles nautiques (37 km) à partir d'un bateau et jusqu'à 60 milles nautiques (111 km) à partir d'une station terrestre.

Au Canada, selon le Règlement sur la sécurité de la navigation, un AIS de classe A est obligatoire sur les navires de 150 tonnes ou plus qui transportent plus de 12 passagers et qui effectuent un voyage international et, à l'exception des bâtiments de pêche, sur les navires de 300 tonnes ou plus qui effectuent un voyage international, de même que sur ceux de 500 tonnes ou plus qui n'effectuent pas de voyage international. Depuis 2006, les AIS de classe B ont été introduits à moindre coût sur le marché (Robards et collab., 2016). Les AIS de classe B sont moins puissants et leur taux d'émission des messages est moins rapide. Selon la vitesse et les changements de

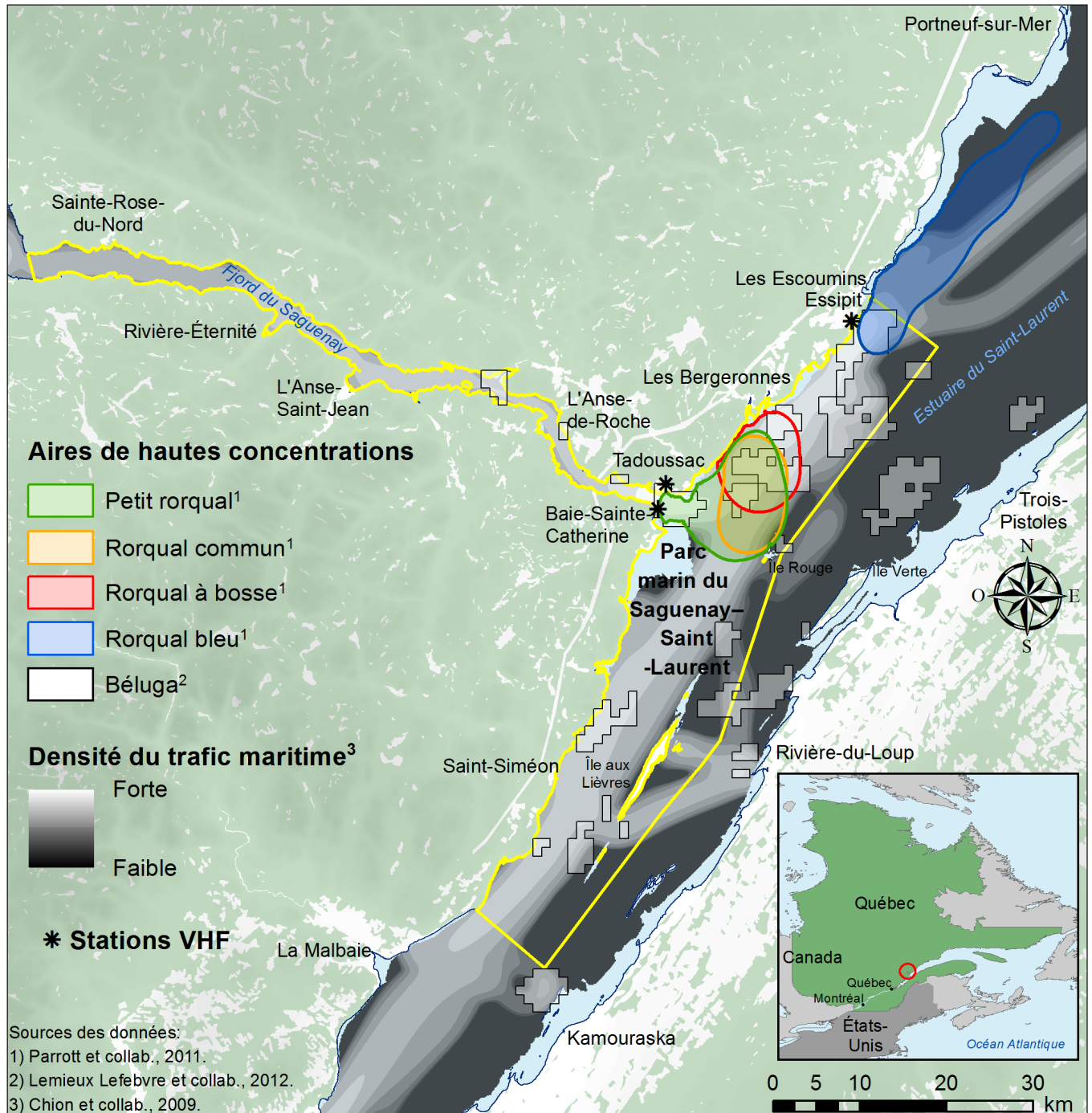


Figure 1. Carte du parc marin du Saguenay–Saint-Laurent, des aires de hautes concentrations des principales espèces de rorquals et du béluga et de la densité du trafic maritime.

cap, le taux de transmission est de 5 à 30 secondes pour les AIS de classe B, par rapport à 2 à 10 secondes pour ceux de classe A.

Équipements des stations terrestres en place au parc marin du Saguenay–Saint-Laurent

Depuis 2011, un réseau de 3 antennes VHF sur des sites terrestres et une station d’archivage ont été installés par Parcs Canada afin de capter et d’enregistrer l’ensemble des messages

AIS transmis sur le territoire du parc marin, à l’exception de la majeure partie du fjord du Saguenay, dont la morphologie rend difficile la communication par ondes VHF (figure 1). Afin de limiter le nombre de données enregistrées, seulement 1 message par minute par navire est archivé. Par exemple, en 2016, plus de 5 400 000 messages AIS provenant de plus de 1200 différents bateaux ont été enregistrés. En moyenne, toujours pour l’année 2016, 14871 ± 5346 (écart-type) messages AIS ont

été enregistrés par jour, pour un maximum de 30 423. En plus d'enregistrer les données conventionnelles des messages AIS, la station d'archivage est équipée d'un module de conversion des vitesses sur le fond (SOG : *speed over ground*) en vitesse sur l'eau (STW : *speed through water*). Ce module, développé par Innovation Maritime inc., utilise un modèle des courants (Saucier et collab., 1997) à une résolution spatiale de 400 m et temporelle de 15 minutes, la vitesse sur le fond et le cap du bateau afin de calculer la vitesse sur l'eau pour chacun des messages AIS reçus. Ce module est requis en raison de la présence, par endroits, de forts courants de marée (jusqu'à 7 nœuds).

Résultats et discussion

Portrait du trafic maritime

L'application la plus courante des données AIS est de faire le portrait du trafic maritime d'une région d'intérêt. Le nombre de transits, la densité du trafic, les différentes routes utilisées et les vitesses, le tout ventilé par composantes du trafic (p. ex., cargos, traversiers), sont des informations que l'on peut extraire des données AIS. Elles ont d'ailleurs été utilisées pour réaliser les premiers atlas du transport maritime au Canada (p. ex., Simard et collab., 2014). En utilisant entre autres les données AIS, Chion et collab. (2009) ont réalisé le premier portrait de la navigation dans le parc marin du Saguenay–Saint-Laurent, pour la période du 1^{er} mai au 31 octobre 2007. L'exercice a permis d'estimer le nombre de transits et de produire des cartes de densités par composante du trafic (voir un exemple à la figure 1).

Dans le processus de création d'une aire marine protégée, un portrait de la navigation de la zone ciblée est essentiel afin de bien comprendre l'utilisation actuelle du territoire, connaître les différents acteurs concernés par sa création et cerner les effets de la navigation pour lesquels des mesures de gestion devront être mises en place. De plus, l'analyse conjointe de l'information sur la densité spatio-temporelle du trafic maritime et des zones avec une importance écologique reconnue permet de déterminer quelles zones sont les plus à risque et de guider la planification de l'espace maritime. Ces informations permettent aussi de cibler des sites de possibilité (*opportunity sites*) où des gains en conservation sont plus facilement réalisables, étant donné que le trafic est moins dense (Ménard et collab., 2018; Williams et collab., 2015). Un suivi constant et des mises à jour régulières du portrait des activités de navigation permettent d'assurer une gestion adaptative et de bien cerner les conséquences sur le milieu marin.

Modélisation du trafic

Les données AIS peuvent également servir à alimenter des modèles afin de supporter la gestion. La modélisation multiagent est utile comme outil d'aide à la décision dans les systèmes socioécologiques (Janssen et Ostrom, 2006). Le système 3MTSim (*Marine Mammals and Maritime Traffic Simulator*) a été conçu pour supporter la gestion des activités de navigation dans la région du parc marin (Parrott et collab., 2011). Il consiste en un modèle simulant les déplacements des

mammifères marins et la navigation dans l'estuaire du Saint-Laurent et le fjord du Saguenay.

Afin de modéliser les déplacements des navires marchands dans le 3MTSim, les données AIS et les données du système INNAV (système d'information sur la navigation maritime) ont été utilisées (Chion, 2011). Les données INNAV contiennent notamment des informations sur les temps de passage à des points d'appel précis et les caractéristiques des navires, et non l'information en continu sur leurs déplacements, comme les données AIS. L'approche de modélisation utilisée pour cette composante du trafic dans le 3MTSim combine une approche statistique pour attribuer les principaux points de passage des navires et un algorithme d'intelligence artificielle pour construire les segments de route évitant les obstacles entre ces points (Chion, 2011). Pour chaque transit de navire instancié dans le 3MTSim, un type de navire, un ensemble de caractéristiques du navire, une séquence de points d'appel constituant un transit selon les données INNAV et une variabilité spatiale autour de ces points d'appel extraite des données AIS, lui sont attribués de manière à reconstituer le portrait de la navigation et tester des scénarios de gestion (Chion, 2011). Le système 3MTSim a été utilisé pour tester différents scénarios de gestion dans les travaux du Groupe de travail sur le transport maritime et la protection des mammifères marins (G2T3M) (Chion et collab., 2012).

Suivi de la conformité à des mesures de gestion

Le G2T3M a été formé en 2011 et regroupe des représentants de l'industrie maritime, du secteur universitaire, du gouvernement et d'organisations non gouvernementales. Son mandat est de trouver des solutions à mettre en œuvre pour réduire les risques causés par le trafic maritime sur les mammifères marins et son premier sujet a été celui des collisions. Des mesures volontaires ont été recommandées de mai à octobre afin de réduire le risque de collision avec les rorquals sans augmenter le niveau d'exposition des bélugas au bruit du transport maritime (Parrott et collab., 2016). Entrées en vigueur en 2013, ces mesures comprennent une aire de ralentissement à 10 nœuds ou moins, une aire à éviter, une aire de vigilance et la recommandation de naviguer dans le chenal au nord de l'île Rouge (figure 2) (Garde côtière canadienne, 2017).

Pour être efficaces et efficientes, des mesures de gestion concernant la navigation, qu'elles soient volontaires ou réglementaires, doivent être accompagnées d'un système de suivi permettant d'évaluer le degré auquel les navires s'y conforment et les adoptent (Whitney et collab., 2016). Les données AIS se sont imposées comme standard afin de suivre l'impact sur la navigation et d'évaluer la conformité à de telles mesures (p. ex., McKenna et collab., 2012; Silber et collab., 2014). Comme l'ensemble des navires concernés par ces mesures volontaires sont obligatoirement équipés d'un AIS, le suivi de la conformité est possible par l'utilisation de ces données. Le tableau 1 liste différentes statistiques pouvant être calculées à partir des données AIS, leurs avantages ainsi que

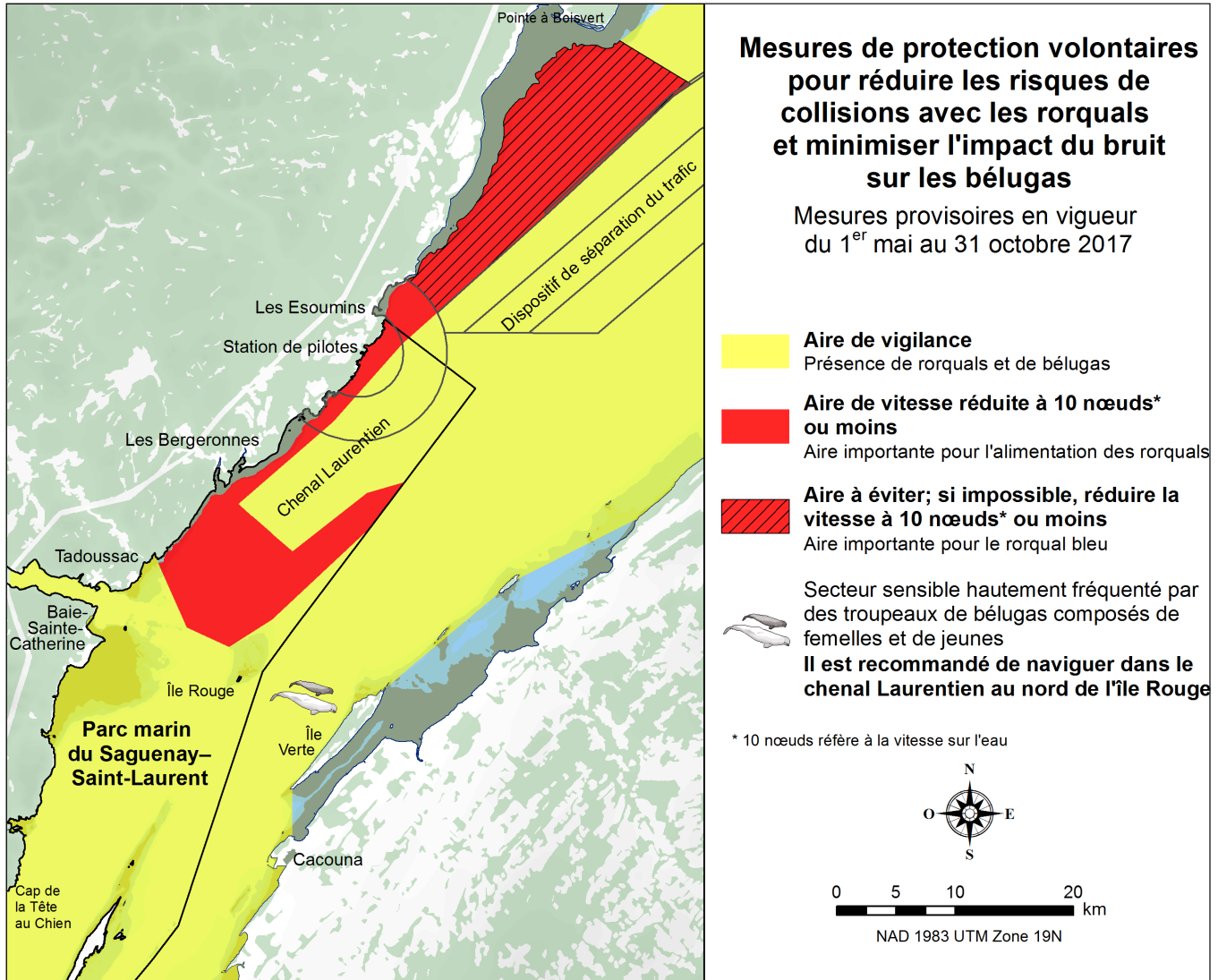


Figure 2. Carte des mesures de protection volontaires pour réduire les risques de collisions avec les rorquals et minimiser l'impact du bruit sur les bélugas, telles qu'elles étaient en vigueur du 1^{er} mai au 31 octobre 2017.

leurs limites pour le suivi de la conformité à des mesures de conservation en lien avec la navigation (adapté de Chion et collab., en révision). La figure 3 illustre les conséquences de la zone de ralentissement à 10 nœuds sur la vitesse moyenne dans la zone et l'effort de ralentissement. On remarque que 19 % des transits avaient une vitesse moyenne de 10 nœuds ou moins dans la zone et que 65 % des transits ont ralenti de plus de 1 nœud pendant la période où la mesure est en vigueur (panneau de gauche). Bien que l'objectif de 10 nœuds ne soit pas atteint pour l'ensemble des transits, les ralentissements observés représentent un gain en conservation puisque le risque de mortalité en cas de collision diminue avec un ralentissement (Vanderlaan et Taggart, 2007).

La Transat Québec-Saint-Malo

À l'été 2016, la Transat Québec-Saint-Malo a eu lieu dans le Saint-Laurent, avec un passage dans le parc marin. Ce genre d'évènement nécessite un permis d'activité spéciale émis

par Parcs Canada en vertu du Règlement sur les activités en mer dans le parc marin. Dans ce cas, des zones à éviter, basées sur les zones de préservation intégrale du plan de zonage du parc marin, et une zone de navigation interdite, basée sur les zones de concentration des grands rorquals, ont été décrites dans les conditions du permis dans le but de réduire les risques de collision avec les mammifères marins (figure 4). De plus, les aires de forte résidence du béluga (Lemieux Lefebvre et collab., 2012) ont été ajoutées aux conditions de permis afin d'être évitées autant que possible.

Le fait que les embarcations effectuant cette activité soient équipées d'un AIS a facilité le suivi de la conformité aux conditions de permis. L'autre possibilité pour assurer le suivi de la conformité aurait été la présence sur l'eau d'agents d'application de la loi, ce qui aurait engendré des coûts importants, nécessité une logistique complexe et ajouté un ou plusieurs bateaux sur l'eau. De plus, la qualité et la quantité

Tableau 1. Liste de différentes statistiques utilisées dans le cadre des analyses de conformité aux mesures de protection volontaires du Groupe de travail sur le transport maritime et les mammifères marins (G2T3M). Un transit est un déplacement d'un navire entre deux ports, alors qu'une route est un corridor de navigation entre une origine et une destination.

Mesures	Statistiques	Définitions	Avantages	Limites
Aire de ralentissement	Vitesse maximale	Donnée AIS avec la vitesse la plus élevée dans l'aire	Simple à calculer et à interpréter	Méthode très stricte et sensible à une valeur extrême
	Vitesse moyenne	Moyenne des vitesses de l'ensemble des données AIS dans l'aire	Simple à calculer et à interpréter et moins stricte que la vitesse maximale	Les vitesses moins élevées sont surreprésentées dans le calcul et biaisent la moyenne
	Vitesse moyenne pondérée par la distance (McKenna et collab., 2012)	Moyenne des vitesses de l'ensemble des données AIS dans l'aire, pondérée par la distance entre chaque position par rapport à distance totale du transit dans l'aire	Moyenne non biaisée et représentative de la vitesse moyenne réelle	Calcul légèrement plus complexe que la moyenne standard
	Pourcentage de la distance parcourue au-dessus de la limite de vitesse (Silber et collab., 2014)	Somme de la distance parcourue dans l'aire à une vitesse supérieure à la limite par rapport à la distance totale du transit dans l'aire	Permet à un transit de contribuer à la conformité globale malgré une non-conformité partielle	Calcul et interprétation des résultats légèrement plus complexes
	Effort de ralentissement (figure 3)	Différence entre la vitesse moyenne avant l'entrée dans l'aire (p. ex., zone tampon de 3 km) et dans l'aire pour chacun des transits	Permet de dégager des gains en conservation (p. ex., diminution du risque de mortalité en cas de collision) même si la vitesse dans l'aire est supérieure à l'objectif établi	Peut porter à confusion lors de la communication des résultats au niveau de l'objectif de la mesure (effort vs cible de vitesse maximale)
Aire à éviter	Pourcentage de transits dans l'aire	Pourcentage de transits naviguant dans l'aire par rapport au nombre de transits sur la même route	Simple à calculer et à interpréter	Méthode stricte (p. ex., si un transit emprunte seulement une petite portion de l'aire et non l'aire au complet)
Route recommandée	Pourcentage de transits selon la route	Pourcentage de transits suivant la route recommandée	Simple à calculer et à interpréter	L'identification de la route utilisée peut être difficile si plusieurs routes se trouvent dans un même secteur

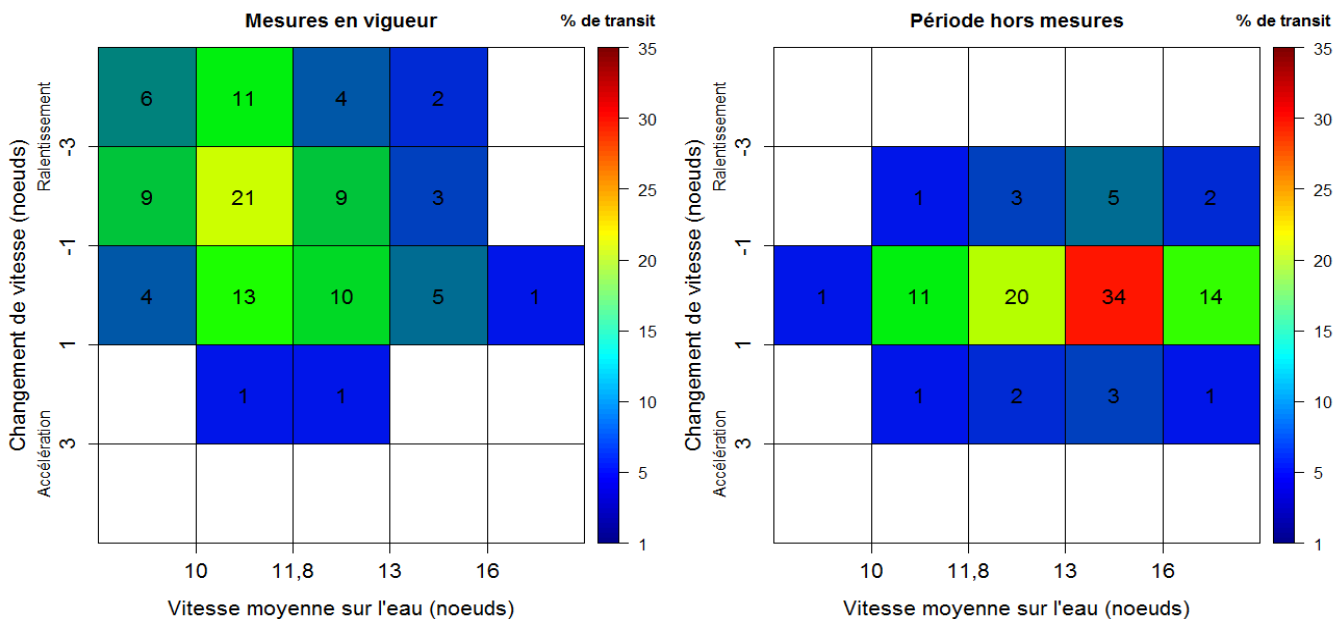


Figure 3. Effets des mesures volontaires sur la réduction de vitesse et effort de ralentissement. Pourcentage de transit selon leur changement de vitesse lors de l'entrée dans la zone de ralentissement et la vitesse moyenne dans celle-ci. Le changement de vitesse correspond à la différence entre la vitesse moyenne dans les 3 km précédant l'entrée dans la zone de ralentissement et la vitesse moyenne dans la zone de ralentissement. Les vitesses sont celles sur l'eau (noeuds).

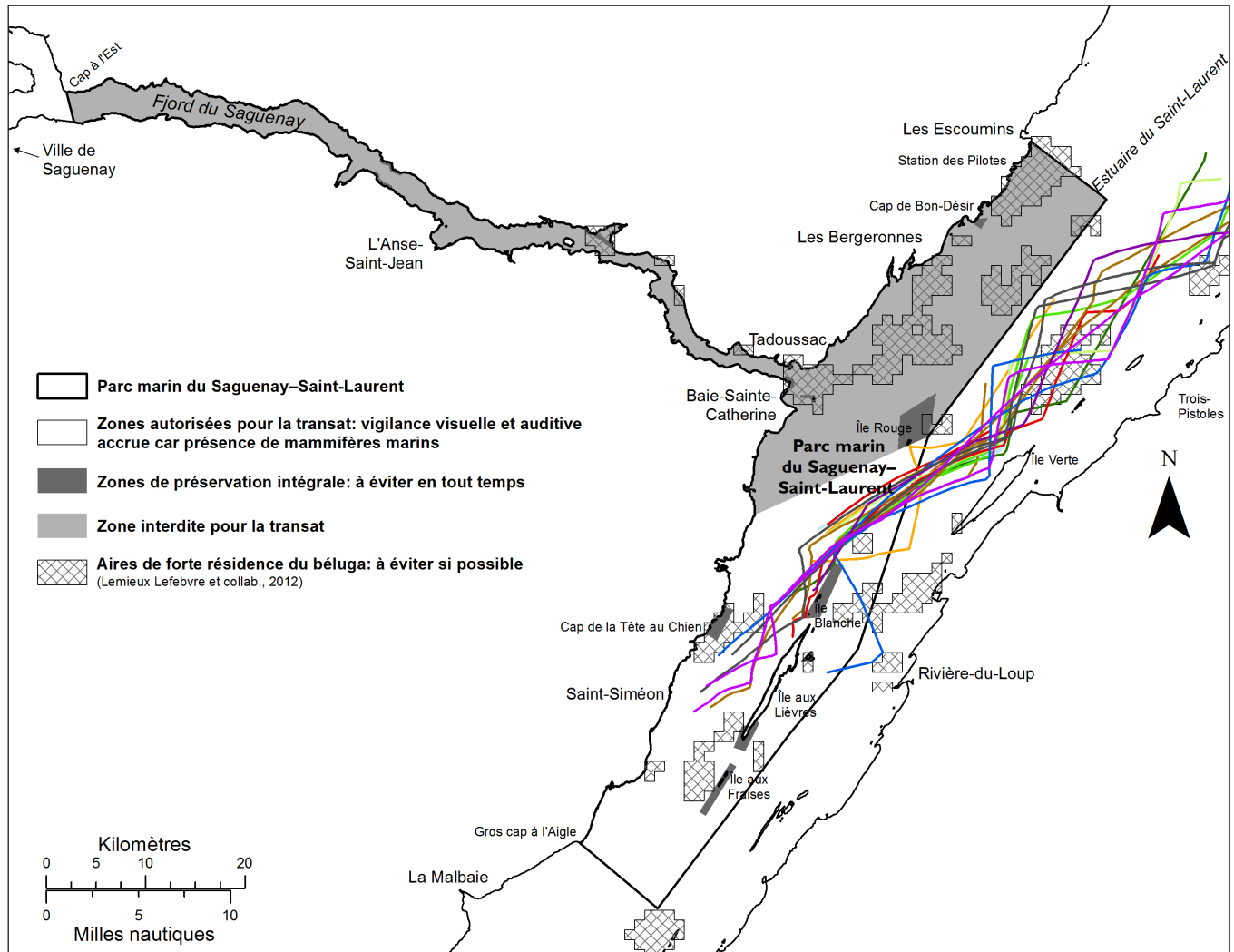


Figure 4. Conditions de permis d’activité spéciale émis par Parcs Canada dans le cadre de la transit Québec–Saint-Malo en 2016 et les trajectoires (traits colorés) suivies par les différents participants.

de données auraient alors été moindres, puisqu’il aurait été impossible pour les agents de couvrir l’ensemble du territoire pour la durée de l’évènement, d’autant plus que les passages avaient lieu de nuit. L’analyse des données AIS a permis de vérifier que l’ensemble des participants ont respecté la zone interdite et les zones à éviter (figure 4). En ce qui a trait aux vitesses, moins de 1 % des données AIS enregistrées avaient une vitesse supérieure à la limite de vitesse fixée dans les limites du parc marin.

Suivi des activités d’observation en mer et des mammifères marins

Portrait des activités d’observation en mer

Depuis 1994, des techniciens embarquent sur différents bateaux d’excursion en mer à partir de différents ports d’attache de la région du parc marin afin de caractériser les activités d’observation en mer (AOM) (p. ex., Martins et collab., 2018). De 1994 à 2017, le nombre de croisières échantillonnées annuellement a été très variable (moyenne = 130, écart-

type = 80, minimum = 25, maximum = 327) et faible par rapport au nombre total de sorties en mer dans la région, estimé à environ 13 000 (Chion et collab., 2009).

À l’été 2011, des AIS ont été installés par Parcs Canada sur 8 bateaux effectuant des activités d’observation en mer dans le parc marin. L’objectif était de démontrer à l’industrie que cette technologie permettrait d’accroître la sécurité sur l’eau, tout en vérifiant son potentiel pour le suivi des activités en mer. Les données AIS permettent de caractériser l’utilisation du territoire, une variable également caractérisée par l’échantillonnage AOM. En utilisant la vitesse de déplacement, il est possible de déterminer, avec certaines limites, l’activité du bateau. Turgeon et Martins (résultats non publiés) ont développé un algorithme permettant de définir l’activité (déplacement ou observation) d’un bateau d’observation en mer en se basant sur sa vitesse afin de l’appliquer aux données AIS (figure 5).

Les données AIS sont enregistrées pour chacune des sorties en mer des bateaux équipés d’un système et ne sont pas limitées par un plan d’échantillonnage et différents coûts. Par

exemple, 176 excursions en mer ont été échantillonnées en 2016 par les techniciens de Parcs Canada et du Réseau d'observation des mammifères marins (ROMM, résultats non publiés), alors que les données AIS nous donnent accès à 1171 excursions. L'analyse des résultats découlant des échantillonnages AOM et AIS a permis de déterminer un biais dans l'analyse de

l'utilisation du territoire. Les cartes de la figure 6 illustrent l'utilisation du territoire selon l'échantillonnage AOM (panneau A) et les données AIS (panneau B) en 2016 pour les petites embarcations de Tadoussac. Le panneau du bas illustre la différence entre les deux cartes (AIS-AOM). Les points 3 et 4 montrent des secteurs surreprésentés par l'échantillonnage

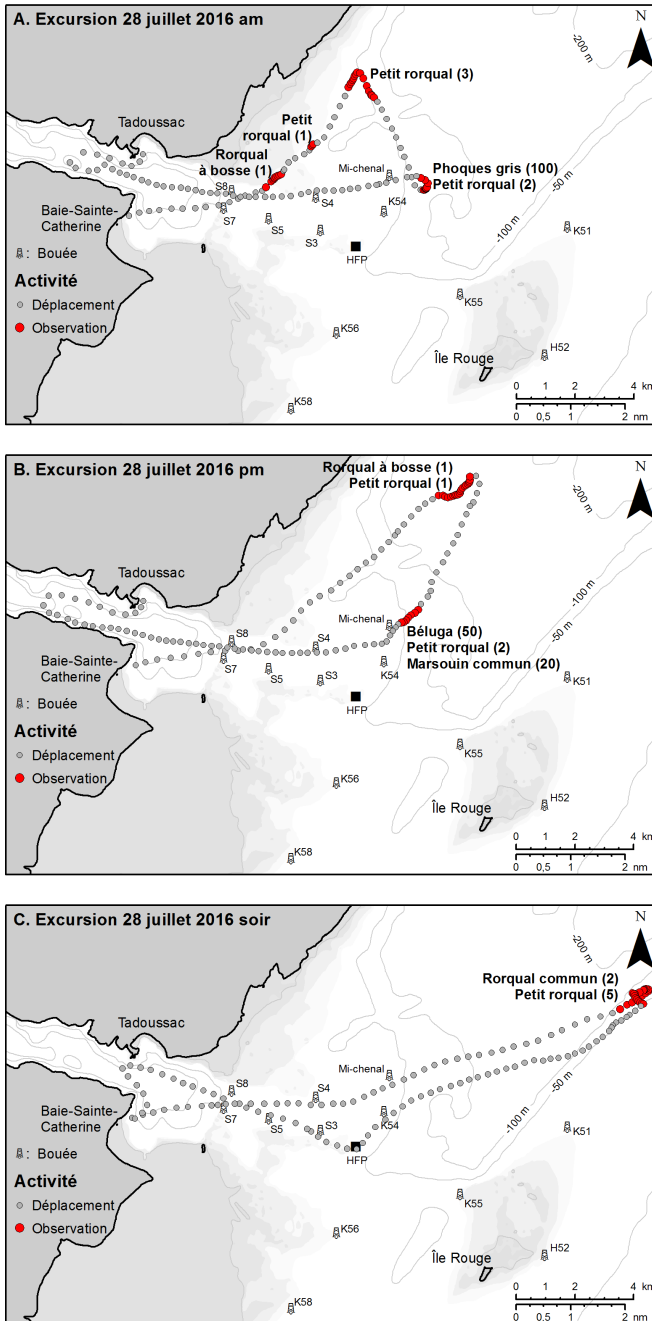


Figure 5. Exemples de données AIS pour trois excursions au même bateau le 28 juillet 2016, en avant-midi (haut), en après-midi (milieu) et en fin de journée (bas). Les points en gris sont ceux que l'algorithme a associés à des déplacements et ceux en rouge, à des observations. Les espèces (et le nombre d'individus) indiquées sont celles notées par les naturalistes dans le cadre du projet AOMc.

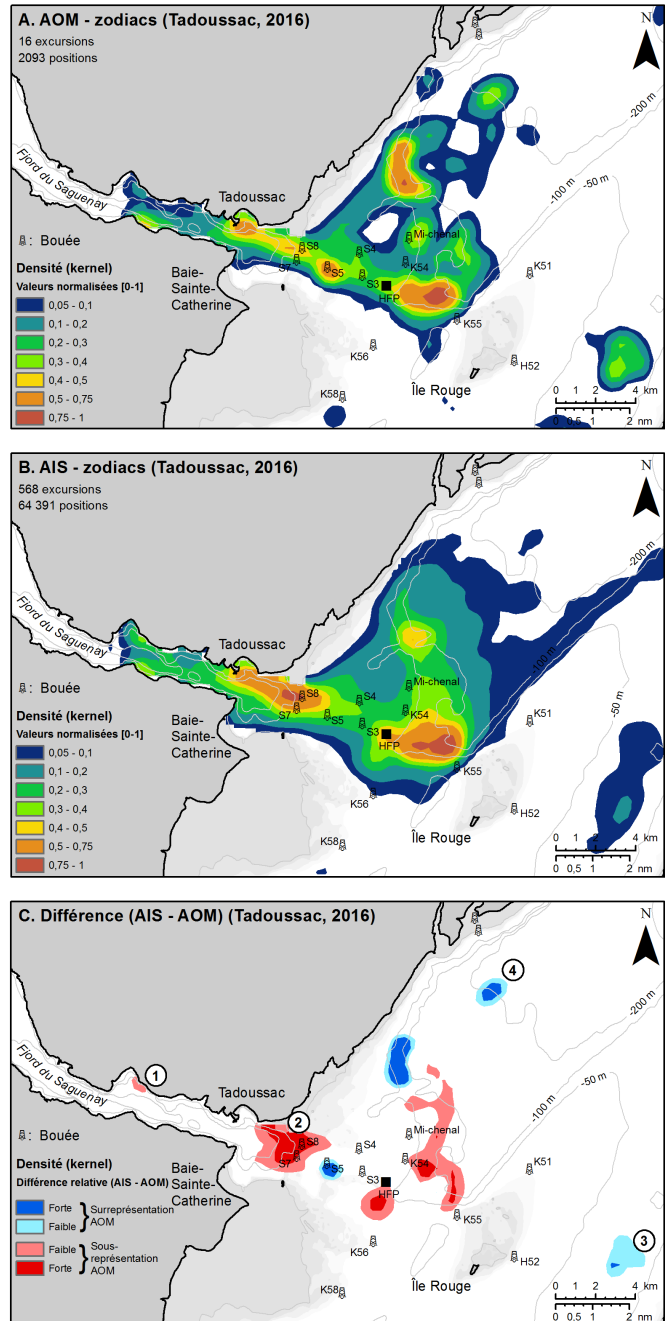


Figure 6. Utilisation du territoire (densité de type kernel normalisée [0-1]) selon les données du protocole AOM (A) et les données AIS (B) pour les zodiacs au départ de Tadoussac en 2016. Le panneau C montre les différences entre les panneaux supérieurs, soit les endroits où l'échantillonnage a été surreprésenté (bleu) ou sous-représenté (rouge) par le protocole AOM.

AOM. Par exemple, le point 3, qui correspond au secteur de l'île Verte, est parfois visité par les excursionnistes pour de courtes périodes en raison de la présence occasionnelle de rorquals. Une seule excursion échantillonnée par les AOM est responsable de la densité observée à la figure 6 (panneau C, point 3). À l'inverse, les points 1 et 2 montrent des secteurs sous-échantillonnés par le projet AOM. Le point 1, qui correspond à une échouerie de phoques communs (*Phoca vitulina*), a été sous-échantillonné par le projet AOM, alors que l'analyse des données AIS démontre que ce secteur est plus utilisé que l'illustre les données AOM. Ce site et celui indiqué par le point 2 sont plus visités lorsque les conditions en mer au large ne sont pas propices aux observations. Dans ces conditions, l'échantillonnage AOM est en général reporté à une date ultérieure par le technicien. Les analyses des données AIS permettent un portrait plus réaliste de l'utilisation du territoire que les données AOM en raison de leur large volume et de l'absence de contraintes liées à l'effort et à un plan d'échantillonnage, mais elles se limitent toutefois aux bateaux équipés. Malgré les avantages de ces données pour caractériser l'utilisation du territoire, l'AIS ne peut remplacer le suivi AOM qui permet de caractériser plusieurs aspects de l'activité (Michaud et collab., 2010).

Acquisition de données sur les mammifères marins

Un projet de science citoyenne en partenariat avec l'industrie (AOMc pour activité d'observation en mer par les capitaines/naturalistes) a été initié en 2012 (Tryphon Océans, résultats non publiés). Deux compagnies sont impliquées dans ce projet, une à Tadoussac et une aux Bergeronnes. L'objectif de cette initiative est d'inventorier les espèces ciblées lors des excursions échantillonnées par AIS. Les capitaines ou les naturalistes notent la date, l'heure et l'espèce pour chaque observation effectuée au cours de l'excursion. De 2012 à 2016, un total de 936 excursions ont été échantillonnées à partir de Tadoussac et 341 à partir des Bergeronnes (tableau 2). À partir de ces données, il est possible de documenter la présence des différentes espèces de mammifères marins dans le secteur pour presque tous les jours de la saison estivale. En couplant les données AOMc avec les données AIS par un lien temporel, il est

possible de cartographier les observations (figure 5). De 2012 à 2014, à partir d'un seul des bateaux participants, un total de 1329 observations de rorquals ont été notées dans le cadre du projet AOMc, dont 822 ont pu être géolocalisées par couplage avec les données AIS disponibles (Tryphon Océans, résultats non publiés). À titre d'exemple, pour cette même période et ce même bateau, un total de 134 observations de rorquals ont été géolocalisées dans le cadre du projet AOM. Cette différence s'explique par l'effort et le plan d'échantillonnage (tableau 2) et non par la méthodologie. De plus, l'algorithme introduit précédemment sur les données AIS et les données AOMc permet de caractériser plus finement les sites d'observation identifiés (figure 5), par exemple par le calcul du temps passé en observation des différentes espèces par excursion.

Les données AIS jumelées à une prise de données citoyennes, telles que le projet AOMc, permettent d'acquérir un grand volume de données de valeur scientifique, dans ce cas sur l'observation des mammifères marins. Bien que cette méthodologie soit moins systématique que les autres suivis en cours, elle permet de bonifier les données disponibles pour la caractérisation de l'observation des mammifères marins dans le parc marin et la gestion de l'activité, tout en favorisant la participation de l'industrie dans le suivi de la ressource.

Évaluation des risques de cooccurrence et de collision avec les mammifères marins

Les collisions avec les mammifères marins sont une des menaces au rétablissement de plusieurs espèces (Laist et collab., 2001). En superposant des données sur la densité des mammifères marins avec celles du trafic maritime, il est possible de définir des secteurs où les risques de collision ou de cooccurrence sont les plus élevés. En y ajoutant la vitesse des navires, on peut aussi évaluer les risques de mortalité en cas de collision (p. ex., Redfern et collab., 2013; Vanderlaan et collab., 2008).

Dans le territoire du parc marin, Martins (2012) a utilisé des grilles de densité construites à partir de données de relevés systématiques de rorquals de 2006 à 2009 conjointement à une grille de densité du trafic basée sur les données AIS, pour calculer les risques de cooccurrence avec 4 espèces de

Tableau 2. Nombre d'excursions et nombre de jours différents (entre parenthèses) échantillonnés dans le cadre du suivi des activités d'observation en mer par les capitaines/naturalistes (AOMc) et par le suivi des activités d'observation en mer (AOM) à partir d'un bateau au départ de Tadoussac et des zodiacs au départ des Bergeronnes de 2012 à 2016.

Port d'attache	Méthodes	2012	2013	2014	2015	2016	Total
Tadoussac	AOMc	92* (50)	149 (77)	286 (141)	145** (75)	264 (138)	936 (481)
	AOM	25 (25)	25 (25)	32 (32)	36 (36)	41 (41)	159 (159)
Les Bergeronnes	AOMc	0 (0)	26* (18)	0 (0)	168 (70)	147 (60)	341 (148)
	AOM	0 (0)	0 (0)	0 (0)	9 (9)	14 (14)	23 (23)

* L'échantillonnage a débuté en cours de saison. ** Saison écourtée

rorquals (le petit rorqual, *Balaenoptera acutorostrata*, le rorqual commun, *Balaenoptera physalus*, le rorqual à bosse, *Megaptera novaeangliae* et le rorqual bleu, *Balaenoptera musculus*). Cette analyse a permis de confirmer la pertinence des mesures mises en place par le G2T3M et de proposer un déplacement du dispositif de séparation du trafic en aval de la station de pilotes (figure 2) afin de diminuer les cooccurrences, principalement avec le rorqual bleu (Martins, 2012).

Dans le cadre des analyses des gains en conservation suivant la mise en place des mesures volontaires proposées par le G2T3M (voir ci-dessus et figure 2), l'approche probabiliste proposée par Vanderlaan et collab. (2008) est utilisée afin d'évaluer les changements dans les risques de collisions mortelles (Chion, 2017). Les réductions théoriques annuelles du risque de collision mortelle ont pu être calculées en utilisant les données AIS de 2012 comme année de référence, les données AIS des années subséquentes, les distributions spatiales historiques des espèces de grands rorquals (Parrott et collab., 2011) et la probabilité de mortalité en cas de collision selon la vitesse (Vanderlaan et Taggart, 2007). Les résultats de ces analyses indiquent que la zone de réduction de vitesse à 10 nœuds a entraîné une réduction théorique du risque de collision mortelle de 37 à 40 % pour le petit rorqual, de 36 à 39 % pour le rorqual commun, de 36 à 39 % pour le rorqual à bosse et de 29 à 34 % pour le rorqual bleu (Chion, 2017).

Bruit sous-marin

Les niveaux de bruit ambiant dans l'océan ont grandement augmenté au cours des dernières décennies (Frisk, 2012), et la navigation commerciale est reconnue comme étant la principale source de bruit anthropique de basse fréquence (Hildebrand, 2009). Dans le Saint-Laurent, les données AIS ont été utilisées pour l'analyse des niveaux sonore à la source des navires et pour la modélisation et la cartographie des niveaux sonores liés à la navigation.

Pour la gestion des effets des bruits sous-marins associés à la navigation et leur mitigation, la modélisation et la cartographie des niveaux sonores perçus à différents endroits du milieu marin sont nécessaires (Erbe et collab., 2012). Une information essentielle pour y arriver, en plus de séries temporelles des positions des navires et des conditions de propagation du son, est le niveau de bruit à la source des navires. Plusieurs modèles du bruit à la source des navires existent et prennent généralement en compte la longueur et la vitesse du navire (Breeding et collab., 1996). Dans le Saint-Laurent, Simard et collab. (2016a; 2016b) ont positionné un observatoire acoustique le long de la voie maritime afin d'obtenir des niveaux sonores à la source des navires. En combinant ces données acoustiques aux données AIS des navires ayant navigué à proximité, ils ont obtenu 255 niveaux sonores à la source de navires (Simard et collab., 2016a). Avec ces données, ils ont développé des modèles statistiques en fonction de caractéristiques des navires et de leur vitesse extraites des données AIS (Simard et collab., 2016a).

À partir de ces modèles statistiques, de données spatiales sur les propriétés de la colonne d'eau, des paramètres sur la propagation du son et des données AIS, il est possible de cartographier les niveaux sonores perçus sur l'ensemble du territoire à l'étude. Ces informations sont essentielles pour déterminer la qualité acoustique des habitats des mammifères marins et pour inclure la composante acoustique dans la planification de l'espace maritime (Erbe et collab., 2012). Une telle cartographie indique où le bruit sous-marin est susceptible d'avoir le plus d'impacts sur les différentes espèces et où les mesures de mitigation sont susceptibles d'être les plus efficaces. En modifiant les caractéristiques des données AIS (p. ex., la vitesse), il est possible de prédire l'effet de changements de vitesse sur les niveaux de bruit. Aulanier et collab. (2016) ont utilisé cette approche pour estimer le degré d'exposition des rorquals bleus aux bruits sous-marins émis par la marine marchande dans le Saint-Laurent. Ils ont ainsi pu cartographier les risques de réponse comportementale et de masquage.

Les limites de l'utilisation des données AIS en conservation

La principale limite de l'utilisation des données AIS pour décrire l'utilisation d'un territoire par les différentes composantes du trafic maritime est que certaines d'entre elles ne sont pas équipées d'un AIS et ne sont donc pas représentées dans les données. Par exemple, peu de plaisanciers, de pêcheurs et de bateaux d'excursion aux baleines sont équipés du système. Or, ces catégories peuvent représenter une partie importante du trafic d'une région. La proportion de bateaux équipés d'un AIS varie selon les régions et est en croissance, selon de nouvelles réglementations ou sur une base volontaire. En 2014, la Commission européenne a rendu l'AIS obligatoire sur tous les navires de pêche de plus de 15 m (Commission européenne, 2017). Autre exemple, en 2017, une compagnie d'excursion aux baleines opérant dans les limites du parc marin du Saguenay–Saint-Laurent a volontairement équipé l'ensemble de sa flotte d'AIS. De plus, les avancées technologiques devraient permettre d'équiper de plus en plus de types d'embarcations et de fournir des données AIS sur des types d'embarcations pour lesquels nous avons pour l'instant peu d'information. Des initiatives visant à équiper d'AIS des utilisateurs d'une aire marine protégée doivent être envisagés afin de favoriser la diffusion de la technologie et d'acquérir des données sur des composantes du trafic traditionnellement peu ou pas représentées dans les données AIS. Dans cette optique, les AIS de classe B ne doivent pas être négligés.

Une autre limite de l'AIS est la possibilité pour un utilisateur qui n'a pas l'obligation légale d'être équipé du système d'éteindre son transpondeur afin de ne plus émettre de message et de ne plus être détecté. Cette possibilité limite l'efficacité de certains programmes de surveillance (p. ex., pour la pêche dans une zone illégale) s'ils sont basés uniquement sur les AIS.

Le traitement et le nettoyage de ces données permettent de minimiser les erreurs contenues dans les messages AIS telles

que des mauvaises positions, des vitesses erronées, des mauvaises caractéristiques du bateau ou encore un mauvais statut de navigation. Pour réaliser cette étape, il est possible d'appliquer différentes requêtes spatiales ou filtres selon les attributs de la base des données. Ces opérations peuvent être automatisées et incluses dans la méthodologie de traitement des données.

De plus, des pannes du système d'archivage, du réseau d'antennes VHF ou une morphologie particulière d'un territoire peuvent occasionner des trajectoires de navires incomplètes ou l'absence de données dans un secteur et ainsi mener à une mauvaise interprétation des résultats. Dans le cadre du suivi des AOM par AIS au parc marin, des trajectoires incomplètes ont également été observées lorsqu'un bateau d'excursion s'éloignait trop des antennes VHF. Ce problème se posait davantage pour les petites embarcations (p. ex., les zodiacs) avec un AIS de classe B en raison de la puissance d'émission et de la hauteur de l'antenne qui sont moindres. Une méthode pour pallier le problème des trajectoires incomplètes dans les analyses de densité est d'utiliser la pondération. Si le nombre de transits circulant sur une route pour une composante du trafic maritime est connu ou peut être estimé et que nous avons un nombre de transits complets avec les données AIS sur cette même route, il peut être envisagé d'appliquer une pondération. Une autre méthode est l'interpolation linéaire entre deux points d'un même transit avec un écart temporel. Cette méthode est difficilement applicable dans un secteur avec des changements de direction ou pour une catégorie de bateau qui fait régulièrement des changements de cap (p. ex., les bateaux d'excursion).

Pour les applications des données AIS portant sur les vitesses, un biais important peut être induit par les variations dans l'émission ou la réception des messages AIS. Selon la taille de l'aire d'étude, la fréquence des données et l'ampleur des variations de vitesse, la moyenne arithmétique des vitesses d'un ensemble de points d'un même transit peut être relativement biaisée. Il est approprié d'utiliser la vitesse moyenne pondérée par la distance (McKenna et collab., 2012) afin de corriger ce biais ou encore, selon l'application, un pourcentage de distance parcourue au-dessus d'un seuil de vitesse (p. ex., taux de conformité à une vitesse maximale; Silber et collab., 2014; tableau 1).

Les analyses spatiales des données AIS peuvent être effectuées à partir de points (un point correspond à un message AIS) ou de polygones construites à partir de ces mêmes points pour représenter les routes des navires. L'analyse spatiale à partir des polygones ne permet pas de détecter un secteur où les déplacements se font à grande vitesse, ce qui pourrait être un enjeu de conservation (p. ex., pour l'érosion des berges). Contrairement à l'analyse spatiale à partir des polygones, l'analyse à partir des points permet d'estimer le temps de présence et la vitesse. L'analyse de densité spatiale à partir des points peut être biaisée en raison de la fréquence irrégulière des données. L'enregistrement des données ou le

rééchantillonnage à des intervalles réguliers et la pondération selon l'écart temporel avec le message AIS précédent peuvent permettre de pallier ce biais.

Disponibilité des données AIS

Récemment, le gouvernement américain a rendu disponible en téléchargement libre sur internet (NOAA, 2016) les données AIS enregistrées au cours des dernières années dans ses eaux côtières. Au Canada, l'accès à ces données demeure limité. Une mise en disponibilité des données AIS archivées dans les eaux canadiennes, semblable à ce qui a été fait aux États-Unis, permettrait des avancées en ce qui a trait à l'évaluation des risques liés aux activités de navigation à l'échelle nationale et à des échelles plus locales. De plus, cela permettrait à un groupe d'intervenants beaucoup plus large, notamment provenant des milieux universitaires et des ONG, de travailler sur ces questions et de contribuer à la planification de l'espace maritime et côtier au Canada. L'accès à ces données faciliterait également l'uniformisation des portraits de la navigation des différentes aires marines protégées au Canada. Ainsi, des outils de gestion pourraient être développés à l'échelle nationale afin d'aider les gestionnaires à mettre en place des mesures locales associées aux activités de navigation.

Plusieurs sites internet permettent de visualiser en temps réel les données AIS, et plusieurs fournisseurs proposent un accès à ces données. Avoir un réseau d'antennes VHF et une station d'archivage propres au parc marin du Saguenay–Saint-Laurent s'est avéré bénéfique. L'accès en temps réel a aussi été un avantage. Selon l'emplacement, c'est-à-dire la distance des côtes, une aire marine protégée devrait considérer avoir son propre système de réception et d'archivage. Toutefois, avec les avancées technologiques, notamment en ce qui concerne les AIS par satellite (AIS-S), un abonnement à un fournisseur de telles données pourrait également être une option valable pour les gestionnaires d'aires marines protégées.

Conclusion

Nous avons illustré de nombreuses applications de l'utilisation des données AIS pour la gestion d'une aire marine protégée. Pour remplir leur mandat de conservation, les gestionnaires des aires marines protégées doivent bien connaître et comprendre les différentes activités anthropiques qui s'y déroulent. Ces données sont indispensables pour la gestion des activités de navigation, pour en évaluer leurs effets et pour faire le suivi du degré auquel les navires se conforment à des mesures de gestion. Les informations tirées de ces données et leur mise à jour devraient être intégrées dans la planification de l'espace maritime. Les données AIS au parc marin du Saguenay–Saint-Laurent se sont avérées fort utiles à plusieurs égards et ont permis de définir des actions qui rehausseront le niveau de protection des écosystèmes, notamment des mammifères marins. Ce modèle pourrait servir d'exemple à d'autres aires marines protégées actuelles ou projetées.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Innovation Maritime pour leur travail sur la station d'archivage AIS et sur le module de conversion des vitesses. Les auteurs tiennent également à remercier Croisières AML et Croisières Essipit pour leur participation dans le cadre du projet AOMc et les responsables de la prise de données, de même que tous ceux ayant participé au projet AOM au Groupe de recherche et d'éducation sur les mammifères marins (GREMM) et au Réseau d'observation de mammifères marins (ROMM). Les résultats présentés dans le présent article n'auraient pu être obtenus sans la participation, à différentes étapes, des employés de Parcs Canada au parc marin du Saguenay–Saint-Laurent. Le financement ayant permis l'installation du système de réception et d'archivage des données AIS et d'équiper plusieurs bateaux naviguant dans le parc marin d'un AIS provient du programme Agir sur le terrain de Parcs Canada. ◀

Références

- AULANIER, F., Y. SIMARD, N. ROY, M. BANDET et C. GERVAISE, 2016. Groundtruthed probabilistic shipping noise modeling and mapping: Application to blue whale habitat in the Gulf of St. Lawrence. *Proceedings of Meetings of Acoustics*, 27:070006. doi:10.1121/2.0000258.
- BAILEY, S.A., 2015. An overview of thirty years of research on ballast water as a vector for aquatic invasive species to freshwater and marine environments. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 18 (3): 261-268. doi:10.1080/14634988.2015.1027129.
- BEAUCHAMP, J., H. BOUCHARD, P. de MARGERIE, N. OTIS et J.-Y. SAVARIA, 2009. Programme de rétablissement du rorqual bleu (*Balaenoptera musculus*), population de l'Atlantique Nord-Ouest au Canada, Série de Programmes de rétablissement de la Loi sur les espèces en péril. Pêches et Océans Canada, Québec, 64 p.
- BEYER, J., H.C. TRANNUM, T. BAKKE, P.V. HODSON et T.K. COLLIER, 2016. Environmental effects of the Deepwater Horizon oil spill: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 110 (1): 28-51. doi:10.1016/j.marpolbul.2016.06.027.
- BREEDING, J.E.J., L.A. PFLUG, M. BRADLEY, M.H. WALROD et W. MCBRIDE, 1996. Research ambient noise directionality (RANDI) 3.1 Physics Description. Naval Research Laboratory, Acoustics Division, Stennis Space Center, MS, 33 p.
- [CDB] CONVENTION SUR LA DIVERSITÉ BIOLOGIQUE, 2010. Décision adoptée par la conférence des parties à la convention sur la diversité biologique à sa dixième édition, X/2. Plan stratégique 2011-2020 et objectifs d'Aichi relatifs à la diversité biologique. Disponible en ligne à : <https://www.cbd.int/doc/decisions/cop-10/cop-10-dec-02-fr.pdf>. [Visité le 2017-09-13].
- CHION, C., 2011. An agent-based model for the sustainable management of navigation activities in the Saint Lawrence Estuary. Thèse de doctorat, École de technologie supérieure, Montréal, 354 p.
- CHION, C., 2017. Impacts des mesures volontaires visant à réduire les risques de collisions mortelles de grands rorquals avec des navires marchands dans l'estuaire du Saint-Laurent en 2016, Mise à jour de l'évaluation des gains en conservation des mesures volontaires proposées par le Groupe de travail sur le transport maritime et la protection des mammifères marins (G2T3M) et l'évaluation de leur impact sur le temps de transit des navires marchands. Présenté à Pêches et Océans Canada et Parcs Canada, Université du Québec en Outaouais, Gatineau, 15 p. Disponible en ligne à : http://pcacdn.azureedge.net/-/media/amnc-nmca/qc/saguenay/WET4/Publications-scientific/Chion_2017.pdf.
- CHION, C., S. TURGEON, R. MICHAUD, J.-A. LANDRY et L. PARROTT, 2009. Portrait de la navigation dans le parc marin du Saguenay–Saint-Laurent. Caractérisation des activités sans prélèvement de ressources entre le 1er mai et le 31 octobre 2007. Rapport présenté à Parcs Canada, Montréal, 86 p. Disponible en ligne à : http://pcacdn.azureedge.net/-/media/amnc-nmca/qc/saguenay/WET4/Publications-scientific/Chion-et-al2009_Portrait-de-la-navigation-dans-le-parc-marin-du-Saguenay-Saint-Laurent-2007.pdf.
- CHION, C., L. PARROTT et J.-A. LANDRY, 2012. Collisions et cooccurrences entre navires marchands et baleines dans l'estuaire du Saint-Laurent – Évaluation de scénarios de mitigation et recommandations. Rapport présenté au Groupe de travail sur le transport maritime et la protection des mammifères marins, Parcs Canada et Pêche et Océans Canada, Université de Montréal et École de technologie supérieure, Montréal, 80 p. Disponible en ligne à : https://www.researchgate.net/publication/259892619_Collisions_et_cooccurrences_entre_navires_marchands_et_baleines_dans_l%27estuaire_du_Saint-Laurent.
- CHION, C., S. TURGEON, G. CANTIN, R. MICHAUD, N. MÉNARD, V. LESAGE, L. PARROTT, P. BEAUFILS, Y. CLERMONT et C. GRAVEL. (en révision). A voluntary conservation agreement reduces the risks of lethal collisions between ships and whales in the St. Lawrence Estuary (Québec, Canada): From co-construction to monitoring compliance and assessing effectiveness. Soumis à PLoS One.
- CLAPHAM, P.J., 2016. Managing leviathan: Conservation challenges for the great whales in a post-whaling world. *Oceanography*, 29 (3): 214-225. doi:10.5670/oceanog.2016.70.
- COMMISSION EUROPÉENNE, 2017. Le régime européen de contrôle de la pêche. Disponible en ligne à : https://ec.europa.eu/fisheries/cfp/control/technologies_fr. [Visité le 2017-09-13].
- [COSEPAC] Comité sur la situation des espèces en péril au Canada, 2014. Évaluation et Rapport de situation du COSEPAC sur le béluga (*Delphinapterus leucas*), population de l'estuaire du Saint-Laurent, au Canada. Comité sur la situation des espèces en péril au Canada, Ottawa, 73 p.
- ERBE, C., A. MACGILLIVRAY et R. WILLIAMS, 2012. Mapping cumulative noise from shipping to inform marine spatial planning. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 132 (5): EL423. doi:10.1121/1.4758779.
- FRISK, G.V., 2012. Noiseconomics: The relationship between ambient noise levels in the sea and global economic trends. *Scientific Reports*, 2: 437. doi:10.1038/srep00437.
- GARDE CÔTIÈRE CANADIENNE, 2017. Publication des avis aux navigateurs édition de l'Est, Édition mensuelle n° 4. Disponible en ligne à : <https://www.notmar.gc.ca/publications/monthly-mensuel/east-est-04-17-fr.php>. [Visité le 2017-07-07].
- GOLLASCH, S., D. MINCHIN et M. DAVID, 2015. The transfer of harmful aquatic organisms and pathogens with ballast water and their impacts. Dans: David, M. et S. Gollasch (édit.). *Global maritime transport and ballast water management: issues and solutions*. Dordrecht, Springer Netherlands, p. 35-58.
- GOUVERNEMENT DU QUÉBEC, 2015. Stratégie maritime. La stratégie maritime à l'horizon 2030. Plan d'action 2015-2020, 78 p.
- HALPERN, B.S., M. FRAZIER, J. POTAPENKO, K.S. CASEY, K. KENIG, 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*, 6: 7615. doi:10.1038/ncomms8615.
- HILDEBRAND, J.A., 2009. Anthropogenic and natural sources of ambient noise in the ocean. *Marine Ecology Progress Series*, 395: 5-20. doi:10.3354/meps08353.
- HOYT, E., 2011. *Marine protected areas for whales, dolphins, and porpoises: a world handbook for cetacean habitat conservation and planning*. Earthscan/Routledge and Taylor and Francis, London and New York, 464 p.

- JANSSEN, M. et E. OSTROM, 2006. Governing social-ecological systems. Dans : Tesfatsion, L. et K.L. Judd (édit.). Handbook of computational economics: agent-based computational economics, vol. 2, Elsevier, Amsterdam, p. 1465-1509.
- LAIST, D.W., A.R. KNOWLTON, J.G. MEAD, A.S. COLLET et M. PODESTA, 2001. Collisions between ships and whales. *Marine Mammal Science*, 17 (1): 35-75. doi:10.1111/j.1748-7692.2001.tb00980.x.
- LEMIEUX LEFEBVRE, S., R. MICHAUD, V. LESAGE et D. BERTEAUX, 2012. Identifying high residency areas of the threatened St. Lawrence beluga whale from fine-scale movements of individuals and coarse-scale movements of herds. *Marine Ecology Progress Series*, 450: 243-257. doi:10.3354/meps09570.
- MARTINS, C.C.A., 2012. Study of baleen whales' ecology and interaction with maritime traffic activities to support management of a complex socio-ecological system. Thèse de doctorat, Université de Montréal, Montréal, 236 p.
- MARTINS, C.C.A., S. TURGEON, R. MICHAUD et N. MÉNARD, 2018. Suivi des espèces ciblées par les activités d'observation en mer dans le parc marin du Saguenay-Saint-Laurent de 1994 à 2017. *Le Naturaliste canadien*, 142 (2): 65-79.
- MCKENNA, M.F., S.L. KATZ, C. CONDIT et S. WALBRIDGE, 2012. Response of Commercial Ships to a Voluntary Speed Reduction Measure: Are Voluntary Strategies Adequate for Mitigating Ship-Strike Risk?. *Coastal Management*, 40 (6): 634-650. doi:10.1080/08920753.2012.727749.
- MÉNARD, N., M. CONVERSANO et S. TURGEON, 2018. La protection des habitats de la population de bélugas (*Delphinapterus leucas*) du Saint-Laurent : bilan et considérations sur les besoins de conservation actuels. *Le Naturaliste canadien*, 142 (2): 80-105.
- MICHAUD, R., M. MOISAN, V. DE LA CHENELIÈRE, S. Duquette et M.-H. D'ARCY, 2010. Les activités d'observation en mer des mammifères marins (AO3M) dans l'estuaire du Saint-Laurent : zone de protection marine Estuaire du Saint-Laurent et parc marin du Saguenay-Saint-Laurent – Portrait 2005-2010. Rapport final. Groupe de recherche et d'éducation sur les mammifères marins, Tadoussac, 34 p. Disponible en ligne à : http://gremm.org/docs/Michaud_et_al_2010.pdf.
- [MPO] MINISTÈRE DE PÊCHES ET OCÉANS CANADA, 2012. Programme de rétablissement du béluga (*Delphinapterus leucas*), population de l'estuaire du Saint-Laurent au Canada, Série de Programmes de rétablissement de la Loi sur les espèces en péril. Pêches et Océans Canada, Ottawa, 93 p.
- [NOAA] NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, 2016. Vessel traffic data. Disponible en ligne à : <https://marinecadastre.gov/ais/>. [Visité le 2017-08-15].
- PARROTT, L., C. CHION, C.C.A. MARTINS, P. LAMONTAGNE, S. TURGEON, J.-A. LANDRY, B. ZHENS, D.J. MARCEAU, R. MICHAUD, G. CANTIN, N. MÉNARD et S. DIONNE, 2011. A decision support system to assist the sustainable management of navigation activities in the St. Lawrence River Estuary, Canada. *Environmental Modelling & Software*, 26 (12): 1403-1418. doi:10.1016/j.envsoft.2011.08.009.
- PARROTT, L., C. CHION, S. TURGEON, N. MÉNARD, G. CANTIN et R. MICHAUD, 2016. Slow down and save the whales. *Solutions*, 6: 40-47.
- REDFERN, J.V., M.F. MCKENNA, T.J. MOORE, J. CALAMBOKIDIS, M.L. DEANGELIS, E.A. BECKER, J. BARLOW, K.A. FORNEY, P.C. FIEDLER et S.J. CHIVERS, 2013. Assessing the risk of ships striking large whales in marine spatial planning. *Conservation Biology*, 27 (2): 292-302. doi:10.1111/cobi.12029.
- ROBARDS, M.D., G.K. SILBER, J.D. ADAMS, J. ARROYO, D. LORENZINI, K. SCHWEHR et J. AMOS, 2016. Conservation science and policy applications of the marine vessel Automatic Identification System (AIS)—A review. *Bulletin of Marine Science*, 92 (1): 75-103. doi:10.5343/bms.2015.1034.
- SAUCIER, F.J., J. CHASSÉ, M. COUTURE, R. DORAIS, A. D'ASTOUS, D. LEFAIVRE et A. GOSSELIN, 1997. Atlas des courants de marée, estuaire du Saint-Laurent de cap de Bon-Désir à Trois-Rivières. Service Hydrographique du Canada, Pêches et Océans Canada, Ottawa, 108 p.
- SENIGAGLIA, V., F. CHRISTIANSEN, L. BEJDER, D. GENDRON, D. LUNDQUIST, D.P. NOREN, A. SCHAFFAR, J.C. SMITH, R. WILLIAMS, E. MARTINEZ, K. STOCKIN et D. LUSSEAU, 2016. Meta-analyses of whale-watching impact studies: comparisons of cetacean responses to disturbance. *Marine Ecology Progress Series*, 542 : 251-263. doi:10.3354/meps11497.
- SHELMERDINE, R.L., 2015. Teasing out the detail: How our understanding of marine AIS data can better inform industries, developments, and planning. *Marine Policy*, 54 : 17-25. doi:10.1016/j.marpol.2014.12.010.
- SILBER, G.K., J.D. ADAMS et C.J. FONNESBECK, 2014. Compliance with vessel speed restrictions to protect North Atlantic right whales. *PeerJ*, 2 : e399. doi:10.7717/peerj.399.
- SIMARD, Y., N. ROY, S. GIARD et M. YAYLA, 2014. Canadian year-round shipping traffic atlas for 2013: Volume 1, East Coast Marine Waters. Canadian technical report of fisheries and aquatic sciences, Fisheries and Oceans Canada, 347 p.
- SIMARD, Y., N. ROY, C. GERVAISE et S. GIARD, 2016a. Analysis and modeling of 255 source levels of merchant ships from an acoustic observatory along St. Lawrence Seaway. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 140 (3): 2002-2018. doi:10.1121/1.4962557.
- SIMARD, Y., N. ROY, C. GERVAISE et S. GIARD, 2016b. A seaway acoustic observatory in action: The St. Lawrence Seaway. Dans : POPPER A. et T. HAWKINS (édit.). The effects of noise on aquatic life II, Springer, New York, p. 1031-1040.
- VANDERLAAN, A.S. et C.T. TAGGART, 2007. Vessel collisions with whales: the probability of lethal injury based on vessel speed. *Marine mammal science*, 23 (1): 144-156. doi:10.1111/j.1748-7692.2006.00098.x.
- VANDERLAAN, A.S., C.T. TAGGART, A.R. SERDYNSKA, R.D. KENNEY et M.W. BROWN, 2008. Reducing the risk of lethal encounters: vessels and right whales in the Bay of Fundy and on the Scotian Shelf. *Endangered Species Research*, 4 (3): 283-297. doi:10.3354/esr00083.
- WEILGART, L.S., 2007. The impacts of anthropogenic ocean noise on cetaceans and implications for management. *Canadian Journal of Zoology*, 85 (11): 1091-1116.
- WHITNEY, C.K., J. GARDNER, N.C. BAN, C. VIS, S. QUON et S. DIONNE, 2016. Imprecise and weakly assessed: Evaluating voluntary measures for management of marine protected areas. *Marine Policy*, 69: 92-101. doi:10.1016/j.marpol.2016.04.011.
- WILLIAMS, R., C. ERBE, E. ASHE et C.W. CLARK, 2015. Quiet(er) marine protected areas. *Marine Pollution Bulletin*, 100 (1): 154-161. doi:10.1016/j.marpolbul.2015.09.012.