



Université du Québec
à Rimouski

**ANALYSE DU PAYSAGE ACOUSTIQUE
DU SAINT-LAURENT**

**Le bruit généré par le vent et le bruit du trafic maritime dans l'habitat
des baleines**

ASSESSEMENT OF THE ST. LAWRENCE SOUNDSCAPE

Wind-generated noise and shipping noise in whale habitat

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en océanographie

en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences

PAR

© JEANNE MÉRINDOL

NOVEMBRE 2023

Composition du jury :

Daniel Bourgault, président du jury, Université du Québec à Rimouski, Canada

Pierre Cauchy, directeur de recherche, Université du Québec à Rimouski, Canada

Cédric Gervaise, codirecteur de recherche, Institut de recherche CHORUS / SENSEA FR

Guillaume St-Onge, codirecteur de recherche, Université du Québec à Rimouski, Canada

Charlotte Rose Findley, examinatrice externe, Aarhus University, Danemark

Dépôt initial le 11 Septembre 2023

Dépôt final le 27 Novembre 2023

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.

*« Il faut s'accorder la liberté de
s'inventer sa vie »*

Jean-Louis Étienne

À ma sœur Marie et mon frère Méric

À mes ami·e·s, ma famille choisie

À mes parents

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je souhaite remercier mon directeur de recherche, Pierre Cauchy pour sa confiance, sa disponibilité et son soutien tout au long de ce projet. Je tiens également à remercier mes co-directeurs de recherche, Cédric Gervaise et Guillaume St-Onge pour leurs conseils, leurs avis éclairés et les échanges constructifs qu'on a partagés tout au long du projet. Enfin, je tiens à remercier mon comité de direction au complet pour les opportunités qu'ils m'ont offertes et leur soutien dans mes implications annexes et mes prises de parole sur cette thématique de recherche.

Je souhaite remercier le projet MARS et ses partenaires, le centre de recherche appliquée Innovation Maritime (IMAR) et OpDAQ, MTE Instruments et la Société de développement économique du Saint-Laurent, et ses financeurs, le ministère de l'Économie, de l'Innovation et de l'Énergie du Québec, Transports Canada et les armateurs (Algoma, CSL, Desgagnés, Fednav), de m'avoir permis d'intégrer cette équipe de recherche pluridisciplinaire, une opportunité dont je suis très reconnaissante, et pour la confiance qu'ils m'ont accordés dans ma contribution à ce projet.

Merci au capitaine et à l'équipage du Coriolis II pour l'expédition dans l'estuaire du Saint-Laurent en mai 2021, ainsi qu'à l'équipe de technicien·e·s de l'ISMER, et notamment à Christian Boutot, pour avoir assuré la mise à l'eau et la récupération de la station acoustique du projet dans des conditions parfois ardues. Un très grand merci au corps professoral de l'ISMER pour leurs formations enseignées avec passion et leur disponibilité durant les sessions de cours. J'adresse également une mention spéciale au personnel administratif et d'entretien de l'ISMER, et particulièrement à Martine Belzile, qui, grâce à leur professionnalisme et leur efficacité, savent créer un climat serein et bienveillant participant grandement à la réussite des étudiant·e·s au sein de l'établissement. L'ensemble de ces

personnes a contribué à mon expérience positive de maîtrise durant ces deux années au sein de l'ISMER, bénéfique à mon développement intellectuel et personnel.

Un merci tout particulier à Aude, Charlotte et Hugo (mes trois mousquetaires), pour votre écoute, votre patience, votre esprit d'équipe et votre joie de vivre qui ont rendu cette aventure de maîtrise inoubliable ; je m'estime chanceuse de vous compter dans ma vie en tant qu'ami·e·s désormais. Merci à mes formidables copin·e·s doctorant·e·s et post-doctorant·e·s, Sarah, Guillaume, Julie, Baptiste, Delphine, Élodie, Quentin et Thomas pour m'avoir apporté autant de bonne humeur dans la dernière ligne droite.

Un grand merci à mes sœurs Léna, Anaëlle et Camille, pour votre soutien infailible, vos mots d'encouragement et pour m'avoir fait me sentir un peu à la maison en restant à mes côtés, quelles que soient les circonstances et la distance. Un immense merci à mon frère et à ma sœur, je suis si reconnaissante de votre soutien inébranlable et de faire partie de cette fratrie si soudée. Enfin, merci à ma maman et à mon papa d'avoir toujours su stimuler ma curiosité depuis mon enfance, de croire en moi et de me soutenir dans mes choix, mêmes lorsque ceux-mis m'emmènent loin de vous.

AVANT-PROPOS

Ce projet de maîtrise portant sur l'étude du paysage acoustique du Saint-Laurent s'insère dans le projet MARS (Marine Acoustic Research Station) sous la direction de Guillaume St-Onge de l'ISMER-UQAR et Sylvain Lafrance de l'IMAR, la coordination scientifique de Cédric Gervaise de l'Institut de recherche CHORUS et SENSEAFR SAS à Grenoble, en France et le responsable pédagogique Pierre Cauchy de l'ISMER-UQAR. Le présent manuscrit est composé de trois parties : une introduction générale rédigée en français présentant l'environnement d'étude et les principaux concepts abordés dans les axes de recherche. Elle est suivie d'un chapitre principal rédigé en anglais sous la forme d'un article scientifique. Cet article, intitulé « *Wind-generated noise and shipping noise in whale habitat: characteristics and budget on three frequency bands in the St. Lawrence estuary* », sera soumis dans la revue *The Journal of the Acoustical Society of America*. En tant que premier auteur, j'ai contribué à l'élaboration de la question et des objectifs de recherche, au traitement des données acoustiques, au développement de la méthode et à la réalisation des calculs du modèle numérique. Le professeur Pierre Cauchy, second auteur, a contribué à l'élaboration de la question et des objectifs de recherche, a participé au développement de la méthode ainsi qu'à la révision de l'article. Cédric Gervaise, troisième auteur, a contribué à l'élaboration de la question et des objectifs de recherche, à la revue de la littérature ainsi qu'à la révision de l'article. Guillaume St-Onge, quatrième auteur, a contribué à l'élaboration de la question et des objectifs de recherche ainsi qu'à la révision de l'article. Une version abrégée de l'article a été soumise au Springer Book de la *The Effects of Noise on Aquatic Life Conference* à Berlin (Allemagne) à l'hiver 2023. Le mémoire se termine par une conclusion générale rédigée en français reprenant les principaux résultats obtenus, tout en considérant les limites de la présente étude, et surtout, les perspectives que celle-ci apporte. Elle fait également état

de l'avancée des connaissances auxquelles ce travail contribue en replaçant les conclusions dans un contexte global.

Les fruits de cette maîtrise sont en préparation pour publication sous forme d'article dans une revue internationale soumise à la révision par les pairs, le « Journal of the Acoustical Society of America ». La diffusion des principaux résultats s'est également faite au cours de ces deux années au travers de présentations orales ou d'affiches lors de congrès nationaux et internationaux tels que listés ci-dessous.

Présentations orales (5) :

Mérindol, J., Cauchy, P., Gervaise, C., St-Onge, G. 2023. Étude du paysage acoustique du Saint-Laurent. Séminaire MARS 2023, Rimouski, Canada.

Mérindol, J. 2022. Allo Saint-Laurent j'écoute ? Présentation publique de projet dans le cadre du séminaire "L'avenir du transport maritime : Mettre les voiles pour la planète", organisé par l'École de l'exploration, Saint-Malo, France.

Mérindol, J., Cauchy, P., Gervaise, C., St-Onge, G. 2022. Assessment of the St. Lawrence Soundscape at the MARS Station. SeaTech Week 2022, Brest, France.

Mérindol, J., Cauchy, P., Gervaise, C., St-Onge, G. 2022. Assessment of the St. Lawrence Soundscape at the MARS Station. The Effect of Ambient Noise on Aquatic Life 2022, Berlin, Allemagne.

Mérindol, J., Cauchy, P., Gervaise, C., St-Onge, G. 2022. Étude du paysage acoustique du Saint-Laurent. Séminaire MARS 2022, Rimouski, Canada.

Présentations par affiche (5) :

Mérindol, J., Cauchy, P., Gervaise, C., St-Onge, G. 2022. Analyse du bruit du vent et de ses effets sur les signatures acoustiques et la perception par les baleines. Réunion Scientifique Annuelle de Québec Océan 2023, Rivière-du-Loup, Canada.

Mérindol, J., Cauchy, P., Gervaise, C., St-Onge, G. 2022. Assessment of the St. Lawrence Soundscape at the MARS Station. The Effect of Ambient Noise on Aquatic Life 2022, Berlin, Allemagne.

Mérindol, J., Cauchy, P., Gervaise, C., St-Onge, G. 2022. Assessment of the St. Lawrence Soundscape at the MARS Station. SERENADE 2022, Brest, France.

Mérindol, J., Cauchy, P., Gervaise, C., St-Onge, G. 2022. Assessment of the St. Lawrence Soundscape at the MARS Station. Réunion Scientifique Annuelle de Québec Océan 2022, Québec, Canada (en ligne).

Mérindol, J., Cauchy, P., Gervaise, C., St-Onge, G. 2022. Assessment of the St. Lawrence Soundscape at the MARS Station. Ocean Sciences Meeting 2022, Hawaiï, USA (en ligne).

RÉSUMÉ

L'environnement sonore est important pour les espèces de cétacés selon plusieurs aspects de leur mode de vie tels que leur alimentation, communication et déplacement. Leur capacité à entendre est donc déterminante pour leur survie. L'estuaire du Saint-Laurent est reconnu pour l'abondance et la diversité de cétacés. C'est également une voie maritime importante qui relie les Grands Lacs à l'océan Atlantique, et qui peut avoir des effets négatifs sur ces animaux, notamment l'exposition au bruit sous-marin. Dans le contexte actuel de protection des espèces en péril au Canada, telles que le rorqual bleu (*Balaenoptera musculus*) et le béluga (*Delphinopterus leucas*), déterminer objectivement les niveaux de bruit auxquels sont exposés ces espèces est essentiel. Le projet MARS (Marine Acoustic Research Station) s'inscrit dans cette problématique. Il s'agit d'un projet de recherche appliqué qui vise à comprendre et à mesurer le bruit sous-marin émis par les navires et à proposer des méthodes d'atténuation.

Le chapitre principal porte sur l'étude du paysage acoustique enregistré d'août à octobre 2021. Les données enregistrées par la station acoustique MARS déployée au centre du chenal Laurentien ont été utilisées pour analyser la contribution relative des sources majeures aux niveaux sonores dans trois bandes de fréquences utilisées par les cétacés. Un modèle permettant de définir le bruit généré par le vent et le trafic maritime a été créé, et des pourcentages de temps d'exposition aux différents niveaux sonores émis par ces sources ont été obtenus. Dans les basses fréquences (50 Hz), utilisées par le rorqual bleu, le paysage sonore est dominé par le trafic maritime 100 % du temps. Dans les hautes fréquences (6300 Hz), utilisées par le béluga, il est dominé par le trafic maritime 34,2 % du temps. Ces résultats indiquent qu'il est important d'étudier les différentes contributions sonores dans les fréquences spécifiques utilisées par les espèces de cétacés car elles n'impliquent pas les mêmes effets. Les stratégies de protection mises en place ne sont donc pas les mêmes selon l'espèce considérée. Une telle analyse du paysage sonore fournit donc des informations essentielles pour la conservation et le développement durable des activités humaines.

Mots clés : Acoustique, Bruit ambiant, Canada, Cétacés, Contribution relative, Exposition au bruit, Navires, Paysage acoustique, Québec, Saint-Laurent.

ABSTRACT

The underwater soundscape is important to cetacean species in many aspects of their lifestyle, such as feeding, communication and movement. Their ability to hear is therefore crucial to their survival. The St. Lawrence Estuary is renowned for its abundance and diversity of cetaceans. It is also a major shipping lane linking the Great Lakes to the Atlantic Ocean, which can have negative effects on these animals, notably exposure to underwater noise. In the current context of protecting species at risk in Canada, such as the blue whale (*Balaenoptera musculus*) and the beluga whale (*Delphinapterus leucas*), objectively determining the noise levels to which these species are exposed is essential. The MARS (Marine Acoustic Research Station) project is part of this effort. This applied research project aims to understand and measure the underwater noise emitted by ships, and to propose mitigation methods.

The main chapter deals with the study of the acoustic landscape recorded from August to October 2021. Data recorded by the MARS acoustic station deployed in the middle of the Laurentian Channel were used to analyze the relative contribution of major sources to sound levels in three frequency bands used by cetaceans. A model was created to define the noise generated by wind and shipping traffic, and percentages of exposure time to the different sound levels emitted by these sources were obtained. At low frequencies (50 Hz), used by blue whales, the soundscape is dominated by marine traffic 100% of the time. At high frequencies (6300 Hz), used by belugas, the soundscape is dominated by marine traffic 34.2% of the time. These results indicate that it is important to study the different noise contributions in the specific frequencies used by cetacean species, as they do not imply the same effects. The protection strategies implemented are therefore not the same depending on the species considered. Such an analysis of the soundscape therefore provides essential information for the conservation and sustainable development of human activities.

Keywords : Acoustics, Ambient noise, Canada, Cetaceans, Relative contribution, Noise exposure, Quebec, Ships, Soundscape, St.Lawrence.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	xii
AVANT-PROPOS	xv
RÉSUMÉ	xviii
ABSTRACT.....	xx
TABLE DES MATIÈRES	xxii
LISTE DES TABLEAUX.....	xxiv
LISTE DES FIGURES	xxvi
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES.....	xxix
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1. CONTEXTE DE RECHERCHE.....	1
2. OBJECTIFS DE RECHERCHE ET MÉTHODOLOGIE	3
3. ZONE D'ÉTUDE ET CONCEPTS	4
3.1. ESTUAIRE DU SAINT-LAURENT	4
3.1.1. Bathymétrie.....	7
3.1.2. Courants	8
3.1.3. Écologie	10
3.2. MAMMIFÈRES MARINS.....	12
3.2.1. Béluga (<i>Delphinapterus leucas</i>).....	14
3.2.2. Rorqual à bosse (<i>Megaptera novæangliae</i>)	17
3.2.3. Rorqual bleu (<i>Balænoptera musculus</i>).....	19
3.3. PAYSAGE SONORE.....	22
3.3.1. Géophonie	22
3.3.2. Anthropophonie	23
3.3.3. Biophonie.....	25

3.4. POLLUTION SONORE	25
3.4.1. Traffic maritime.....	25
3.4.2. Effets sur la faune marine.....	27
CHAPITRE 1 BRUIT DÉPENDANT DU VENT ET BRUIT DE LA NAVIGATION DANS L'HABITAT DES BALEINES : CARACTÉRISTIQUES ET BILAN SUR TROIS BANDES DE FRÉQUENCE DANS L'ESTUAIRE DU SAINT-LAURENT	30
ABSTRACT	30
1. INTRODUCTION.....	32
1.1. Cohabitation between whales and ships in the St. Lawrence	32
1.2. Ecological relevance of shipping noise.....	33
1.3. Research objectives.....	34
2. MATERIALS & METHOD	36
2.1. Data used: acoustic recordings, AIS, wind	36
2.2. Traffic noise model construction	38
2.3. Wind-generated noise model construction.....	39
3. RESULTS.....	40
3.1. Measurement conditions	40
3.2. Main sources of noise	41
3.3. Shipping noise.....	43
3.4. Wind-generated noise	45
3.5. Calculating the proportion of contribution from each source	48
3.6. Acoustic budgets	49
4. DISCUSSION.....	51
5. CONCLUSION	55
CONCLUSION GÉNÉRALE	59
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	64

LISTE DES TABLEAUX

Table 1. Sound levels recorded by the station from August to October 2021.	42
Table 2. Observed TOL recorded by the station from August to October 2021	45
Table 3. Linear wind-generated noise regression parameters.	48
Table 4. Parameters of the noise classification model in the 300 Hz band.	48
Table 5. Parameters of the noise classification model in the 6300 Hz band.	48

LISTE DES FIGURES

- Figure 1.** L'estuaire et le golfe du Saint-Laurent. Les hydrophones utilisés pour enregistrer les données de cette maîtrise sont indiqués par les points blanc. Les jeux de données bathymétriques utilisés proviennent de la NASA.....2
- Figure 2.** Les apports d'eau douce (en vert) et d'eau salée (en rouge : le mélange des eaux du Gulf Stream et du Labrador ; en bleu : le courant du Labrador) dans l'estuaire Saint-Laurent. Les jeux de données bathymétriques utilisés proviennent de la NASA.5
- Figure 3.** L'estuaire Saint-Laurent, zone de contact entre le fleuve et le golfe et ses secteurs : l'estuaire fluvial, l'estuaire moyen et l'estuaire maritime. Les jeux de données bathymétriques utilisés proviennent de la NASA.6
- Figure 4.** Carte de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent montrant le schéma général de la circulation de surface en été (© Weise et al., 2002).9
- Figure 5.** Carte montrant la division en 4 sous-régions de la production de phytoplancton et de biomasse dans l'estuaire inférieur du Saint-Laurent (© Therriault & Lavasseur, 1985).12
- Figure 6.** Béluga (© Jeanne Mérindol).14
- Figure 7.** Carte du monde représentant approximativement l'aire de répartition du béluga15
- Figure 8.** Rorqual à bosse (© Jeanne Mérindol).17

Figure 9. Carte du monde représentant approximativement l'aire de répartition de la baleine à bosse	18
Figure 10. Rorqual bleu (© GREMM).	19
Figure 11. Carte du monde représentant approximativement l'aire de répartition de la baleine bleue	20
Figure 12. Principales sources contribuant au paysage sonore sous-marin. Sources contribuant à la biophonie, à la géophonie et à l'anthropophonie. Figure d'Amy Dozier. Publiée avec l'autorisation de l'auteur	22
Figure 13. Implementation of the MARS acoustic station in the center of the traffic separation lane of the St. Lawrence seaway, offshore Rimouski. Up: the white points are the location of the hydrophones.	37
Figure 14. Geometry of a MARS station mooring.	38
Figure 15. Noise levels recorded from August to October 2021 as a function of ship distance in the absence of ships in 30 km around the station and strong winds ($< 5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Green dotted lines correspond to 80 th percentile of observed TOL.	39
Figure 16. Distribution of wind speeds (left) and distances from the nearest ship (right) during the acoustic recording period by the station from August to October 2021.	40
Figure 17. Quantiles (5 th -25 th -75 th -95 th), median and probability density of noise levels received by the station from August to October 2021 (blue arrows: 50 Hz, 300 Hz and 6300 Hz).	42
Figure 18. Spectra and frequency distribution of underwater sound sources.....	43

Figure 19. Noise levels recorded by the station from August to October 2021 as a function of ship distance in the absence of strong winds ($< 5 \text{ m.s}^{-1}$). Colored lines correspond to theoretical SPL from Wenz curves (1962): light red line is the “Usual Deep Water Traffic Noise”, red line is the “Usual Shallow Water Traffic Noise”, and red dotted line is the “Heavy Traffic Noise”.44

Figure 20. Correlation between noise levels observed in the absence of ships46

Figure 21. Noise levels recorded from August to October 2021 as a function of wind speed in the absence of ships in 30 km around the station. Colored lines correspond to theoretical SPL from Wenz curves.....46

Figure 22. Noise levels recordings from August to October 2021 as a function of wind speed in the absence of ships in 30 km around the station. Dotted lines are linear regression $+ 2 \times \text{RMSe}$ and bold lines are theoretical SPL from Wenz curves (1962). Darker green points are values classifying as noise generated by wind based on the linear regression.47

Figure 23. TOL from August to October 2021 as a function of surface wind speed in the three third-octaves bands: 50 Hz, 300 Hz and 6300 Hz. Green dots: observations classified as wind-generated sound levels, light red dots: observations classified as nearby traffic sound levels and dark red dots: observations classified as distant traffic sound levels. Ascending green line is the linear regression on winds above $6 \text{ m.s}^{-1} + 2 \times \text{RMSe}$ in the absence of nearby ships. Horizontal green line is the 80th percentile of observations without nearby ships and in the absence of strong winds ($< 5 \text{ m.s}^{-1}$).49

Figure 24. Acoustic budget in percentage of time of dominance of noise sources recorded at MARS station from August to October 2021 in the three third-octaves bands: 50 Hz, 300 Hz and 6300 Hz.....50

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

ESL	Estuaire du Saint-Laurent
EMSL	Estuaire Maritime du Saint-Laurent
SL	Saint-Laurent
ONG	Organisation Non-Gouvernementale
MPO	Ministère Pêches & Océan
AIS	Automatic Identification System
TOL	Tiers Octave Level (Niveau de Tiers d'Octave)
SPL	Sound Pressure Level (Niveau de Pression Sonore)
MARS	Marine Acoustic Research Station (Station de Recherche en Acoustique Marine)
NASA	National Aeronautics and Space Administration (Administration Nationale de l'Espace et de l'Aéronautique)
UICN	Union Internationale pour la Conservation de la Nature

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'introduction générale de ce mémoire présente dans un premier temps le contexte de recherche et le projet dans lequel cette maîtrise s'inscrit. Dans un second temps, les objectifs de recherche et l'approche méthodologique. Enfin, une présentation de la zone d'étude et des concepts liés au projet seront exposés.

1. CONTEXTE DE RECHERCHE

L'estuaire du Saint-Laurent est connu pour l'abondance et la diversité des mammifères marins qui le fréquentent et qui contribuent à son paysage sonore sous-marin (Gosselin et al., 2017 ; Lesage et al., 2007 ; Mosnier et al., 2022 ; Ramp et al., 2014). Cette zone est également une voie maritime majeure reliant l'océan Atlantique aux Grands Lacs. Ces routes maritimes ont des effets sur la vie marine locale (André et al., 2005 ; Foote et al., 2004 ; Holt et al., 2021 ; Kloepper et al., 2010 ; Lusseau et al., 2009), y compris l'exposition au bruit sous-marin et les collisions avec les cétacés (Chion et al., 2017 ; Currie et al., 2023 ; National Marine Fisheries Service (NMFS) et al., 2013 ; Womersley et al., 2022). Dans un contexte actuel de développement durable et de protection des espèces en péril au Canada, comme le rorqual bleu (*Balænoptera musculus*) et le béluga (*Delphineptarus leucas*), il est nécessaire de mener à bien des recherches permettant d'objectiver les effets du bruit sur les mammifères marins.

Le projet de station de recherche en acoustique marine (MARS) est un projet de recherche appliquée qui a pour but de comprendre et de mesurer le bruit sous-marin rayonné par les navires et de proposer des méthodes pertinentes pour sa réduction, en synergie avec les professionnels de la navigation et les régulateurs canadiens. Le programme scientifique du projet MARS se décline en cinq actions et mon sujet de maîtrise s'intègre à l'action 2

« Mesure et interprétation des signatures acoustiques sous-marines rayonnées ». Le projet repose sur la création et le déploiement d'une instrumentation de rang mondial dans l'estuaire du Saint-Laurent à proximité de Rimouski constituée de deux composantes : la station de mesure des signatures acoustiques sous-marines, nommée « la station » dans le texte à venir, et l'équipement à bord pour mesurer l'état vibro-acoustique à l'intérieur des navires. Dans sa version optimale, les bouées de la station assurent l'alimentation en énergie, le transfert des données en temps réel ainsi que leur stockage. La station a été déployée au centre du chenal Laurentien de août à novembre 2021, de mai à octobre 2022 et de mai à octobre 2023 (Fig. 1). Elle permet de mesurer la signature acoustique des navires opérant sur le Saint-Laurent, de décrire le bruit de la navigation dans la zone afin d'évaluer son impact sur la vie marine locale et de trouver des solutions afin de le réduire. La station enregistrant de façon continue, de nombreuses données sont acquises et permettent d'étudier le paysage acoustique sous-marin dans la zone.

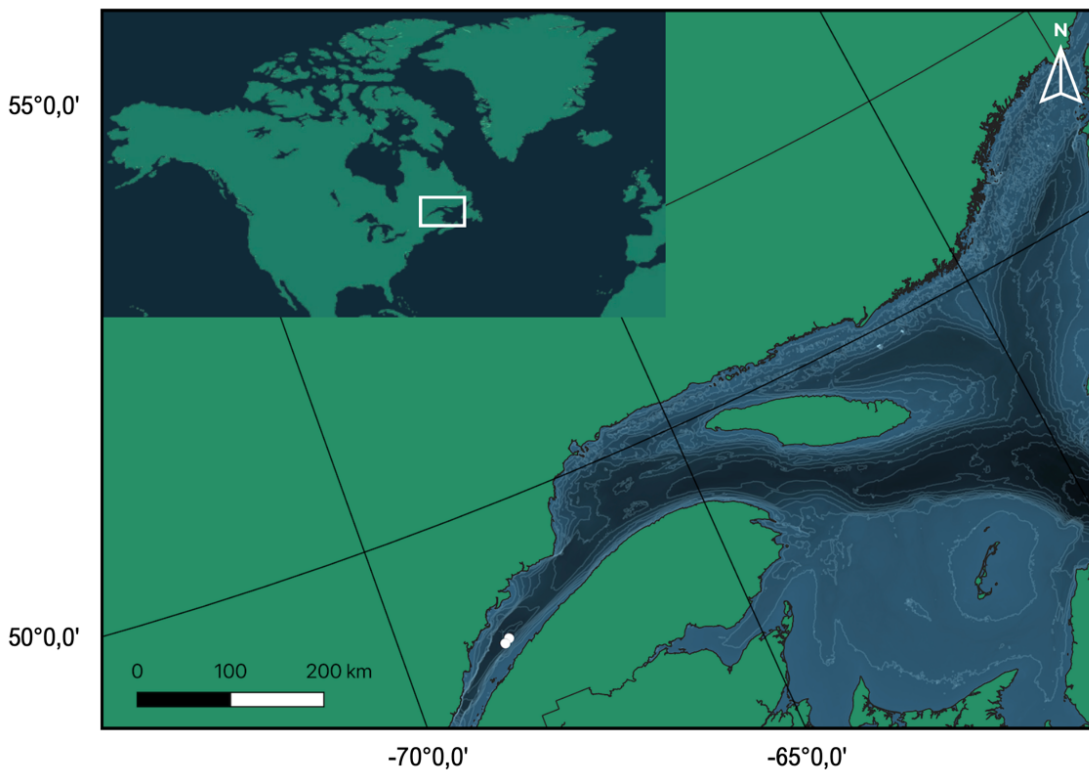


Figure 1. L'estuaire et le golfe du Saint-Laurent. Les hydrophones utilisés pour enregistrer les données de cette maîtrise sont indiqués par les points blanc. Les jeux de données bathymétriques utilisés proviennent de la NASA.

2. OBJECTIFS DE RECHERCHE ET MÉTHODOLOGIE

Les objectifs de cette maîtrise sont de **1)** quantifier les niveaux sonores dans le Saint-Laurent enregistrés par la station MARS, **2)** de déterminer les principales sources qui les génèrent et **3)** de calculer les proportions de contribution de chaque source. Cela nous permettra de savoir quels sont les principaux contributeurs au bruit ambiant, quels niveaux sonores ils génèrent et dans quelles proportions la faune marine y est exposée. Dans ce contexte, ma maîtrise valorisera les données enregistrées par les hydrophones de la station MARS pour **quantifier le bruit du trafic maritime et le bruit généré par le vent dans les bandes de fréquences utilisées par les cétacés du Saint-Laurent : basses (50 Hz), moyennes (300 Hz) et hautes (6300 Hz)**. Mes résultats permettront de connaître la contribution relative de ces deux sources majeures aux niveaux sonores dans ces trois bandes de fréquences durant la période d'enregistrement 2021. Un modèle sera créé pour définir et prédire le bruit généré par le trafic maritime lointain, proche et par le vent. Ainsi, les pourcentages de temps d'exposition aux différentes sources de bruit de trois espèces de mammifères marins emblématiques du Saint-Laurent pourront être établis. Une telle analyse du paysage sonore fournira des informations précieuses à des fins de conservation et de développement durable des activités humaines.

Les sons enregistrés par les hydrophones de la station sont directement transmis sur une plateforme à terre à Rimouski. Ils ont une durée de 5 min et sont échantillonnés à 16 kHz. Pour atteindre à ces objectifs, dans un premier temps, les niveaux sonores sur des bandes de tiers d'octave sont extraits sur la totalité des enregistrements acoustiques grâce à l'outil PAMGuide (Merchant et al., 2015). À partir de ces données, le bruit ambiant et les niveaux sonores mesurés à la station par bandes de fréquences seront analysés. Les densités de probabilité mensuelles des niveaux sonores seront calculées et comparées aux travaux précédemment réalisés dans le Saint-Laurent (Aulanier F et al., 2017; Gervaise et al., 2012; Simard et al., 2010). Les sources responsables de ces niveaux sonores (géophonie ou anthropophonie) seront identifiées grâce à leurs fréquences caractéristiques et à leur forme spectrale (Wenz G.W, 1962). L'utilisation de données environnementales permettra par la

suite de définir les métriques pertinentes pour l'analyse de ces sources. Pour l'anthropophonie, le recensement des navires qui passent dans la zone de la station, avec un AIS (« Automatic Identification System ») sera réalisé afin d'avoir des données sur le trafic maritime dans un rayon de 100 km autour de la station. Ainsi, les niveaux de bruit à la station aux fréquences caractéristiques du trafic maritime seront mis en parallèle avec la présence de navires à proximité de la station. Il sera alors possible de quantifier la contribution des bateaux au niveau sonore en fonction de leur distance à la station. Pour la géophonie, les niveaux sonores aux fréquences caractéristiques du vent seront mis en parallèle avec les données de vitesse du vent (en km/h) collectées par la bouée météorologique PMZA-RIKI, située à proximité de la station. La méthodologie présentée dans Vagle et al., (1990) qui consiste à l'utilisation d'un modèle linéaire pour calculer la dépendance entre la vitesse du vent et les niveaux sonores sera suivie. Ainsi, il sera possible de déterminer la contribution du vent au paysage acoustique et sa vitesse minimale pour une contribution majeure. À partir de là, les contributions relatives de ces sources aux niveaux sonores pourront être décrites dans les trois bandes de fréquences choisies. Ces résultats seront mis en perspective avec les prédictions du Soundscape Atlas (<https://soundscape-atlas.uqar.ca>) et les seuils établis dans la littérature concernant les effets du bruit de la navigation sur les mammifères marins de la zone d'étude (Kastelein et al., 2013; National Marine Fisheries Service, 2018; Tougaard, 2021). Ainsi, le paysage sonore mesuré à la station sera construit et un outil pour déterminer la source des niveaux sonores observés sera opérationnel.

3. ZONE D'ÉTUDE ET CONCEPTS

3.1. ESTUAIRE DU SAINT-LAURENT

L'estuaire du Saint-Laurent est situé au Québec dans l'Est du Canada (Fig.1). Il s'agit d'un des plus grands bassins estuariens au monde avec une surface d'environ 80 000 km². Il atteint une largeur de 60 km et une profondeur de 355 m dans la partie centrale de l'estuaire, dans le chenal Laurentien (Duchesne et al., 2010 ; M. I. El-Sabh & Silverberg, 1990). Ce

Le système unique est approvisionné en eau douce et en eau salée en fonction du débit du fleuve et des marées (Saucier et al., 2009). L'eau douce provient du même bassin versant que les grands lacs et de la côte atlantique de l'Amérique du Nord (Dufour et al., 2010). L'eau salée provient des courants océaniques de l'Atlantique Nord : les eaux du Gulf Stream et les eaux du Labrador se mélangent au large du chenal Laurentien à proportion égale et entrent en profondeur par le détroit de Cabot (Lauzier & Trites, 1958) (Fig. 2).

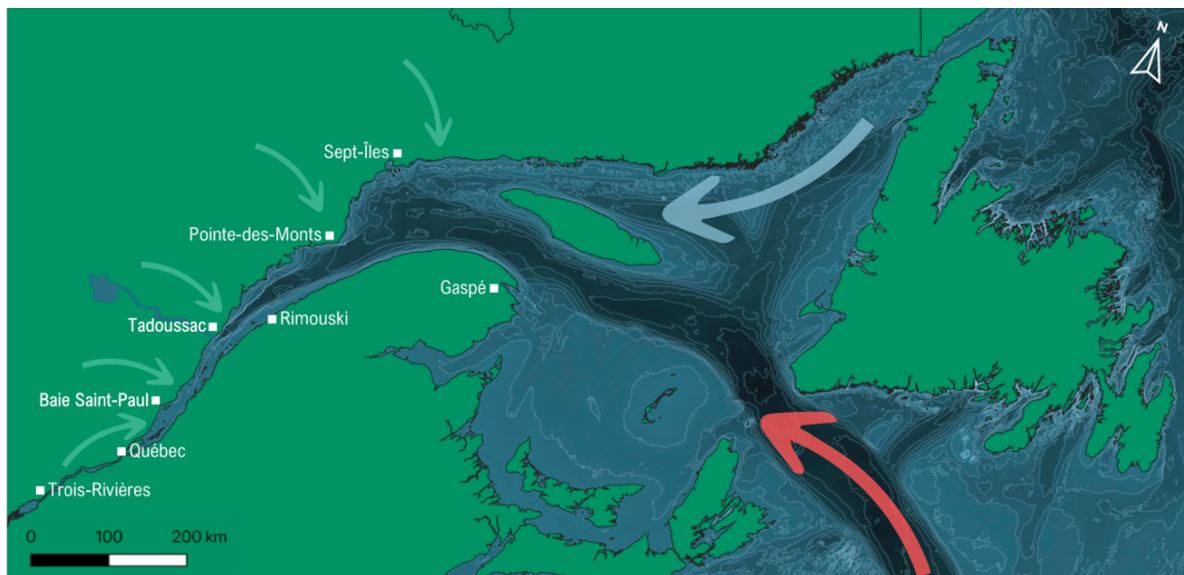


Figure 2. Les apports d'eau douce (en vert) et d'eau salée (en rouge : le mélange des eaux du Gulf Stream et du Labrador ; en bleu : le courant du Labrador) dans l'estuaire Saint-Laurent. Les jeux de données bathymétriques utilisés proviennent de la NASA.

Un estuaire est défini par Ketchum & Rawn (1951) comme étant un lieu où se rencontrent les eaux douces d'un fleuve et les eaux salées de l'océan. Cette rencontre se traduit par un gradient de salinité horizontal où les eaux salées sont diluées de façon croissante à mesure que l'on monte dans l'estuaire. La définition d'un estuaire est complétée par Pritchard en 1967 qui y ajoute des notions de patrons de circulation et de mélange régis par la topographie du fond et des côtes. Ainsi, ces milieux sont caractérisés par une circulation en plusieurs couches en fonction des saisons (El-Sabh & Silverberg, 1990). En hiver, la colonne d'eau dans les régions plus profondes de l'estuaire se compose de deux couches séparées par une zone de transition. La couche supérieure est mélangée par les vents d'hiver et contient de l'eau froide peu salée. La couche inférieure, relativement

chaude et salée, provient du large et pénètre par des ravins en profondeur. En été, la colonne d'eau est verticalement structurée en trois couches : une mince couche supérieure chaude (30-40 m) créée par un réchauffement saisonnier, une couche intermédiaire froide (40-150 m) produite par les eaux refroidies en hiver et la couche de fond chaude qui reste inchangée (Drinkwater & Gilbert, 2004). La couche intermédiaire froide est présente dans l'estuaire du printemps à l'automne (Gilbert & Pettigrew, 1997). Elle provient du refroidissement de l'eau en hiver, du relargage des saumures lors de la formation de glace de mer et de l'augmentation de la densité de l'eau (De Vernal et al., 2011). Un écoulement d'eau douce en surface vers l'océan Atlantique dont le temps de renouvellement est de quelques mois ; et la remontée des eaux salées en profondeur vers Québec dont le temps de renouvellement est de quelques années sont observés (El-Sabh & Silverberg, 1990 ; Saucier et al., 2009). Plusieurs caractéristiques intéressantes sont à souligner dans le système estuarien du Saint-Laurent et de nombreuses recherches sont menées encore aujourd'hui afin de comprendre le fonctionnement de cet estuaire unique et de suivre son évolution dans le temps.

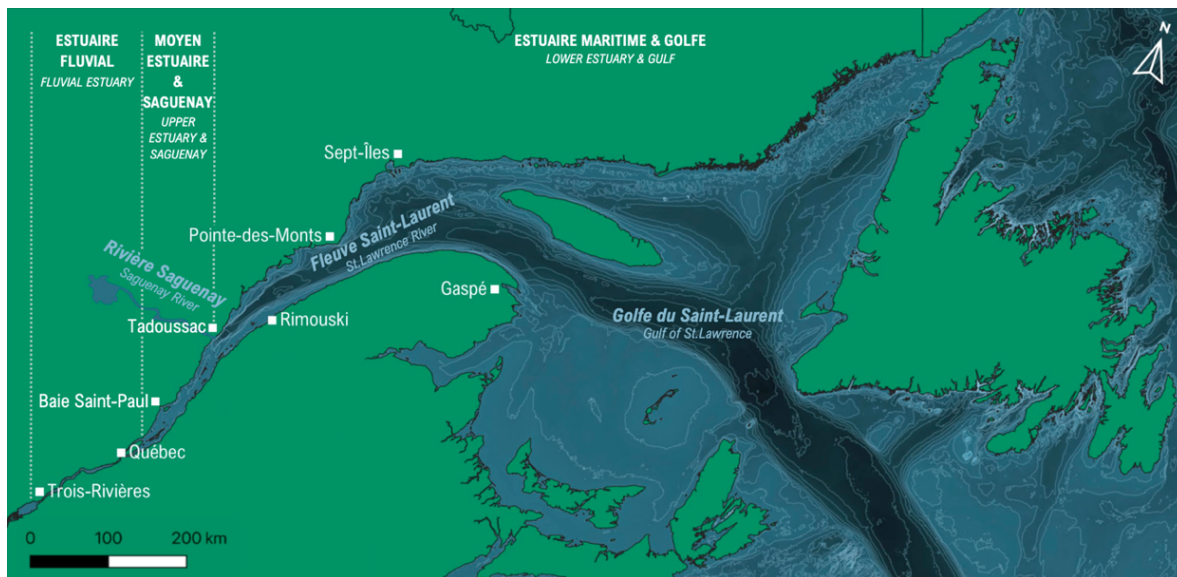


Figure 3. L'estuaire Saint-Laurent, zone de contact entre le fleuve et le golfe et ses secteurs : l'estuaire fluvial, l'estuaire moyen et l'estuaire maritime. Les jeux de données bathymétriques utilisés proviennent de la NASA.

L'estuaire du Saint-Laurent (ESL) peut être séparé en trois parties, chacune plus grande que la plupart des estuaires des plaines côtières (Fig. 3). L'estuaire moyen qui débute

au niveau de l'Île d'Orléans – la limite supérieure d'entrée des eaux océaniques – est peu profond et présente de forts gradients de salinité. Il est similaire à un estuaire typique partiellement stratifié et est plus profond que de nombreux estuaires de vallées fluviales inondées (Simons et al., 2010 ; NOAA). L'estuaire maritime (EMSL) prend naissance à l'embouchure du Fjord du Saguenay où se creuse le chenal Laurentien et se termine au niveau de Pointe-des-Monts. Il est plus marin et présente également les plus grandes profondeurs (> 300 m) par rapport aux autres estuaires dans le monde (e.g. Chesapeake Bay aux États-Unis, Spencer Gulf dans le sud de l'Australie, le Golfe de Suez en Égypte). Et enfin, le Golfe qui débute au niveau de Pointe-des-Monts et qui est une mer semi-fermée d'une superficie d'environ 2,4 10⁵ km² ouverte sur l'océan Atlantique par le détroit de Cabot et le détroit de Belle-Isle (Lavigne et al., 1996 ; Saucier et al., 2003).

Avec une grande partie de l'Amérique du Nord comme bassin versant, le fleuve Saint-Laurent fournit un débit moyen d'eau douce de $11,9 \times 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, proche de celui du Mississippi. Le rejet d'environ 4 millions de tonnes par année de matières en suspension est toutefois deux fois moins grand que celui du Mississippi. Cela s'explique par le fait que les Grands Lacs retiennent la plupart des matières solides. La taille du Saint-Laurent permet la coexistence de nombreux petits sous-environnements. Ceux-ci représentent différentes combinaisons de topographie et de sédiments hérités d'événements du Quaternaire, d'apports modernes d'eau douce et de particules, de forces de marée et d'interactions biologiques et chimiques.

3.1.1. Bathymétrie

L'ESL est caractérisé par une géologie complexe unique du fait de sa position entre le Bouclier précambrien composé de roches cristallines au Nord et de roches sédimentaires déformées des Appalaches au Sud (Duchesne et al., 2007). Il est constitué du fjord du Saguenay et du chenal Laurentien, et est défini comme étant une vallée glaciaire sous-marine en « U » (St-Onge et al., 2003) datant du Pléistocène qui s'étend du bout du plateau continental à l'embouchure du Fjord du Saguenay. Cette dernière s'est créée lors du dernier maximum glaciaire par les avancées et les retraits de l'Inlandsis laurentidien (Loring & Nota,

1973 ; Syvitski & Praeg, 1983). On y trouve donc une grande quantité de sédiments glaciaires et post-glaciaires (Praeg et Syvitski 1989 ; St-Onge et al., 2008 ; Duchesne et al., 2010). La rive Nord est caractérisée par un littoral escarpé qui marque la fin du Bouclier précambrien tandis que la rive Sud est caractérisée par un dénivelé plus faible (D'Anglejan, 1990). Du fait de sa bathymétrie, le chenal Laurentien est un site de sédimentation actif avec des apports de l'estuaire et du Golfe. La bathymétrie complexe du Saint-Laurent affecte l'hydrodynamisme de la zone et ces mêmes courants modifient les fonds marins en influençant les paramètres sédimentaires du milieu (Pinet et al., 2011). Par exemple, la bathymétrie de la région de Tadoussac est caractérisée par l'enfoncement du chenal Laurentien de 300 m de profondeur au niveau d'un seuil à l'embouchure du fjord du Saguenay qui créait un phénomène d'upwelling à l'origine d'une aire d'alimentation importante pour les espèces de baleines (Marchand et al., 1999 ; Smith & Gaskin, 1983). La bathymétrie particulière autour de l'Île d'Anticosti engendre également des phénomènes d'upwelling qui jouent un rôle dans la distribution du krill (*Meganyctiphanes norvegica*) et qui en fait ainsi une région importante pour l'alimentation des cétacés, notamment du rorqual bleu de l'Atlantique Nord-Ouest (ANO) (Plourde et al., 2017).

3.1.2. Courants

Les trois parties de l'ESL se démarque donc en fonction de la salinité des eaux : l'estuaire moyen, l'estuaire maritime et le golfe (Lavigne et al., 1996). La dynamique estuarienne et les courants de marées régissent les paramètres physico-chimiques des masses d'eau du Saint-Laurent (SL) (Bourgault et al., 2001 ; Saucier & Chassé, 2000). Cependant, une influence de la variabilité saisonnière, spatiale et temporelle de la stratification de la zone est également observée (El-Sabh & Murty, 1990).

Étant situé en climat tempéré froid, la glace de mer se forme de façon saisonnière, ce qui influence ses couches d'eau à l'échelle annuelle avec la création d'une couche intermédiaire froide l'été (cf. 3.1) (Banjos, 1966) et de marées qui ont un effet jusqu'à

Montréal (El-Sabh & Silverberg, 1990). À l'extrémité aval de l'estuaire, le courant de Gaspé domine les conditions d'écoulement. Tel que mentionné précédemment, le débit du fleuve Saint-Laurent entraîne un jet flottant intense le long de la rive sud de l'ESL. Ce jet sort de l'estuaire et s'écoule le long de la péninsule de Gaspé où il est augmenté par le gyre cyclonique d'Anticosti dans le nord-ouest du golfe du Saint-Laurent (El-Sabh, 1976) pour former le courant de Gaspé (Fig. 4). Ce jet côtier est particulièrement fort le long de la péninsule de Gaspé et atteint un transport géostrophique de $3 \times 10^5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Benoit et al., 1985).

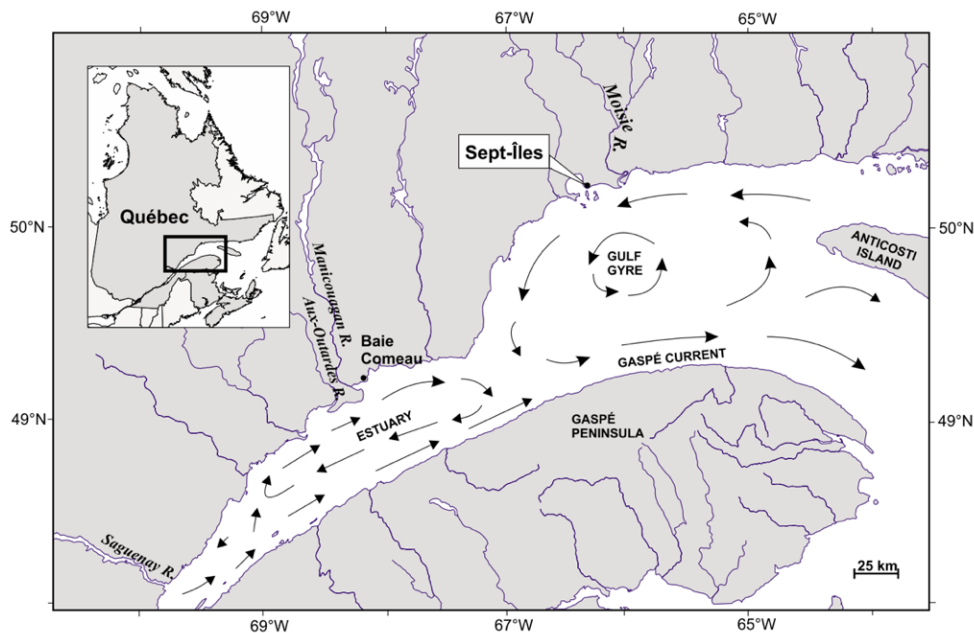


Figure 4. Carte de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent montrant le schéma général de la circulation de surface en été (© Weise et al., 2002).

Le fort régime de courants de marée et la bathymétrie variable dans les zones amont du Saint-Laurent offrent des conditions favorables à la frontogenèse en de nombreux endroits. Près du fjord du Saguenay, au moins deux mécanismes différents de frontogenèse sont à l'œuvre. L'estuaire maritime est ainsi séparé d'une « barrière » qui influence l'hydrographie de cette région (Ingram, 1976 ; Therriault & Lacroix, 1976) . Au niveau de ce seuil, les marées induisent une remontée semi-diurne de la couche intermédiaire froide de l'estuaire maritime (Therriault & Lacroix, 1976). Ces apports nutritifs associées à l'ensoleillement en surface permettent le développement du phytoplancton qui constitue le premier maillon de la chaîne alimentaire du zooplancton (i.e. le krill), des poissons (i.e., le

capelan, le lançon, l'éperlan), des phoques, des baleines, etc (Edds & Macfarlane, 1987 ; Marchand et al., 1999). Les phénomènes frontaux associés au courant de Gaspé ont été examinés par Tang (1980a).

3.1.3. Écologie

Dans l'environnement marin, la biomasse et la production de phytoplancton sont généralement contrôlées par plusieurs facteurs tels que la température et la salinité qui affectent directement les organismes (Therriault & Levasseur, 1985). Tandis que d'autres facteurs, tels que le mélange vertical et la turbidité, influencent le phytoplancton par l'intermédiaire de la lumière et/ou des nutriments (Legendre & Demers, 1984). Il convient toutefois de faire une distinction entre les environnements océaniques (au large) et côtiers (estuariens et côtiers), car selon la zone étudiée, chaque facteur aura une signification ou une importance relative différente pour le phytoplancton (Legendre & Demers, 1984). Par exemple, l'écoulement d'eau douce, la salinité, la turbidité, la topographie et les marées exercent une influence beaucoup plus prononcée sur le phytoplancton dans les eaux de l'ESL, qu'au large, en pleine mer (Legendre & Demers, 1984).

Les distributions complexes de la production de phytoplancton, de la biomasse et des variables chimiques et géochimiques observées dans l'ESL sont principalement contrôlées par les processus physiques, mais également dus à la taille de l'ESL combinées à une grande variabilité - associée au cycle des marées saisonnières, à la pression atmosphérique et au forçage de flottabilité qui produisent un champ de courant complexe (Bourgault et al., 2001; Saucier & Chassé, 2000). À partir d'une étude de deux ans sur la production phytoplanctonique, Therriault et Levasseur (1985) ont divisé l'ESL en quatre régions distinctes. Elles ont été définies sur la base de patrons annuelles saisonniers dans la distribution spatiale de la production et de la biomasse de phytoplancton grâce à l'analyse des variables physico-chimiques (Fig. 5). Chaque région correspond à l'une des caractéristiques de méso-échelle décrites précédemment et est dominée par des processus

hydrodynamiques différents (Ingram & El-Sabh, 1990). La région I correspond à la sortie de l'estuaire moyen et du Saguenay le long de la rive sud. Elle est la moins productive, a une turbidité élevée et une colonne d'eau instable. Elle est caractérisée par la présence de copépodes planctoniques (*Euryterrwra affinis*) et supra benthiques (*Ectinosoma curticorne*). Les processus de la région II sont principalement contrôlés par l'activité des marées internes et le mélange vertical à la tête du chenal Laurentien. Le zooplancton y est dominé par *Acartia longiremis*, *Eurytemora herdmani* et *Calanus finmarchicus*. La région III occupe la majeure partie du centre de l'estuaire et est la plus productive. Elle est sous l'influence du panache d'eau douce des rivières Manicouagan et Outardes, et du mouvement tourbillonnaire. Elle est caractérisée par la présence des copépodes dominants appartenant au genre *Calanus*, principalement *C. finmarchicus*. Les autres taxons importants sont les euphausides *Thysanoessa raschi* et *Meganyctiphanes norvegica*, qui se concentrent en couches denses et diffuses à la tête du chenal. La région IV, à la limite entre l'estuaire et le golfe, est la plus stable verticalement. Therriault et Levasseur (1985) ont conclu que l'ESL ne pouvait être considéré comme une seule entité puisqu'il existe des différences régionales dans l'hydrodynamique et le rendement du phytoplancton. Le zooplancton de l'estuaire maritime est composé de populations avec un recrutement perturbé par l'évacuation rapide des eaux de surface associée à la température froide de la colonne d'eau. Sa composition et sa répartition spatiale semblent dépendre majoritairement de processus de déplacements contrôlés par la circulation estuarienne. Les processus physiques explicités précédemment - propres à cet environnement à forte énergie - génèrent une forte variabilité dans la répartition spatiale du zooplancton à petite et moyenne échelle. Le krill est condensé verticalement par les courants de marée qui remontent le long des talus des chenaux. Ce processus est plus intense à la tête des chenaux où le phénomène d'upwelling est amplifié. Il est rehaussé par endroits par l'upwelling côtier dû au vent. Des poissons pélagiques fourragers tel que le capelan, se concentrent aussi à la tête du chenal et à l'entrée du fjord sous l'action de l'upwelling, des courants de marée et des fronts. Ils contribuent à nourrir les baleines et les oiseaux marins.

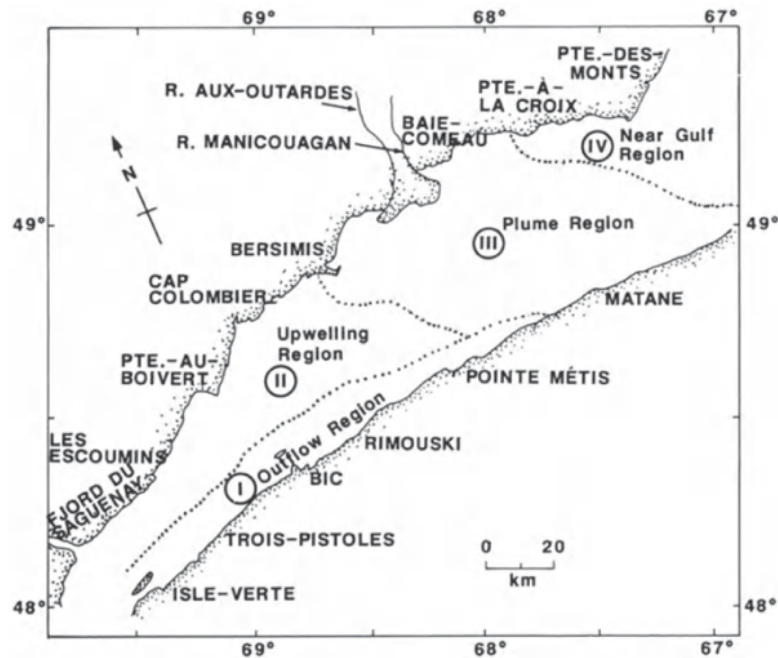


Figure 5. Carte montrant la division en 4 sous-régions de la production de phytoplancton et de biomasse dans l'estuaire inférieur du Saint-Laurent (© Therriault & Lavasseur, 1985).

3.2. MAMMIFÈRES MARINS

Jacques Cartier a été le premier à notifier l'abondance des mammifères marins dans le golfe du Saint-Laurent lors de ses voyages vers le Nouveau Monde entre 1534 et 1542. D'autres explorateurs et baleiniers après lui ont également noté leur abondance dans l'estuaire (p. ex. Charlevoix, 1744 ; Prince, 1905 ; Saint-Cyr, 1886). À la suite de leurs visites, les recherches archéologiques et les archives nationales ont également révélé une longue histoire d'exploitation des mammifères marins dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent (Barkham, 1984 ; Comeau, 1945 ; Dickinson & Sanger, 2005). Au début de l'ère moderne, la proximité de ces concentrations de mammifères marins avec les zones urbaines a contribué à soutenir une chasse commerciale saisonnière (Lesage et al., 2007). Cette chasse est maintenant réglementée ou interdite dans ces régions. Désormais, les régions autour de Tadoussac dans l'estuaire du Saint-Laurent, et près de Gaspé, des îles Mingan, du sud-est de l'Île-du-Prince-

Édouard et des îles de la Madeleine ont vu se développer des industries d'observation des mammifères marins, qui constituent un attrait touristique important.

La diversité des mammifères marins de l'ESL est composée de deux ordres : les cétacés Cetacea (Mysticetes et Odontocetes) et les pinnipèdes Pinnipedia (Odobenidae et Phocidae). Ces espèces fréquentent l'estuaire et contribuent à son paysage sonore sous-marin. (Edds et al., 1986 ; Kingsley & Reeves, 1998). Leur abondance dans le golfe et l'estuaire résulte d'une combinaison de ressources alimentaires abondantes (cf. 3.1.3), de zones d'échouerie abritées et de glace stable. Les données quantitatives permettant de décrire cette abondance saisonnière et la distribution de ces espèces ont augmenté ces dernières années grâce aux efforts du gouvernement canadien et de certaines organisations non gouvernementales (ONG). Cependant, les études menées diffèrent en termes de type, de détail et de zone couverte. Les recherches sur les cétacés ont été effectuées principalement dans l'estuaire et dans certains secteurs du nord du golfe du Saint-Laurent et près du Cap-Breton dans le sud du golfe (c.f. Edds & Macfarlane, 1987 ; Kingsley, 1998). Des informations quantitatives sur la distribution, la saisonnalité, le régime alimentaire et la reproduction ont été recueillies mais les résultats ne sont pas tous disponibles dans la littérature. Sears et Williamson (1982) et Kingsley et Reeves (1998) ont été parmi les premiers à décrire la distribution et l'abondance des cétacés dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent. Depuis, de nombreuses études ont été publiées par le Ministère Pêches et Océans (MPO) Canada (Mosnier et al., 2022). D'autres études ont fourni des informations pour des espèces et des zones spécifiques (Doniol-Valcroze et al., 2007 ; Edds & Macfarlane, 1987 ; Gosselin et al., 2017).

Au total, jusqu'à 16 espèces de cétacés et de pinnipèdes peuvent visiter l'estuaire au cours d'une saison. La région compte des populations résidentes de bélugas et de phoques communs ainsi que des populations migratrices de rorquals à bosse, de petits rorquals, de rorquals bleus et de rorquals communs qui utilisent l'estuaire comme aire d'alimentation estivale en raison de ses fortes concentrations d'espèces fourragères. En effet, c'est la région de plus forte agrégation de krill documentée à ce jour dans le nord-ouest Atlantique (Simard, 2009). Cela est dû aux phénomènes de pompage, de rétention et d'apport de krill adulte

provenant du golfe du Saint-Laurent par la circulation estuarienne du Saint-Laurent explicités plus haut.

3.2.1. Béluga (*Delphinapterus leucas*)

Les bélugas (Fig.6) sont des mammifères marins arctiques et subarctiques à dents (sous-ordre Odonctocètes) appartenant à la famille des Monodontidae. Ils sont sociables et grégaires, ce qui implique que la plupart du temps ils vivent, chassent et migrent en troupes, allant de petit groupe de 2 à 10 individus à des centaines voire des milliers d'individus (O'Corry-Crowe, 2009). La taille du béluga se situe entre 3,5 et 5,5 m (O'Corry-Crowe, 2009). Les bélugas sont adaptés à la vie dans l'Arctique, en eaux froides, et cela se constate à travers des caractéristiques anatomiques et physiologiques différentes des autres cétacés. Notamment, leur couleur blanche, leur épaisse couche de graisse isolante (O'Corry-Crowe, 2009) et l'absence de nageoire dorsale qui leur permettent de nager aisément sous la glace (Perrin et al., 2000).



Figure 6. Béluga (© Jeanne Mérindol).

Dans la plupart des régions, les populations de bélugas migrent dans la direction de l'avancée du front de glace polaire (Fig.7). Ils se déplacent vers le sud à l'automne, lorsque la glace se forme, puis reviennent se nourrir au printemps, lorsque la glace se brise. On les trouve également près de l'embouchure des rivières ou des fleuves, comme la population des bélugas du Saint-Laurent. Leur population est située à la limite sud de la répartition mondiale de l'espèce (Brodie, 1989). Il s'agit d'une population fermée car ses individus vivent en permanence dans l'estuaire (Ménard et al., 2018) (Fig.7). Sa répartition a été décrite pour la

première fois par Vladykov (1944) constatant leurs concentrations aux embouchures des rivières Saguenay et Manicouagan en été (Béland et al., 1987 ; Boivin & INESL, 1990 ; Gosselin et al., 2007, 2001 ; Kingsley, 1998, 1996, 1993; Kingsley & Hammill, 1991 ; Michaud, 1993 ; Michaud & Chadenet, 1990 ; Pippard, 1985 ; Pippard & Malcolm, 1978 ; Sears & Williamson, 1982 ; Sergeant & Hoek, 1988 ; Sergeant & Brodie, 1975). En hiver, la population se déplace dans le secteur aval de l'estuaire (entre Forestville et Pointe des Monts). Ils se nourrissent d'une grande variété de proies benthiques et pélagiques, tant invertébrées que vertébrées. Dans certaines parties de leur aire de répartition, dans les eaux littorales, ils se nourrissent de poissons, comme le saumon (*Oncorhynchus spp.*), le hareng (*Clupea harengus*), le capelan (*Mallotus villosus*), l'éperlan (*Osmerus mordax*) et la morue safranée (*Eleginus gracilis*), ainsi que des crevettes, des crabes et des mollusques (Seaman et al., 1982 ; Kleinenberg et al., 1964).



Figure 7. Carte du monde représentant approximativement l'aire de répartition du béluga (© NOAA Fisheries).

Chassée, la population de bélugas de l'ESL passa d'un effectif initial estimé entre 7 800 et 10 000 individus en 1866, à environ 1 000 individus en 1985 (Hammill et al., 2007 ; MPO, 2005 ; Reeves & Mitchell, 1984). En 1979, leur population a été protégée de la chasse et du dérangement en 1979 par la Loi sur les Pêcheries de l'époque (Règlement concernant la protection du béluga). Ayant été exposé à toutes les pressions que peuvent exercer les

activités humaines sur les mammifères marins e.g. la chasse, les pollutions chimiques, la pollution sonore (Ménard et al., 2014 ; MPO, 2012) et à la suite de plusieurs travaux de recherche démontrant que le béluga était dans une situation précaire (Pippard, 1985a ; Pippard & Malcom, 1978), Léone Pippard initia un mouvement pour la création du parc marin Saguenay-Saint-Laurent (Pippard, 1990). Le béluga a été classé « menacé » par le Comité sur la Situation des Espèces en Péril au Canada (COSEPAC) en mai 2004, puis « en voie de disparition » en 2014 et apparaît comme « menacé » sur la Liste des espèces susceptibles d'être désignées menacées ou vulnérables au Québec depuis 2000. De son côté, l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (UICN) lui a attribué le statut « quasi menacé ».

Leur ouïe est très développée et leur écholocation leur permettent de se déplacer et de trouver des trous de respiration sous la banquise (Castellote et al., 2014 ; Ridgway et al., 2001 ; Turl et al., 1987). Leur front bombé contient un organe utilisé pour l'écholocation appelé « melon » (Haley, 1986) dont la forme change pendant l'émission des sons (O'Corry-Crowe, 2009 ; Turl, C.W., 1990). Cet organe contient des acides gras d'une composition très différente de leur graisse corporelle (60,1% d'acides isovalériques et 16,9% d'acides ramifiés à longue chaîne) qui pourraient jouer un rôle dans son système d'écholocation (Litchfi et al., 1971). Les bélugas possèdent l'un des répertoires vocaux les plus diversifiés de tous les mammifères marins (Jefferson et al, 1993) et ont longtemps été appelés le « canaris des mers » par les marins (Sjare, 1991). Les appels communicatifs se divisent en deux grandes catégories : les sifflements et les appels pulsés. Ils sont généralement émis à des fréquences comprises entre 0,1 et 12 kHz (Vergara et al., 2010 ; Sjare and Smith, 1996a, b ; Au et al. 1985, 1987 ; Au 1993). Plus de 50 types d'appels ont été décrits, parmi eux, les grognements, sifflements, bourdonnements, trilles et rugissements (O'Corry-Crowe, 2009). Les bélugas sont capables de produire des appels individuels distincts pour maintenir le contact entre proches parents et peuvent procéder à des échanges de signaux acoustiques (Belkovitch & Shekotov, 1993). Une variation géographique a été identifiée, cependant, aucune différence régionale ou dialecte n'a pu être clairement démontré.

3.2.2. Rorqual à bosse (*Megaptera novæangliæ*)

Les rorquals à bosse (Fig.8) sont des mammifères marins à fanons (sous-ordre Mysticètes) appartenant à la famille des Balaenopteridae (Clapham, 2018). Le plus souvent solitaires, ils peuvent se présenter en petits groupes instables comptant entre 10 à 15 individus (Clapham, 2009) et se regrouper dans les aires d'alimentation et de reproduction (Clapham, 2000). La taille des rorquals à bosse se situe entre 16 et 17 m (Clapham & Mead, 1999). Le crâne des rorquals à bosse se distingue facilement de celui des autres Mysticètes par l'étroitesse du rostre. Les rorquals à bosse possèdent entre 270 et 400 fanons - lames cornées qui garnissent la mâchoire supérieure - de chaque côté de la bouche (Clapham, 2009).



Figure 8. Rorqual à bosse (© Jeanne Mérindol).

Les rorquals à bosses sont cosmopolites, présents dans la plupart des océans du monde (Fig.9). Il s'agit d'une espèce très migratrice (Palsbøll et al., 1996), qui vit du printemps à l'automne dans les aires d'alimentation dans les eaux de moyennes ou hautes latitudes, et qui hiverne dans les aires de mise bas dans les tropiques, où elle ne s'alimente pas (Calambokidis et al., 2001 ; Calambokidis et al., 2000 ; Corkeron & Connor, 1999 ; Dawbin, 1966). La population de l'Atlantique Nord retourne chaque printemps dans des zones d'alimentation spécifiques du golfe du Maine, du golfe du Saint-Laurent, de Terre-Neuve, du Labrador, du Groenland, de l'Islande et de la Norvège (Clapham, 2009) et migre en hiver vers une zone de reproduction commune dans les Antilles, où les individus s'accouplent et mettent bas (Katona & Beard, 1990). Ils ont un régime alimentaire généraliste, se nourrissant d'euphausiacés et de diverses espèces de petits poissons en bancs dont le

hareng, le capelan, le lançon (*Ammodytes spp.*) et le maquereau (*Scomber scombrus*). Les rorquals à bosse semblent être la seule espèce de Mysticètes à utiliser des bulles pour piéger les bancs de poissons. Il s'agit d'une technique de chasse unique qui consiste à souffler des rideaux de bulles autour ou sous les bancs de poissons, puis à s'élancer bouche ouverte, au centre de la structure de bulles, là où sont regroupés les proies (Jurasz & Jurasz, 1979 ; Hain et al., 1982). Le rorqual à bosse est classé « non en péril » par le Comité sur la Situation des Espèces en Péril au Canada (COSEPAC) et ne figure plus sur la Liste des espèces susceptibles d'être désignées menacées ou vulnérables au Québec depuis 2003 (Cooke, 2018). De son côté, l'UICN lui a attribué le statut « préoccupation mineure » depuis 2008. Tandis qu'aux États-Unis, il est considéré comme une « espèce en danger » selon le Endangered Species Act.

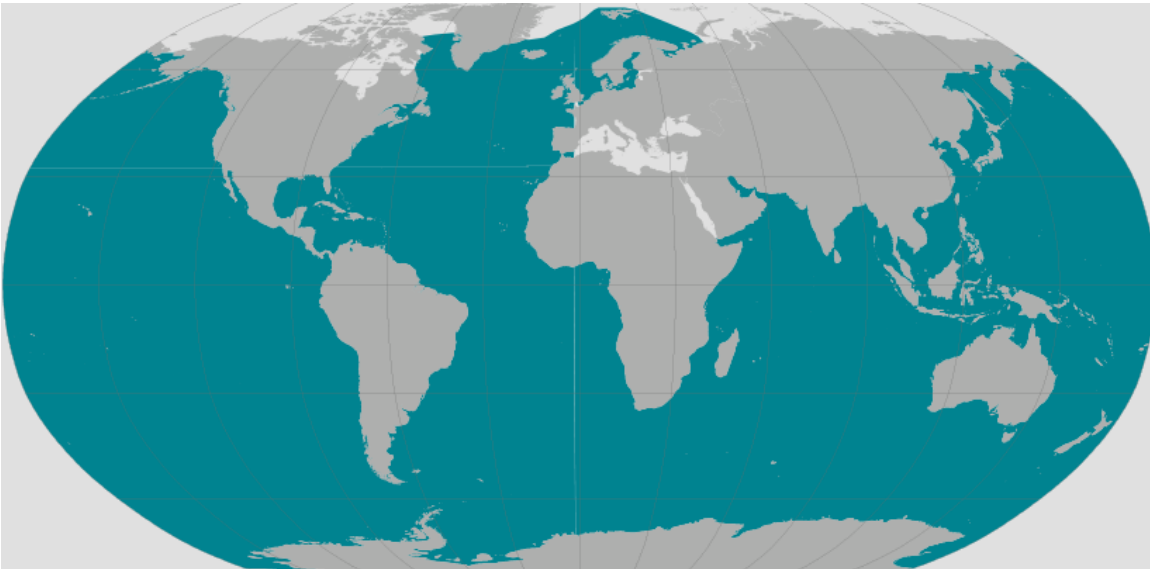


Figure 9. Carte du monde représentant approximativement l'aire de répartition de la baleine à bosse (© NOAA Fisheries).

Les rorquals à bosse émettent une grande variété de sons, allant des gémissements et des cris aux grognements et aux ronflements, selon des schémas longs et prévisibles, sur des fréquences audibles par l'homme (Payne & McVay, 1971) et qui sont considérés « les chants les plus complexes du règne animal » par Philip Clapham (1996). En hiver, ils produisent des « sons sociaux » (Pack et al., 2005 ; Silber, 1986) ainsi qu'une série complexe et structurée de vocalisations appelée « chant » (Payne et al., 1983 ; Payne & McVay, 1971 ; Winn &

Winn, 1978). Alors que les sons sociaux semblent être produits aussi bien par les femelles que par les mâles (Pack et al., 2005), les chants sont produits exclusivement par les rorquals à bosse mâles (Darling & Bérubé, 2001; Glockner, 1983). La fonction première de ces chants semble être d'attirer les femelles, bien qu'un rôle dans le tri de la dominance ou le comportement coopératif entre les mâles ait également été suggéré par (Darling et al., 2006). Les chants des rorquals à bosse sont transmis culturellement (Guinee et al. 1983 ; Noad et al., 2000). Lorsque des changements dans le chant se produisent au cours d'une saison, tous les chanteurs font les mêmes changements approximativement au même moment pour maintenir la concordance des chants (Smith et al., 2008 ; Cerchio et al., 2001 ; Guan et al. 1999 ; Cato 1991 ; Dawbin & Eyre 1991 ; Helweg et al. 1990 ; Payne et al. 1983 ; Winn et al., 1981).

3.2.3. Rorqual bleu (*Balaenoptera musculus*)

Les rorquals bleus (Fig.10) sont des mammifères marins à fanons (sous-ordre Mysticètes) appartenant à la famille des Balaenopteridae, comme les rorquals à bosse. Les rorquals bleus sont le plus souvent seuls ou en paires. Cependant, des concentrations de 50 individus ou plus peuvent être observées dans les zones de forte productivité (Sears, 2002). Le plus grand individu enregistré dans l'hémisphère nord était une femelle de 28,1 m (détroit de Davis) (Sears, 2002). Les rorquals bleus peuvent être identifiés par photo-identification à partir de leur pigmentation et des marbrures de leurs flancs. Leur tête est ornée d'une crête proéminente et de mandibules massives. Les rorquals bleus possèdent des fanons noirs, entre 270 et 400 de chaque côté de la mâchoire supérieure (Sears, 2002).



Figure 10. Rorqual bleu (© GREMM).

Les rorquals bleus sont une espèce cosmopolite dont la répartition est largement répandue dans la plupart des océans du monde, à l'exception de l'océan Arctique, aussi bien

dans les eaux côtières que dans les eaux pélagiques (Fig.11) (Yochem & Leatherwood, 1985). La population la mieux connue dans l'Atlantique Nord est celle qui fréquente le Saint-Laurent d'avril à janvier soit la population de l'Atlantique Nord-Ouest (Sears & Calambokidis. 2002). Protégée depuis 1955, son effectif, initialement estimé à environ 1 500 individus, ne compterait aujourd'hui que quelques centaines d'individus, dont 596 individus ont été répertoriés par photographie (R. Sears, personal communication, August 11, 2023). La présence du rorqual bleu fait actuellement l'objet d'un suivi au Québec par le Centre de données sur le patrimoine naturel du Québec (CDPNQ). Le rorqual bleu est classé « espèce en voie de disparition » par le Comité sur la Situation des Espèces en Péril au Canada (COSEPAC) depuis 2002, réévalué et confirmé de nouveau en 2012, et apparaît sur la Liste des espèces susceptibles d'être désignées menacées ou vulnérables au Québec (MPO, 2009). De son côté, l'UICN lui a attribué le statut « espèce en danger » (Cooke, 2019b), comme aux États-Unis selon le Endangered Species Act.

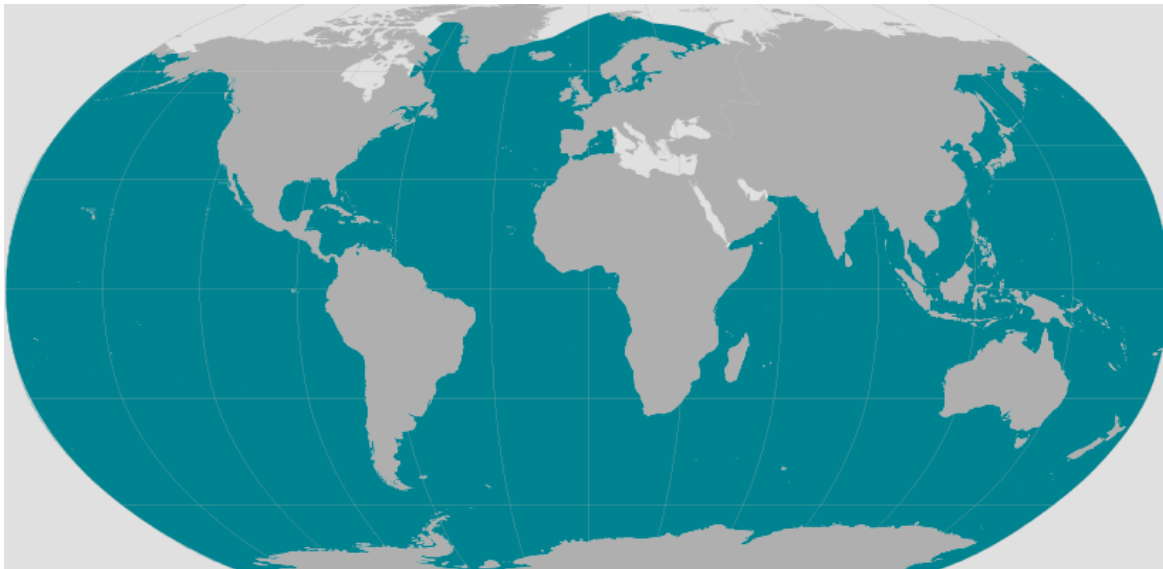


Figure 11. Carte du monde représentant approximativement l'aire de répartition de la baleine bleue (© NOAA Fisheries).

Les rorquals bleus se nourrissent principalement dans les eaux de hautes latitudes, généralement dans des upwellings productifs à l'intérieur du plateau continental (i.e. Parc marin du Saguenay-Saint-Laurent) (Simard, 2009). Ils sont presque monophages car ils se nourrissent principalement de zooplancton, le plus souvent d'une variété d'espèces

d'euphasiidés (krill) (Jonsgård 1955 ; Sergeant 1966 ; Christensen et al., 1992), notamment *Meganyctiphanes norvegica* et *T. inermis* dans l'Atlantique Nord (Christensen et al., 1992 ; Sears et al. 1987 ; Nemoto, 1959 ; Hjort & Ruud, 1929). Ils peuvent également se nourrir de certains copépodes et poissons (Kawamura, 1980). Leur aire de répartition et leur rétablissement sont donc limités par la disponibilité en nourriture, les rendant ainsi sensibles aux changements climatiques et aux changements océanographiques pouvant affecter le zooplancton. Les rorquals bleus semblent être migrateurs. Après avoir passé l'été à se nourrir dans les eaux de hautes latitudes, ils entreprennent de longues migrations vers les eaux équatoriales de plus basses latitudes à l'arrivée de l'hiver (Lesage et al., 2017 ; Jonsgård, 1966). Cependant, la présence d'individus tout au long de l'année a été observé dans certaines zones tropicales, ce qui indique l'existence de rorquals bleus non migrants (Gregg et al., 2000 ; Mate et al., 1999).

Les rorquals bleus émettent plusieurs types de sons : des bourdonnements et des râles (Poulter, 1968), des clics ultrasoniques (Beamish, 1974 ; Beamish & Mitchell, 1971) et des gémissements à basse fréquence (Cummings & Thompson, 1977 ; Cummings et al., 1971). Ils produisent des sons longs, forts et de très basse fréquence (infrasons) - que l'oreille humaine ne peut pas entendre -, d'une durée de ± 10 secondes et d'une fréquence fondamentale inférieure à 30 Hz, pouvant parcourir de grandes distances (Kibblewhite et al., 1967 ; Rivers, 1997 ; Thompson et al., 1996 ; Weston & Black, 1965). Dans des conditions océanographiques favorables, les sons émis par les rorquals bleus peuvent être entendus par d'autres individus à des distances de ~ 1500 km. Ces sons leur permettent donc de communiquer entre individus, même éloignés dépendamment des conditions de bruit régionales et des caractéristiques de propagation de l'environnement (Simard et al., 2008). Les sons des rorquals bleus de l'Atlantique Nord ont été décrits pour la première fois à partir d'un enregistrement d'un seul individu dans le fleuve Saint-Laurent par Edds, 1982.

3.3. PAYSAGE SONORE

Un paysage sonore est l'ensemble des sons audibles qui forme un environnement acoustique (Schafer, 1969). Un des fondements de l'écologie des paysages sonores est la compréhension des modèles acoustiques qui composent un paysage sonore. Ces contributeurs structurants majeurs peuvent être séparés en trois catégories : la biophonie – l'ensemble des sons biotiques, la géophonie – l'ensemble des sons abiotiques d'origine naturelle et l'anthropophonie – l'ensemble des sons générés par les activités humaines (Cauchy et al., 2023 ; Farina, 2014 ; Grinfeder et al., 2022 ; Krause, 2008 ; Mullet et al., 2016) (Fig.12).

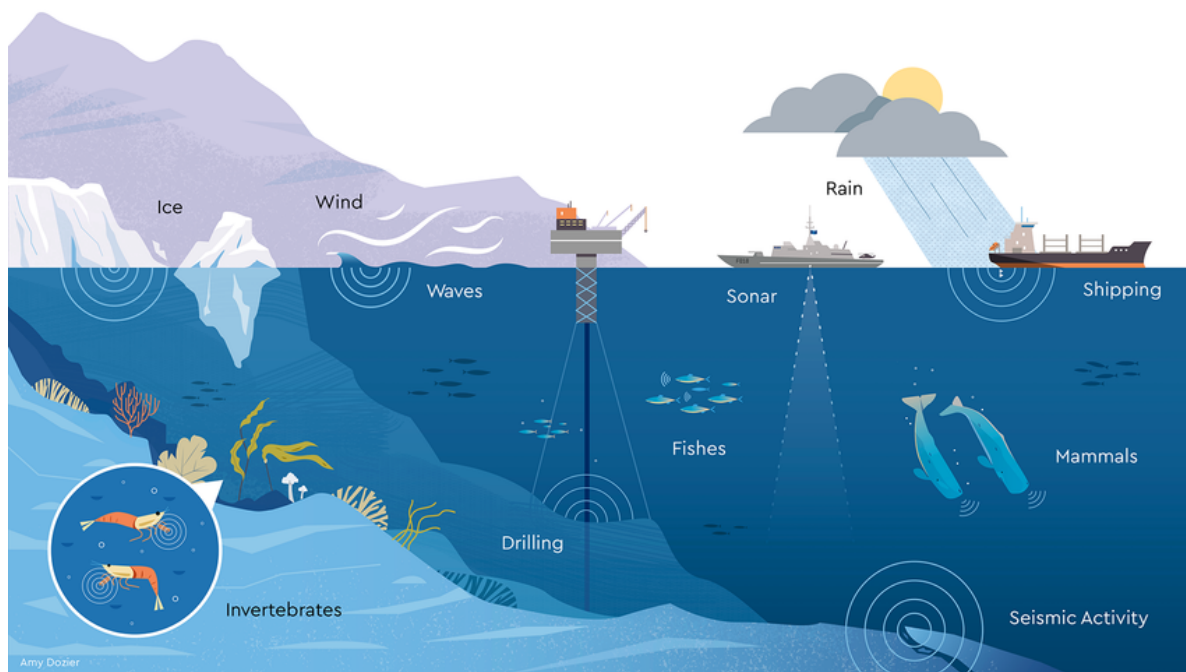


Figure 12. Principales sources contribuant au paysage sonore sous-marin. Sources contribuant à la biophonie, à la géophonie et à l'anthropophonie. Figure d'Amy Dozier. Publiée avec l'autorisation de l'auteur (© Cauchy et al., 2023).

3.3.1. Géophonie

La géophonie est constituée des sons générés par les processus physiques : vent, vagues, pluie, glace, tonnerre, ruissellement et activité sismique (Kinda et al., 2013 ; Kinda et al., 2015). Bien que ces sons soient moins étudiés que les sons anthropogéniques et

biophoniques, ils constituent une composante majeure du paysage sonore car ils se trouvent dans tous les types d'environnement. La géophonie varie selon les saisons et les jours (Pijanowski et al., 2011). Les sons qui la composent peuvent être une source d'information qui structure le comportement des espèces à court terme (Farji-Brener et al., 2018 ; Geipel et al., 2019 ; Lengagne et al., 2002 ; Tishechkin 2013 ;) et à long terme (Brumm 2004 ; Zollinger & Brumm, 2015).

Les premiers travaux de Knudsen (1948) et Wenz (1962) ont montré qu'en eaux profondes, l'agitation de la surface de la mer (pluie, vent) est le facteur dominant du bruit ambiant au-dessus de 1 kHz. Ayant des profondeurs maximales de 355 m, la géophonie de l'ESL est composée majoritairement du bruit dû au vent et à la pluie. Ces deux composantes de la géophonie sont générées, d'une part, par les gouttes de pluie qui produisent un bruit d'impact à large bande et entraînent de l'air dans la couche superficielle, formant des bulles (Nystuen et al., 1993 ; Prosperetti & Oguz, 1993), et d'autre part, par les vagues déferlantes générés par le vent qui créent un nuage de bulles émettant des sons par oscillations individuelles et collectives (Medwin & Beaky, 1989). Plusieurs auteurs ont établi des relations empiriques entre la vitesse du vent et le niveau de bruit ambiant (Evans et al., 1984 ; Lemon et al., 1984 ; Vagle et al., 1990 ; Vakkayil et al., 1996 ; Wenz, 1962 ; Zedel et al., 1999). Vagle et al. (1990) ont dérivé un algorithme empirique reliant linéairement le niveau de pression acoustique à 8 kHz avec la vitesse du vent (à une hauteur de 10m), en utilisant des instruments acoustiques déployés à une profondeur inférieure à 93 mètres.

3.3.2. Anthropophonie

L'anthropophonie est constituée de l'ensemble des bruits générés par les activités humaines : le transport maritime, l'exploration sismique, la construction sous-marine (e.g. agrandissement des ports), les exploitations pétrolières/gazières (canons à air, navires, forage pétrolier), les activités militaires (sonars militaires, communications et explosions), la pêche (sonars commerciaux/civils, dispositifs de dissuasion et de harcèlement acoustiques), la recherche (canons à air, sonars, télémétrie, communication et navigation) et d'autres activités

telles que la navigation de plaisance, la pêche récréative et la pêche sportive (Hildebrand, 2009). Dans le Saint-Laurent, les activités régulières de navigation commerciale et de traversier, ainsi que les activités saisonnières d'observation des baleines et de loisirs en sont les contributeurs majoritaires et augmentent le bruit ambiant dans l'habitat du béluga et des autres espèces emblématiques du Saint-Laurent (Simard et al. 2010 ; McQuinn et al. 2011 ; Gervaise et al. 2012, Lesage, 2021).

Les sources de bruit anthropiques deviennent à la fois plus omniprésentes et plus puissantes, et augmentent ainsi les niveaux de bruit de fond océanique et les pics d'intensité sonore. Les sources de bruit régulières dominantes dans les océans du monde entier sont les navires commerciaux et sont donc situées le long des voies maritimes, englobant ainsi également les eaux côtières et le plateau continental (i.e. les ports internationaux) (Hildebrand, 2009). L'analyse du bruit des navires a révélé que leur hélice et leur machinerie étaient les sources majeures de bruit sous-marin rayonné à des fréquences inférieures à 200 Hz (Ross & Kuperman, 1976). Le bruit dû à l'hélice est plus précisément dû à la cavitation au bout des pales de l'hélice, un mécanisme de bruit important à toutes les fréquences. Ce phénomène se produit lors de la rotation de l'hélice et est caractérisé par l'ébullition de l'eau de mer, provoquée par la diminution de la pression statique locale, et donc par la production de micros explosions de bulles, formées à partir du gaz contenu dans les molécules d'eau, qui sont forcées de se séparer et explosent (Caupin & Herbert, 2006 ; Lauterborn & Ohl, 1997). Le bruit émis par la cavitation comprend à la fois un bruit à large bande dû à l'effondrement des bulles et des composantes tonales liées à la fréquence de passage des pales et aux harmoniques supérieures (Hildebrand, 2009). Le bruit dû à la machinerie est plus précisément dû aux machines rotatives, qui produisent des tonalités, et aux machines à mouvement alternatif, qui produisent des impulsions nettes à un taux de répétition constant, se traduisant par de multiples harmoniques à la fréquence de répétition. Ces différentes sources de bruit émis par un navire peuvent être décrites et étudiées à partir des spectres sonores des navires (Hildebrand, 2009) et sont variables selon le type de navire et les conditions d'utilisation, notamment leur vitesse. Par exemple, une variabilité de ~ 30 dB du bruit émis par la flotte du Saint-Laurent a été mesurée (Simard et al., 2016).

3.3.3. Biophonie

La biophonie comprend tous les sons produits par les organismes vivants, comme les signaux de communication des animaux. Les sons biophoniques peuvent donc servir d'indicateurs de traits de vie, de processus écologiques et de biodiversité (Gibb et al., 2018) et la biodiversité acoustique peut être évaluée avec deux grands types d'indicateurs : la richesse acoustique et l'abondance acoustique (Farina, 2018). Pour la vie marine, le son est l'un des éléments clés des activités vitales. Par exemple, les cétacés, les poissons et les crustacés perçoivent et produisent des sons pour la recherche de nourriture, les interactions sociales, l'accouplement, la fuite des prédateurs et la navigation (Clark et al., 2009 ; Zelick et al., 1999). Et il a été démontré que les mammifères marins, les poissons et les invertébrés sont affectés par la détérioration des environnements sonores sous-marins (Delarue et al., 2018 ; Nedelec, 2015 ; Putland et al., 2018 ; Zelick et al., 1999). La biophonie de l'ESL est majoritairement composée des sons des mammifères marins qui le fréquentent e.g. le béluga, la baleine franche de l'Atlantique Nord, le rorqual à bosse, le rorqual commun, le rorqual bleu, le cachalot (cf. I.2.1.) (Edds et al., 1987 ; Kingsley & Reeves, 1998).

3.4. POLLUTION SONORE

3.4.1. Traffic maritime

Le transport maritime est le principal vecteur du commerce mondial, il achemine environ 80% des marchandises (UNCTAD, 2017). Il a significativement augmenté au fil des dernières années du fait de la mondialisation et a été multiplié par quatre en termes de tonnage depuis 1970 (UNCTAD, 2017).

La voie maritime du Saint-Laurent a été officiellement ouverte à la navigation à fort tirant d'eau en 1959. Elle relie l'océan Atlantique et Duluth (Minnesota), qui par le lac Supérieur, est un parcours de 3774,376 km, soit 8,5 jours de navigation. Depuis 1959, plus de 2,5 milliards de tonnes de marchandises ont été transportées en provenance et à destination du Canada, des États-Unis et de plus de 50 autres pays (D'arcy, 2009 ; English & Hackston,

2013 ; Martin Associates - Lancaster, 2023). Cette voie maritime comprend certains des plus grands ports d'Amérique du Nord. Elle revêt une importance géographique stratégique : le Saint-Laurent dessert directement l'Ontario, le Québec, l'Illinois, le Michigan, l'Ohio, l'Indiana, le Wisconsin, le Minnesota, New York et la Pennsylvanie (Great Lakes St. Lawrence Seaway Development Corporation (GLS), Policy Headquarters, U.S. Department of Transportation, 2020).

L'ESL est donc devenu une voie maritime majeure. Chaque année, environ 5000 cargos traversent l'estuaire. Pour l'année 2022-2023, 4008 navires y ont transités transportant 36,3 millions de tonnes de marchandises (The St. Lawrence Seaway Management Corporation, 2023). À ces activités régulières de navigation commerciale et de traversier s'ajoutent les activités saisonnières d'observation des baleines, des excursions touristiques commerciales, de ferries et de bateaux de plaisance, soit des milliers de voyages (Chion et al., 2009). L'ensemble de ce trafic maritime augmente le bruit ambiant dans l'habitat essentiel des cétacés du Saint-Laurent et notamment du béluga, de la baleine à bosse et de la baleine bleue (Simard et al. 2010 ; McQuinn et al. 2011 ; Gervaise et al. 2012, Ménard et al. 2014 ; Lesage, 2021). De plus, le trafic maritime lié au tourisme et aux activités d'observation des baleines s'intensifie en juillet-août dans la principale aire d'alimentation, lorsque les bélugas mettent bas (Ménard et al., 2014).

De nos jours, le bruit anthropique domine de nombreux paysages naturels, même lorsqu'ils sont protégés par la législation et génère ce qu'on appelle de la pollution sonore. Les mesures effectuées dans le Pacifique Nord-Est indiquent que l'augmentation du trafic maritime mondial a entraîné une augmentation de la pollution sonore sous-marine (Frisk, 2012). Par exemple, dans cette zone les niveaux sonores ont augmenté de 10 dB entre les années 1960 et 1990 dans les basses fréquences (< 300Hz) (Andrew et al., 2002). Cette augmentation des niveaux de bruit dans l'océan suscite de plus en plus d'interrogations quant à l'effet potentiel sur la biodiversité, et notamment sur les mammifères marins.

3.4.2. Effets sur la faune marine

Les activités de trafic maritime dans l'estuaire du Saint-Laurent ont lieu dans une région reconnue pour sa grande diversité de mammifères marins. Près de la moitié des espèces qui fréquentent le Saint-Laurent sont répertoriées comme des espèces en péril (COSEPAC, 2009). La zone est soumise à d'intenses pressions liées aux activités humaines, dont la navigation qui représente des menaces cumulatives pour la faune marine, notamment les risques de collision, la perturbation des activités d'alimentation et de reproduction, la perte d'habitat, les risques d'exposition aux déversements de produits chimiques toxiques et au bruit (Dionne, 2001 ; Pêches et Océans Canada, 2004 ; Ménard et al., 2007). L'effet du bruit anthropique sur la vie marine est une préoccupation mondiale croissante qui a fait l'objet de plusieurs études (Southall et al., 2019, 2007 ; Aulancier et al., 2016 ; Boyd et al., 2011 ; Popper & Hastings, 2009). Le bruit anthropique peut, par des effets en cascade, induire des changements dans les communautés d'espèces chanteuses en modifiant leurs interactions (Francis et al., 2009), en perturbant les chaînes trophiques (Hanache et al., 2020). Les bilans énergétiques mondiaux désignent la navigation comme le principal contributeur au bruit anthropique sous-marin (Hildebrand, 2009). Le risque d'impact significatif augmente dans les zones à fort trafic, comme les lignes de navigation très fréquentées et les ports, où ce type de bruit continu atteint des sommets et empiète sur les habitats sensibles de la faune marine, où des fonctions vitales ont lieu (Gervaise et al., 2012). Les cooccurrences entre bateaux et baleines qui résultent de la forte activité maritime dans la région de l'ESL ont suscité des inquiétudes quant aux impacts négatifs, notamment les collisions et l'exposition au bruit sous-marin (Chion et al., 2017). Alors que les impacts négatifs des collisions sont évidents, les impacts du bruit sous-marin sur les baleines telles que les bélugas comprennent des changements de comportement affectant l'efficacité de la recherche de nourriture, par exemple l'évitement et la perturbation (Gomez et al., 2016), des changements dans le comportement de vocalisation (Lesage et al., 1999), le masquage de la communication affectant la capacité de l'animal à socialiser et à localiser ses proies (Erbe et al., 2016 ; Aulancier et al., 2016) et la perte d'audition (Finneran et al., 2002 ; Schlundt et al., 2000). La plupart de ces études ont utilisé des attributs comportementaux tels que des changements

dans la fréquentation des sites, les schémas de plongée, la vitesse de nage, l'orientation des déplacements, la cohésion du troupeau et la synchronisation des plongées pour indiquer une éventuelle perturbation ou un stress causé par le trafic maritime (Richardson et al. 2013). De nombreuses études ont examiné les effets des niveaux élevés de bruit sous-marin sur le comportement vocal et la capacité auditive des mammifères marins (Southall et al., 2019, 2008 ; National Marine Fisheries Service, 2018 ; Lesage et al., 1999) et des consensus ont émergé. Tandis que moins de consensus ont été établis sur les comportements et le masquage (Erbe et al., 2022). Étant donné que les mammifères marins dépendent du canal sensoriel acoustique pour un grand nombre de leurs activités, le fait de forcer un animal à modifier son comportement vocal ou de réduire sa capacité auditive pourrait réduire sa capacité à chercher de la nourriture, à naviguer ou à entrer en contact avec ses congénères (Fletcher & Busnel 1978, Richardson et al. 2013). Les bélugas exposés à un grand navire et à un brise-glace ont continué à émettre des sons, dont une grande proportion de sons descendants et d'appels pulsés bruyants, que l'on pense être des cris d'alarme (Erbe & Farmer, 1998). Alors que les narvals (*Monodon monoceros*) sont devenus silencieux lorsqu'ils ont été exposés à la même source de bruit (Finley et al., 1990). Les baleines grises (*Eschrichtias robustas*) le long de la côte mexicaine ont réagi différemment au bruit des moteurs hors-bord et des navires de forage : leur taux d'appel a augmenté dans le premier cas et diminué dans le second (Dahlheim, 1987). Cette variabilité des réactions pourrait être due à un certain nombre de facteurs physiques et biologiques différents, notamment les caractéristiques et les niveaux de bruit à l'emplacement des baleines, la durée et la prévisibilité de la perturbation et, dans le cas des bateaux, la distance, le nombre, le type, la vitesse et l'angle d'approche (Lesage et al., 1999). Les facteurs biologiques comprendraient la capacité auditive des animaux, leur activité actuelle, le seuil de perturbation, le degré d'adaptation et le besoin de rester dans la zone (Acevedo, 1991 ; Blane, 1990 ; Kruse, 1991 ; Watkins, 1986). En outre, la quantification adéquate de la réponse vocale d'un mammifère marin au bruit est entravée par des limitations techniques. Il est rarement possible de déterminer le nombre d'animaux responsables des cris enregistrés, et souvent seuls les cris les plus forts peuvent être détectés lorsque les niveaux de bruit sous-marins sont élevés.

Cependant, seules certaines études ont mesuré la distribution de probabilité des niveaux de bruit rencontrés dans ces zones à fort trafic (Gervaise et al., 2012 ; Giard et al., 2020 ; Erbe, 2002 ; Kipple et Gabriele, 2003, 2004 ; Holt et al., 2009 ; Jensen et al., 2009). Le bruit émis par une flotte hétérogène de tailles variables couvre de nombreuses fréquences, allant des infrasons (quelques Hz), aux ultrasons dépassant 20 kHz (Arveson & Vendittis, 2000 ; Erbe, 2002 ; Kipple & Gabriele, 2003, 2004 ; NRC, 2003). Une bande aussi large couvre les bandes de sensibilité auditive et de communication de plusieurs organismes marins, notamment les mammifères marins, et peut atteindre les bandes d'écholocation à haute fréquence utilisées par les baleines à dents (Odontocètes) pour naviguer sous l'eau et détecter leurs proies à l'aide de clics et de bourdonnements (Au & Hastings, 2008).

Dans l'ESL, de telles menaces sont identifiées comme pouvant limiter le rétablissement du rorqual bleu de l'Atlantique Nord (Aulanier et al., 2016 ; Beauchamp et al., 2009) et de la population de bélugas du Saint-Laurent (MPO, 2012). Bien que des comportements d'évitement aient été observés dans la zone d'étude, nous en savons très peu sur les seuils de niveaux de bruit, dépendant de la fréquence, qui déclenchent de telles réponses avec des conséquences potentielles à long terme (Gomez et al., 2016). De même, d'autres impacts potentiellement critiques du bruit anthropique sur les bélugas, y compris le masquage de leurs activités acoustiques vitales, par exemple l'écholocation, restent peu clairs à l'heure actuelle (Erbe et al., 2016).

CHAPITRE 1

BRUIT DÉPENDANT DU VENT ET BRUIT DE LA NAVIGATION DANS L'HABITAT DES BALEINES : CARACTÉRISTIQUES ET BILAN SUR TROIS BANDES DE FRÉQUENCE DANS L'ESTUAIRE DU SAINT-LAURENT

Jeanne Mérindol¹, Pierre Cauchy¹, Cédric Gervaise^{1,2}, Guillaume St-Onge¹,

¹ Institut des Sciences de la Mer de Rimouski (ISMER), Université du Québec à Rimouski (UQAR).

² Institut de recherche CHORUS et SENSEAFR SAS.

ABSTRACT

The underwater soundscape is important to cetacean species in many aspects of their lifestyle: feeding, communication, movement, and reproduction. Their ability to hear is therefore critical to their survival. The St. Lawrence Estuary is renowned for the abundance and diversity of cetaceans that frequent it. It is also a major shipping lane linking the Great Lakes to the Atlantic Ocean, which can have negative effects on these animals, notably exposure to underwater noise. In the current context of protecting species at risk in Canada, such as the blue whale (*Balaenoptera musculus*) and the beluga whale (*Delphinapterus leucas*), objectively determining the noise levels and sources to which these species are exposed is essential. The MARS (Marine Acoustic Research Station) project is part of this effort. This applied research project aims to understand and measure the underwater noise emitted by ships, and to propose mitigation methods.

This chapter deals with the study of the acoustic landscape recorded from August to October 2021. Data recorded by the MARS acoustic station deployed in the middle of the Laurentian Channel were used to analyze the relative contribution of major sources to sound levels in three frequency bands used by cetaceans: 50 Hz, 300 Hz and 6300 Hz. A model was created to classify noise generated by wind – a natural source – and marine traffic – affected by anthropogenic activities – and the relative contributions, in percentage of time, of these sources were obtained, based solely on a wind speed and sound intensity value. At low frequencies (50 Hz), used by blue whales, the soundscape is dominated by marine traffic almost 100% of the time. At high frequencies (6300 Hz), used by belugas, the soundscape is dominated by marine traffic 34.2% of the time. These results indicate that it is important to study the different noise contributions in the specific frequencies used by cetacean species, as they do not imply the same effects. The protection strategies implemented are therefore not the same depending on the species considered. Such an analysis of the soundscape therefore provides valuable information for conservation purposes and the sustainable development of human activities.

Keywords : Acoustics, Ambient noise, Canada, Cetaceans, Relative contribution, Noise exposure, Quebec, Ships, Soundscape, St.Lawrence.

1. INTRODUCTION

1.1. Cohabitation between whales and ships in the St. Lawrence

The St. Lawrence Estuary (SLE) is known for the abundance and diversity of marine mammals which frequent it and contribute to its underwater soundscape. This vast abundance and diversity of marine mammals was first reported by Jacques Cartier during his voyages to the New World between 1534 and 1542 (Cartier et al., 1981). The diversity of marine mammals in the St. Lawrence Estuary is composed of two orders: cetaceans (Mysticetes and Odontocetes) and pinnipeds (Odobenidae and Phocidae) frequent visitors of the SLE, mainly for foraging purposes (Michaud et al., 1997a). Among them, the resident St. Lawrence beluga whale population along with the migratory North-west Atlantic blue whale and the Atlantic fin whale population (*Balaenoptera physalus*) are listed under the Canadian Species at Risk Act (Mooers et al., 2010). These species frequent the estuary either year-round, seasonally (from May to October) or occasionally (Edds & Macfarlane, 1987; Kingsley & Reeves, 1998). The St. Lawrence system is also a major shipping lane linking the Atlantic Ocean to the Great Lakes which has effects on local marine life, including exposure to underwater noise (Chion et al., 2017; Gervaise et al., 2012, 2015) and collisions with marine mammals (Krause, 2008). In the current context of sustainable development and the protection of species at risk in Canada, such as the North Atlantic right whale (*Eubalaena glacialis*) (Brillant et al., 2017; Elvin & Taggart, 2008; Gervaise et al., 2021; Meyer-Gutbrod et al., 2018), blue whales, fin whales and beluga whales (Bailleul et al., 2012a, 2012b; Canada. Department of Fisheries and Oceans, 2020; Demers & Canada. Department of Fisheries and Oceans., 2012; Lesage, 2021; Vergara et al., 2021), there is a need for research that quantifies the effects of shipping to marine mammals, in particular the effects of underwater noise on marine mammals to determine potential effects and provide valuable information for conservation purposes.

1.2. Ecological relevance of shipping noise

The most common anthropogenic source of underwater noise is motorized ships, which includes shipping, recreational and whale watching boats (McCarthy, 2004; National Research Council, 2003). Over the last 50 years, a significant increase in the number and size of ships making up the world merchant fleet has been observed (UNCTAD, 2022). Oceanic ambient noise in the low-frequency band is dominated by commercial shipping noise, and analyses have found that distant ships are the primary source of these low-frequency noise levels (Hildebrand, 2009).

There is therefore increasing concern about the effects of human-generated sounds, such as shipping noise, on fishes (Mickle & Higgs, 2018; Popper & Hastings, 2009; L. Weilgart, 2018), invertebrates (Morley et al., 2013) and marine mammals (Nowacek et al., 2007; Tyack, 2008; L. S. Weilgart, 2007). Several studies have reported behavioral marine mammal responses to ships and boats in general (Foote et al., 2004; Holt et al., 2009; Lusseau et al., 2009; Richardson & Würsig, 1997). Fright, avoidance, and changes in behavior and vocal behavior, have been observed in both Mysticete and Odontocete from tens to hundreds of kilometers (Gordon et al. 1998). Ships increase ambient noise in marine mammals' habitat. Higher levels of background noise can interfere with the ability of marine mammals to detect sounds, whether they are the calls of their own species, echoes of prey, or natural sounds that assist in navigation or foraging (Hildebrand, 2009), which is called masking (Erbe & Farmer, 1998). Higher levels of background noise can also interfere with their ability to detect predators which has a direct impact on survival. Lesage et al., 2014 made acoustic observations of female-calve communications - composed of low energy calls at low frequencies (Vergara & Barrett-Lennard, 2008) – showing that they were easily masked by large ships. The masking effects were shown to be related to the proximity of a dense traffic zone and to the low-frequency propagation characteristics around the transmitting site (Aulanier et al., 2016). And examination of impacts on low-frequency mammals (i.e., blue whales) within ecologically and biologically significant areas reveals that shipping noise has the potential to trigger behavioral responses and masking in the future (Aulanier F et al.,

2017). Noise can also affect developmental and reproductive functions (National Research Council, 2003) and cause more generalized stress (Rolland et al., 2012). A cumulative and synergistic effects of noise can be observed too. Indeed, anthropogenic noise could interact with marine mammal bycatch or ship collisions by preventing animals from sensing fishing gear or oncoming vessels (through hearing damage or masking), making them more vulnerable to injury or death, as some evidence seems to indicate (Todd et al., 1996; Andre et al., 1997). Then, if animals are repeatedly exposed to shipping noise and alter their behavior in response to this source it may affect their individual time and energy budgets, which in turn could lead to an energetic imbalance and fitness consequences if they are unable to compensate for the exposure (Nachtsheim et al., 2023a). Therefore, if a large portion of the cetacean populations (i.e., in the St. Lawrence Estuary) are affected by shipping noise, the cumulative negative impacts on individuals may translate into larger population consequences (Erbe et al., 2019; Rojano-Doñate et al., 2023).

It is important that efforts be made to assess and mitigate the potential impacts of ships on marine life (Erbe, 2002; Holt et al., 2009; Jensen et al., 2009; Kipple & Gabriele, 2003). Research efforts to address the problem of ship noise and its impact on marine life include studies using a range of approaches including risk mapping and on-animal (Nachtsheim et al., 2023b; Pirotta et al., 2018; Trigg et al., 2020; Wisniewska et al., 2018) as well as long-term Passive Acoustic Monitoring (PAM) in various environments affected by different marine activities (e.g., Gervaise et al., 2015).

1.3. Research objectives

The goals of the present paper are to quantify the sound levels in the St. Lawrence recorded by the MARS station, to determine the major sources that generate them (i.e., abiotic, and human-generated) and to calculate the proportion of time each source contributed to the overall recording. This will enable us to answer the question of what the main contributors to the ambient noise are, and in what proportions marine fauna are exposed to it. To achieve these objectives, I will first analyze the ambient noise and quantify the sound

levels measured at the station by frequency band. Then, the sources responsible for these sound levels (geophony or anthropophony) will be identified and the environmental parameters best describing them will be defined: surface wind speed for geophony and distance to the nearest ship for anthropophony. From there, the relative contributions of these sources to sound levels will be described in three chosen frequency bands corresponding to three marine mammal functional hearing groups: 50 Hz, 300 Hz and 6300 Hz. Choosing different frequency bands for this analysis is important because different species of marine mammals have different hearing acuity and so will perceive the loudness of the same ship differently (Southall et al., 2019). The low frequencies are representative of the frequencies used by the large baleen whales as the blue whale (Berchok et al., 2006; Clark et al., 2009); the medium frequencies are representative of the frequencies used by the others baleen whales as the humpback whale (Clark et al., 2009); and the high frequencies are representative of the frequencies used by the toothed whales as the beluga whale (Rasmussen et al., 2015; Zahn et al., 2021).

The results will show the relative contribution of these two major sources to noise levels in these three frequency bands during the 2021 recording period. A model will be created to define and predict the noise generated by distant and nearby marine traffic, and by wind. In this way, it will be possible to establish the percentage of time spent exposed to different noise sources - distinguishing natural and anthropogenic sources - by three emblematic marine mammal species in the St. Lawrence. Consequently, the soundscape measured at the station will be quantified, and I will provide a tool for determining whether observed noise levels are from wind or shipping. This soundscape analysis will provide valuable information for cetacean conservation purposes and the sustainable development of shipping activity within the St. Lawrence Estuary.

2. MATERIALS & METHOD

2.1. Data used: acoustic recordings, AIS, wind

The acoustic recordings were collected by the hydrophones of the MARS station. The station has been designed to produce acoustic signature measurements in compliance with the ANSI/ASA S12/64-2009 standard (ANSI/ASA, 2009) - and allow observation of the local soundscape. It was positioned between the two shipping lanes of the St. Lawrence, offshore Rimouski (Fig.13). In this study, we used the data collected by the bottom (300 m deep) hydrophone of E1 mooring composed of an AURAL M3 recorder developed by MTE-OpDAQ comprising a Geospectrum hydrophone with a sensitivity of -174.5 ± 3 dB re $1 \text{ V}/\mu\text{Pa}$ for a frequency between 5 Hz and 50 kHz, a gain of 18 dB and an acquisition scale ± 2.5 V, 24 bit (Fig.14) from the 1st August 2021 to the 31st October 2021. It recorded continuously during its operating period and data were transmitted onshore once a week via the cellular network. The complete acoustic dataset was also accessed after recovery of the system at the end of the operating period. The dataset is composed of 20,308 5-minute .wav files, sampled at 16 kHz, representing 1692 hours (~ 70 days) of recordings and 326.22 GB. Noise levels in third octave bands (Root mean square Sound Pressure Level, dB re. $1 \mu\text{Pa}$) hereinafter referred to as the Third Octave Level (TOL) were extracted using the PAMGuide software (Merchant et al., 2015) with a range of 25 Hz to 6300 Hz, using a 1-second Hann window and 50 % overlap. Spectrograms were generated with the *spectrogram* function on Matlab (Version: 9.11.0.1809720 (R2021b) Update 1) (0.5-second Hann window, 50 % overlap) to allow visualization of the dataset with a Fast Fourier Transform (FFT). The sound levels studied were smoothed beforehand to facilitate analysis. A sliding average was applied to the minimum sound level over 5-minute segments, as an approximation of sound levels.

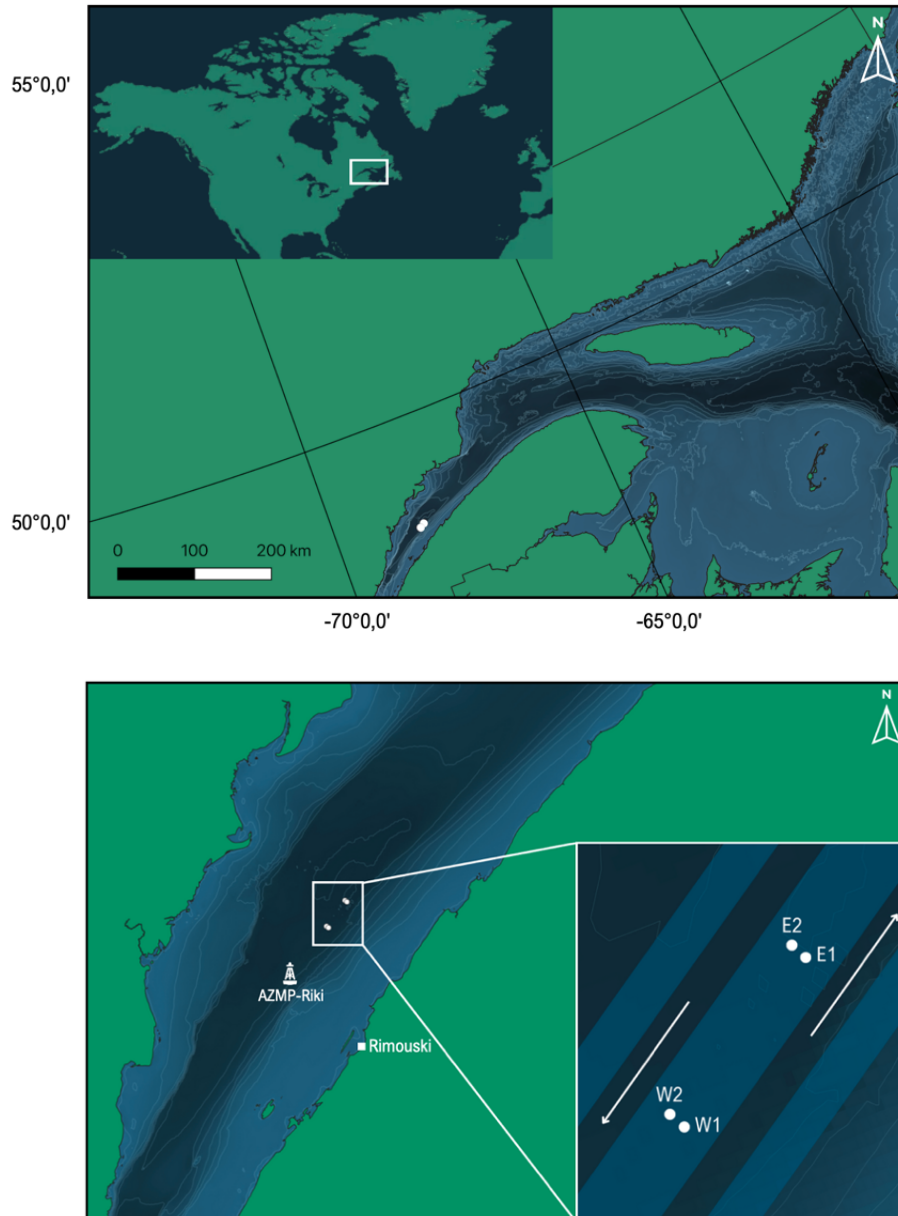


Figure 13. Implementation of the MARS acoustic station in the center of the traffic separation lane of the St. Lawrence seaway, offshore Rimouski. Up: the white points are the location of the hydrophones. Below: the white arrows illustrate trajectories of ships.

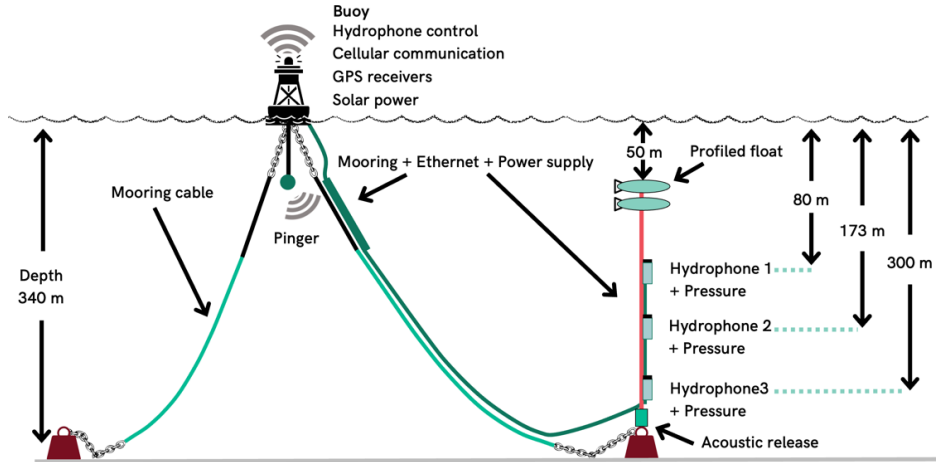


Figure 14. Geometry of a MARS station mooring.

Traffic data were collected using an Automatic Identification System (AIS) receiver, installed on shore, 20 km from the station, allowing detection of ships within 100 km. Time series of longitude, latitude and speed over ground have been collected. From the position of each ship, the distance between the station and the nearest ship was calculated using Matlab (Version: 9.11.0.1809720 (R2021b) Update 1) with a time resolution of 5 minutes. The dataset was cleaned according to a speed criterion removing ships with a speed of less than 2 knots, to remove data from ships stopped in nearby harbors.

Wind speed was recorded by the AZMP-RIKI oceanographic and meteorological buoy (Fig.13) designed by Multi-Electronics (MTE) and operated by Fisheries and Oceans Canada for the Atlantic Zone Monitoring Program (AZMP), located 9 km away from the station (Pêches et Océans Canada - Fisheries and Oceans Canada, 2022). From July 1st to November 7th, 2021, time series of the 60-second average surface wind speed were extracted with a time resolution of 30 minutes. From the wind speed recorded by the PMZA-RIKI buoy, a 120-minute moving average was applied.

2.2. Traffic noise model construction

To classify marine traffic noise as either distant or nearby ships, a model was constructed on a training dataset reduced to the data collected in the absence of nearby ships (> 30 km from the station), and at low wind speed (< 5 m.s⁻¹). The 80th percentile of observed

TOL, respectively 87 dB re 1 μ Pa and 81 dB re 1 μ Pa in the 300 Hz and 6300 Hz bands, was chosen as the limit above which observed TOL are classified as not generated by distant traffic (Fig.15). By design, this model has a 20 % error rate on the training dataset.

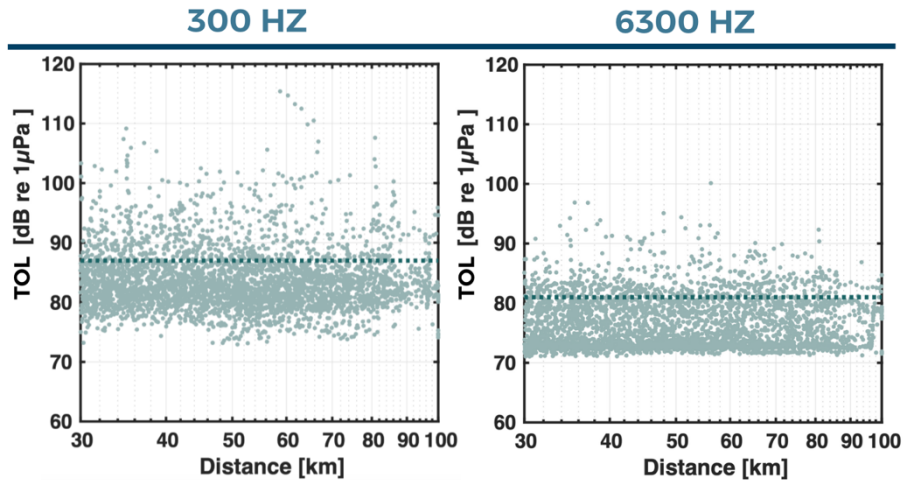


Figure 15. Noise levels recorded from August to October 2021 as a function of ship distance in the absence of ships in 30 km around the station and strong winds ($< 5 \text{ m.s}^{-1}$). Green dotted lines correspond to 80th percentile of observed TOL.

2.3. Wind-generated noise model construction

The soundscape budget is the description of noise levels and the relative contributions of the natural noise and the anthropogenic noise (Gervaise et al., 2012). In this study, it was evaluated in frequency ranges relevant to characteristic St. Lawrence species, represented by three third-octave level (TOL) at : 50 Hz, representative of mysticete long-distance communication or group cohesion signals ($f < 100 \text{ Hz}$) (Berchok et al., 2006; Clark et al., 2009); 300 Hz, representative of mysticete short distance signals and beluga low frequency whistles (Clark et al., 2009); and 6300 Hz, representative of beluga high frequency whistles (Rasmussen et al., 2015; Zahn et al., 2021). To be able to compare the TOL obtained in this study with those of the empirical Wenz model, the values of Wenz curves have been converted dB re 1 μ Pa.

Wind contributes to the soundscape by generating broadband noise through the inclusion of bubbles beneath the surface resulting, primarily, from surface agitation (Vagle et al., 1990; Wenz G.W, 1962) and it can be detected at depths of up to 6000 m (Barclay & Buckingham,

2013). Only winds above $\sim 2 \text{ m.s}^{-1}$ produce audible sound; below this level, they produce sounds lower than the background noise level (Riser et al., 2008; Nystuen and Ma, 2002; Vakkayilt et al., 1996). Wind-generated noise is ubiquitous and one of the main contributors to ambient noise in the ocean (Shajahan et al., 2022).

Following the work of Vagle et al. (1990) widely used in most recent studies (Riser et al., 2008; Nystuen and Ma, 2002; Vakkayilt et al., 1996), linear regressions between the sound pressure level and the logarithm of surface wind speed were calculated with the *robustfit* function on Matlab (Version: 9.11.0.1809720 (R2021b) Update 1).

$$\text{SPL}(w) = a \cdot \log_{10}(w) + b, \quad (1)$$

where \mathbf{a} = slope of the linear regression, \mathbf{w} = wind speed in m.s^{-1} and \mathbf{b} = offset of the linear regression (values obtained with *robustfit*).

The model was constructed using a training dataset reduced to the data collected in the absence of nearby ships, when the nearest ship was at least 30 km from the station, and with wind speeds above 6 m.s^{-1} to focus on prevailing wind conditions (Vagle et al., 1990). Prevailing wind conditions correspond to times when sound levels increase significantly with wind speed and when the wind is one of the main contributors to ambient noise in the ocean (Shajahan et al. 2022).

3. RESULTS

3.1. Measurement conditions

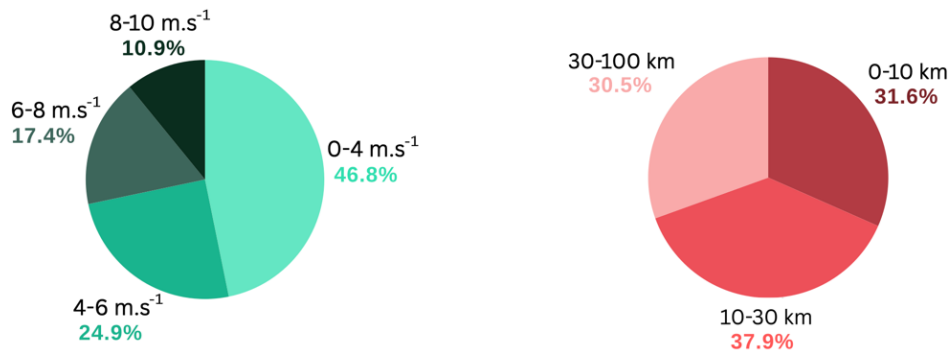


Figure 16. Distribution of wind speeds (left) and distances from the nearest ship (right) during the acoustic recording period by the station from August to October 2021.

Measurement conditions, wind speeds and ship activity, varied over the entire acoustic recording period in the station area the fact that the recordings are made in situ, not in a controlled environment (Fig.16). The wind speed was variable, ~50% of wind speeds were below 4 m.s⁻¹ and 11% of strong winds above 8 m.s⁻¹ were observed. Concerning ships in the area, 1/3 passed between 0-10 km from the station, 1/3 between 10-30 km and 1/3 between 30-100 km. It should be noted that during 8% of the recording time, ships passed beyond 100 km. The total number of ships that passed within 100 km radius of the station in the noise measurement period was 367, so an average of four AIS-equipped ships per day that passed the station.

3.2. Main sources of noise

We analyzed the distribution of sound pressure levels measured by the station (Fig.17). The typical signature of shipping traffic noise, centered on 50-100 Hz (Wenz G.W, 1962), is visible on all percentiles of the distribution (Fig.17), and the median, 103.1 dB re 1μPa in the third-octave band 50 Hz (Tab.1), corresponds to the values proposed for heavy traffic noise by the Wenz curves (Wenz G.W, 1962) (Fig.18). The typical spectral slope of wind noise is visible at all percentiles of the distribution in the high frequencies, from ~500 Hz (Fig.17), and the median level was 82.8 dB in the third-octave band 6300 Hz (Tab.1.). When compared to the Wenz Curve, the measured median level followed the predicted wind-generated bubble noise for sea state 4 from 800 Hz to the highest measured TOL (Fig.18). And a dispersion of ~10 dB re 1μPa is observed between the 25th and 75th percentiles of the third-octave band 300 Hz and 6300 Hz (Tab.1), which is consistent with previous observations in the region (Simard et al., 2010).

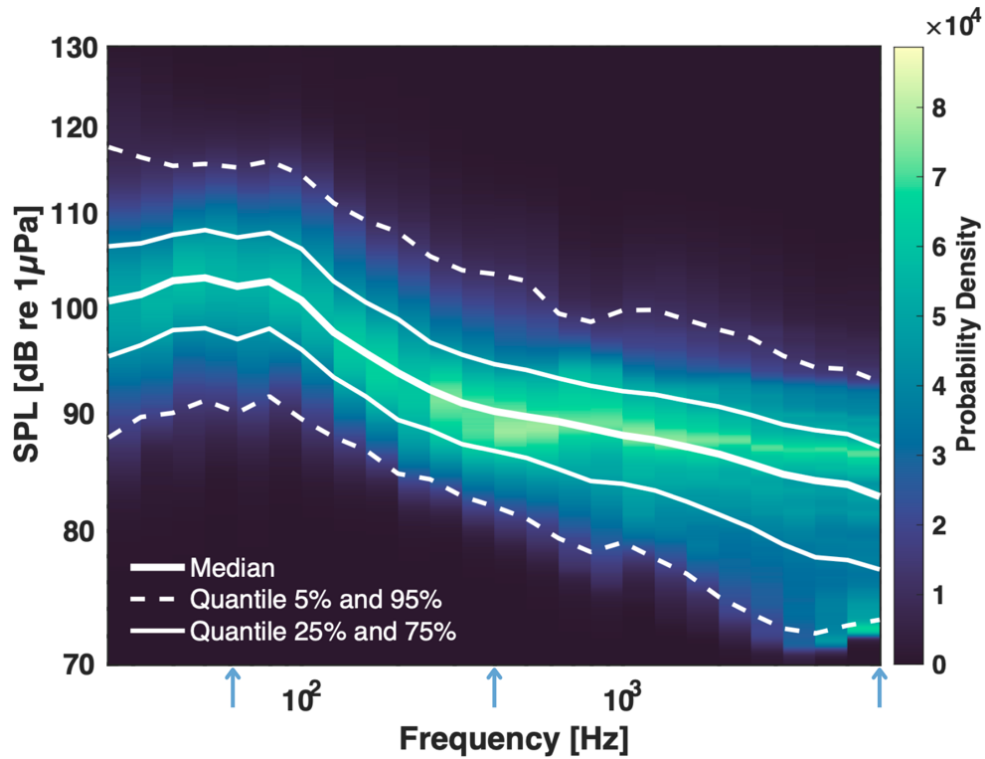


Figure 17. Quantiles (5th-25th-75th-95th), median and probability density of noise levels received by the station from August to October 2021 (blue arrows: 50 Hz, 300 Hz and 6300 Hz).

PERCENTILES (dB re 1μPa)	50 HZ	300 HZ	6300 HZ
95 th	115.6	103.9	92.9
75 th	108.2	95.5	87.1
50 th	103.1	91	82.8
25 th	88.1	87.3	77
5 th	91.2	82.8	73.2

Table 1. Sound levels recorded by the station from August to October 2021.

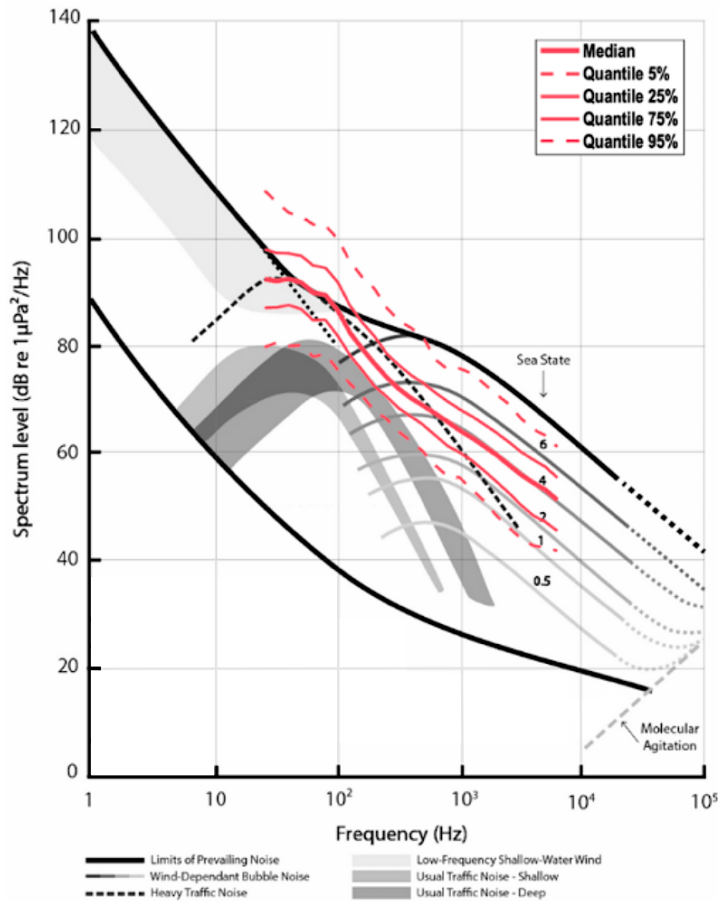


Figure 18. Spectra and frequency distribution of underwater sound sources (reproduction from Wenz (1962)) with ambient-noise spectra at the station in dB re $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ (red dotted lines: percentiles 5th and 95th, red light lines: percentiles 25th and 75th, bold line: median).

3.3. Shipping noise

To describe the main anthropogenic source – marine traffic – TOL at 50 Hz, 300 Hz and 6300 Hz were analyzed with regards to the distance of the nearest ship to the station. A SPL spreading of ~ 25 dB re $1\mu\text{Pa}$ (Fig.19) is observed and corresponds to the dispersion of ship source level in the area.

In the 50 Hz band, a logarithmic decrease is observed, and the SPLs appear to continue to decrease beyond 100 km – the limit imposed by the AIS. In the 300 Hz and 6300 Hz bands, respectively, a logarithmic decrease is observed up to a limit of 30 km and 10 km, beyond which the observed TOL are constant and are not likely to be affected by the nearest ship.

The decrease in sound levels as the distance from the ship increases (i.e. away from the station) is observed up to a certain limit for all three considered frequencies (Fig.19). This indicates that the noise generated by local traffic has a visible influence on the observed TOL at the three considered frequencies, up to at least 100 km from the station at 50 Hz, 30 km at 300 Hz and 10 km at 6300 Hz (Fig. 19). For the low frequencies (50 Hz), the detection range of the AIS receiver did not allow observations with the nearest ship being further than 100 km, where an influence on the SPL is still visible. We were therefore not able to define any distance threshold. For further analysis, we defined 30 km as the critical distance, beyond which we consider nearby traffic absent, for the 300 Hz and 6300 Hz frequency band. The 50 Hz frequency band was removed from nearby / distant traffic classification due to lack of distant traffic observations.

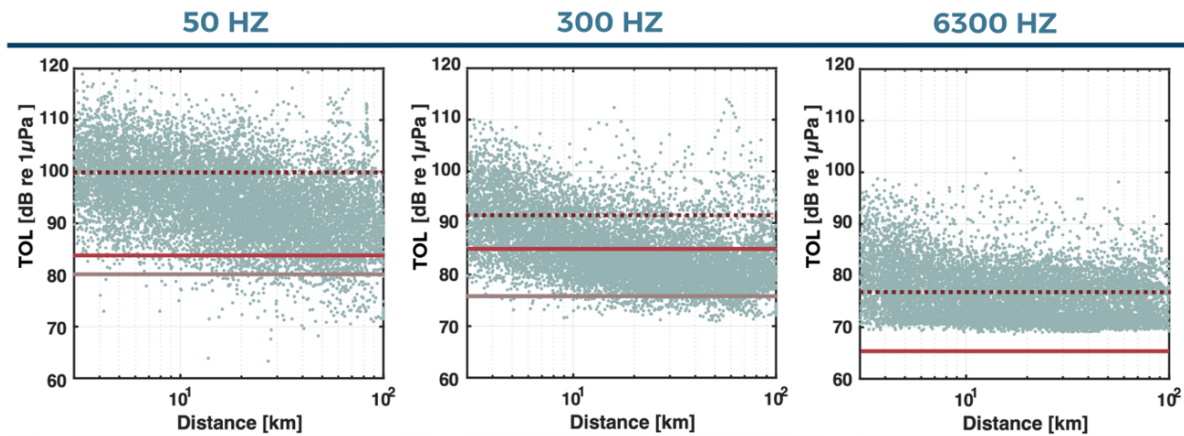


Figure 19. Noise levels recorded by the station from August to October 2021 as a function of ship distance in the absence of strong winds ($< 5 \text{ m.s}^{-1}$). Colored lines correspond to theoretical SPL from Wenz curves (1962): light red line is the “Usual Deep Water Traffic Noise”, red line is the “Usual Shallow Water Traffic Noise”, and red dotted line is the “Heavy Traffic Noise”.

For observations with ships within 5 km from the station, the median of the observed TOL values in the 50 Hz, 300 Hz and 6300 Hz bands are respectively: 102 dB re $1\mu\text{Pa}$, 93 dB re $1\mu\text{Pa}$ and 84 dB re $1\mu\text{Pa}$, which is consistent with the empirical “Heavy Traffic Noise” curve values proposed by Wenz respectively: ~ 100 dB re $1\mu\text{Pa}$, ~ 92 dB re $1\mu\text{Pa}$ and ~ 78 dB re $1\mu\text{Pa}$ (Tab.2). For the distant traffic training dataset (ships further than 30 km from the station, low wind speed conditions, and in the 300 Hz and 6300 Hz bands only), the median of the observed TOL values are respectively 84 dB re $1\mu\text{Pa}$ and 79 dB re $1\mu\text{Pa}$

(Tab.2). The two potential sources of these sound levels are wind and distant traffic. In the 50 Hz band, we can suppose that the decrease continues beyond 100 km, towards Wenz's « Usual deep traffic » limit, i.e. ~87.6 dB re 1 μ Pa. In the 300 Hz band, sound levels stabilize between the « Usual deep traffic » median, i.e. ~82.6 dB re 1 μ Pa and « Usual shallow traffic » median, i.e. ~72.7 dB re 1 μ Pa. In the 6300 Hz band, sound levels are above the limits of the Wenz traffic models (Fig.18, 19). The 80th percentile of the observed TOL, chosen as the limit for distant traffic classification in the 300 Hz and 6300 Hz bands values are respectively 87 dB re 1 μ Pa and 81 dB re 1 μ Pa (Tab.2).

OBSERVED TOL (dB re 1 μ Pa)	50 HZ	300 HZ	6300 HZ
Ships within 5 km (Median)	102	93	84
Ships beyond 30 km (Median)	-	84	79
80th percentile	-	87	81

Table 2. Observed TOL recorded by the station from August to October 2021 in different conditions of shipping traffic.

3.4. Wind-generated noise

To describe this main natural source, a comparison was made between observed TOL and observed wind speeds, in the absence of nearby ship. The correlation between the time series of TOL in the absence of ships in 30 km around the station and surface wind speed was calculated for each third-octave band with the *corr* function on Matlab (Version: 9.11.0.1809720 (R2021b) Update 1) (Fig.20). At low frequencies, up to 200 Hz, no correlation is observed (0.01-0.15), suggesting that wind-generated noise is not a major contributor to the observed sound levels. At high frequencies, from 500 Hz, a high correlation is observed (0.61-0.80), suggesting that wind-generated noise contributes to the observed sound levels.

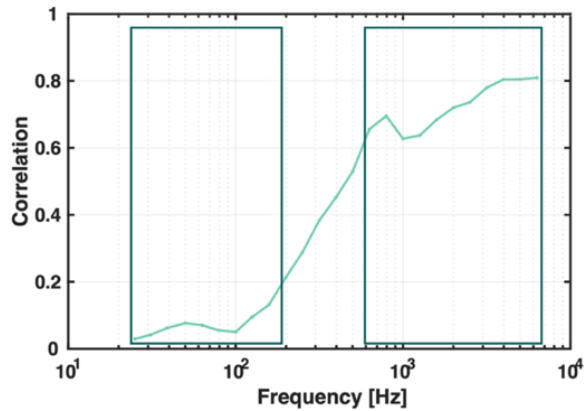


Figure 20. Correlation between noise levels observed in the absence of ships in 30 km around the station and wind speed from August to October 2021.

TOL at 300 Hz and 6300 Hz were analyzed with regards to surface wind speed on a logarithmic scale, focusing on observations in the absence of nearby ship (distance > 30 km) (Fig.21). The 50 Hz frequency band was removed from this analysis because no correlation between observed TOL and wind speeds at frequencies < 200 Hz is observed. A slight increasing in noise levels is observed with higher wind speeds in the 300 Hz frequency band (Fig.21), but it isn't as clear and doesn't follow the Wenz curve prediction as nicely as in the 6300 Hz plot. Indeed, in the 6300 Hz frequency band (Fig.21), the sound level increasing significantly with wind speed, as previously observed (Cauchy et al., 2018; Mathias et al., 2016; Vagle et al., 1990; Wenz G.W, 1962), and is consistent with the logarithmic relationship proposed by Wenz (1962).

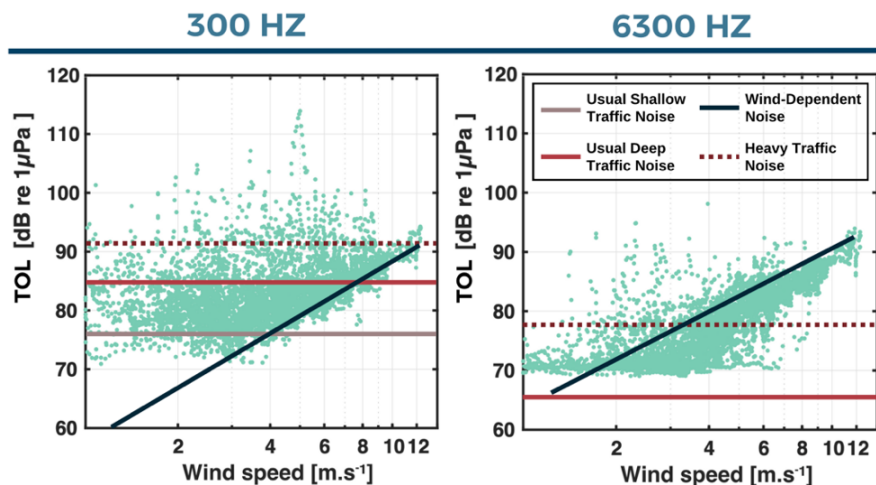


Figure 21. Noise levels recorded from August to October 2021 as a function of wind speed in the absence of ships in 30 km around the station. Colored lines correspond to theoretical SPL from Wenz curves (1962).

At 300 Hz, the presence of a significant number of observations where the SPL far exceeds the “Wind-Dependent Noise” black line – corresponding to theoretical SPL from Wenz curves (Wenz G.W, 1962) (Fig.21) – suggests that sources other than wind-generated noise are contributing to the observed TOL, which is coherent with the moderate correlation (0.4) calculated previously (Fig.20).

To create a wind-generated noise classification model, linear regressions were calculated between TOL and the logarithm of wind speed above to 6 m.s⁻¹ in the frequency bands 300 Hz and 6300 Hz, (Fig.22, Tab. 2). Observations with TOL below the limit (Eq.2) are then classified as wind-generated noise. This model has 6.1% and 0.8% error rates on the training dataset for 300 Hz and 6300 Hz, respectively.

$$\text{Limit} = \text{SPL}(w) \pm 2 \times \text{RMSe}, \quad (2)$$

where w = wind speed in m.s⁻¹ and **RMSe** = Root Mean Square Error.

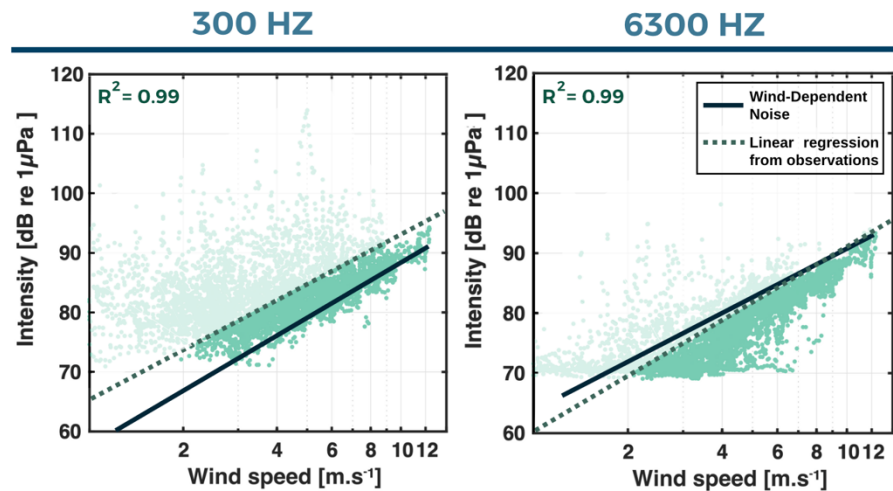


Figure 22. Noise levels recordings from August to October 2021 as a function of wind speed in the absence of ships in 30 km around the station. Dotted lines are linear regression + 2 × RMSe and bold lines are theoretical SPL from Wenz curves (1962). Darker green points are values classifying as noise generated by wind based on the linear regression.

	300 HZ	6300 HZ
a (DIRECTING COEFFICIENT)	23.6	28.5
b (ORDINATE AT ORIGIN)	68	62
(R²) (PEARSON LINEAR COEFFICIENT OF DETERMINATION)	0.9942	0.9964

Table 3. Linear wind-generated noise regression parameters.

3.5. Calculating the proportion of contribution from each source

A classification model has been created from the two models described in the previous sections. Each observation is first classified as wind-generated, or non-wind-generated, using (Eq.2). Non-wind-generated observations are classified as distant (beyond 30 km) or nearby (below 30 km) traffic using the threshold value calculated (Eq.1) and presented in (Tab.4,5). Classification results of the whole dataset are shown in Fig 23. To assess the performance of the model, the distances of ships classified by the model as nearby and distant were compared with their AIS distances. In the 300 Hz band, 78.2% of nearby ships are well classified by the model and 49.1% of distant ships are well classified (Tab.4). In the 6300 Hz band, 81.5% of nearby ships are well classified by the model, and 39.3% of distant ships are well classified (Tab.5).

		MODEL	
		300 HZ	
AIS	NEARBY	78.2%	21.8%
	DISTANT	50.9%	49.1%

Table 4. Parameters of the noise classification model in the 300 Hz band.

		MODEL	
		6300 HZ	
AIS	NEARBY	81.5%	18.5%
	DISTANT	60.7%	39.3%

Table 5. Parameters of the noise classification model in the 6300 Hz band.

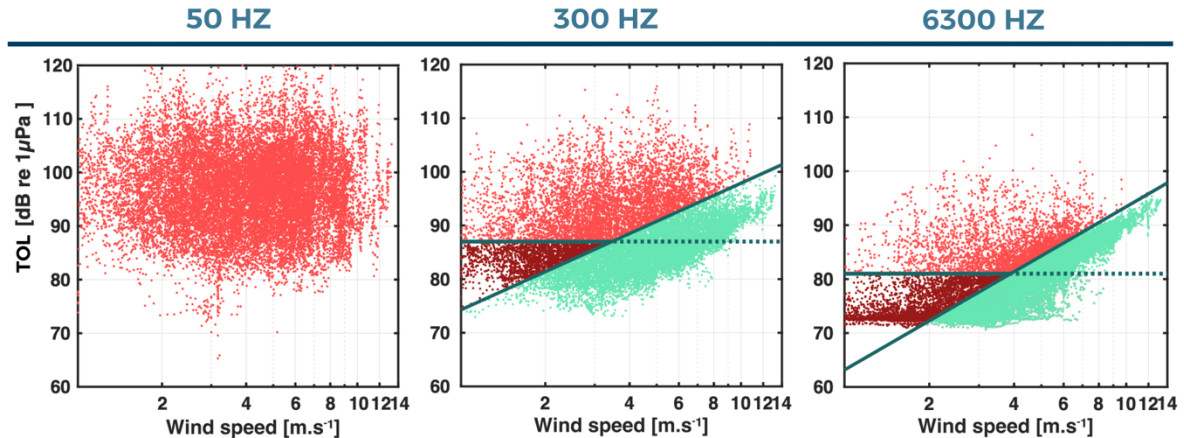


Figure 23. TOL from August to October 2021 as a function of surface wind speed in the three third-octaves bands: 50 Hz, 300 Hz and 6300 Hz. Green dots: observations classified as wind-generated sound levels, light red dots: observations classified as nearby traffic sound levels and dark red dots: observations classified as distant traffic sound levels. Ascending green line is the linear regression on winds above $6 \text{ m.s}^{-1} + 2\text{xRMSE}$ in the absence of nearby ships. Horizontal green line is the 80th percentile of observations without nearby ships and in the absence of strong winds ($< 5 \text{ m.s}^{-1}$).

3.6. Acoustic budgets

A model was built to classify the observed SPLs according to three categories corresponding to the sources responsible for these sound levels. It was applied to three frequency bands in which the sources have different contributions to robustly identify which source is responsible for noise levels in that band, based solely on a wind speed and sound intensity value.

These three frequency bands are representative of the frequency bands used by various emblematic species in the St. Lawrence: 50 Hz, representative of low frequencies, 300 Hz for medium frequencies, and 6300 Hz for high frequencies. By counting the SPL observed of each category (Fig. 23), we can determine the percentages of contributions of each source in the three frequency bands (Fig.24). The Atlas of Ocean Soundscapes, which uses physical models of sound levels created by the MERIDIAN team at the Université du Québec à Rimouski (<https://soundscape-atlas.uqar.ca>), has calculated the sound quantiles and the risk of noise impact in the St. Lawrence. This risk is expressed as a percentage probability that ship noise will have a sound impact on marine mammals, implying a reduction in detection

and communication range. Their annual sound quantile results for 2018 were compared with the sound levels observed at the station. The Soundscape Atlas median sound levels were obtained by selecting the frequencies of interest at 300m in the station area (50 Hz, 300 Hz and 6300 Hz) in the « Shipping noise » category.

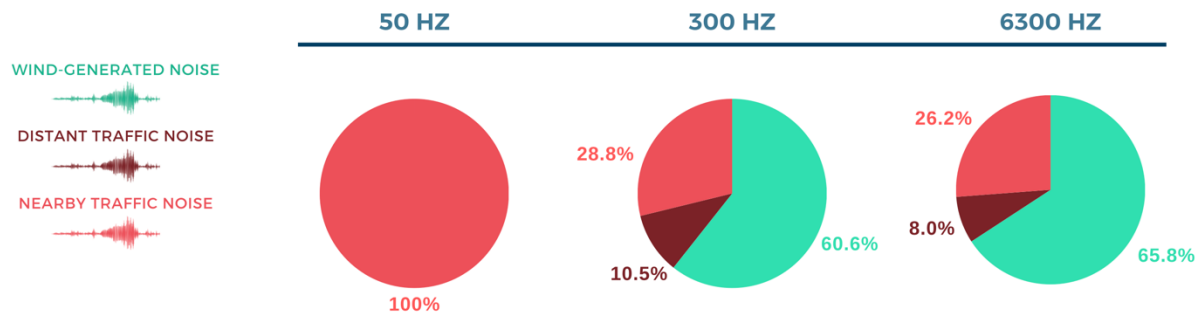


Figure 24. Acoustic budget in percentage of time of dominance of noise sources recorded at MARS station from August to October 2021 in the three third-octaves bands: 50 Hz, 300 Hz and 6300 Hz.

3.6.1.1. 50 Hz (low-frequencies)

In the 50 Hz third-octave band, the soundscape is dominated by marine traffic 100% of the recording time (Fig.24). It has been observed that even at 100 km, the nearest ship has a notable influence on the observed noise level. To be able to compare the TOL obtained in this study with those of the Atlas of Ocean Soundscapes model, the values of the atlas have been converted in dB re 1 μ Pa.

The median shipping noise from the Atlas of Ocean Soundscapes model is between ~98-104 dB re 1 μ Pa and median noise from in-situ recording at the MARS station is 103.1 dB re 1 μ Pa. As the measured noise level is coherent with the Soundscape Atlas model, the risk of sound impacts, mostly masking ambient underwater noise, and reduced detection/communication range, can be extrapolated in our conditions. The risk of sound impacts from Soundscape Atlas model in the 50 Hz third-octave band, implying a reduction in detection and communication range in the station area and at the depth 300 m is 95%. It corresponds to the probability greater than 95% that shipping noise will have a noise impact on marine mammals implying a reduction in detection and communication range in the station area at the same depth as the hydrophone used for this study (300 m).

3.6.1.2. 300 Hz (mid-frequencies)

In the 300 Hz third-octave band, the soundscape is dominated by wind-generated noise 60.6% of the recording time (Fig.24). The 39.3% of the recording time dominated by marine traffic are 28.8% for nearby traffic and 10.5% for distant traffic.

The median shipping noise from the Atlas of Ocean Soundscapes model is between 99-106 dB re 1 μ Pa and median noise from in-situ recording at the MARS station is 91 dB re 1 μ Pa. As the measured noise level is not coherent with the Soundscape Atlas model, the risk of sound impacts cannot be extrapolated in our conditions.

3.6.1.3. 6300 Hz (high frequencies)

In the 6300 Hz third-octave band, the soundscape is dominated by wind-generated noise 65.8% of the recording time (Fig.24). According to the model, nearby traffic contributes 26.2% to shipping traffic noise, and distant traffic contributes 8.0% to shipping traffic noise.

The median shipping noise from the Atlas of Ocean Soundscapes model is between 92-99 dB re 1 μ Pa and median noise from in-situ recording at the MARS station is 83 dB re 1 μ Pa. As the measured noise level is not coherent with the Soundscape Atlas model, the risk of sound impacts cannot be extrapolated in our conditions.

4. DISCUSSION

The « bottom » hydrophone was chosen because it was the one with the least self-noise in its recordings.

Whales spend most of their lives below the water's surface, moving vertically through the water column according to habits specific to each species. Beluga whale diving behavior falls into three distinct categories: dives close to the surface, « vertical round-trip » dives of 20-150 m and longer dives to a maximum depth of 350 m (Martin & Smith, 1992). Humpback

whales rarely dive beyond 120 m (Dolphin, 1987) and blue whales beyond 200 m (Lagerquist et al., 2000).

Here we assumed that both wind and ships generate a homogeneous noise throughout the water column (Buckingham, 1980).

The observed sound levels were described quantitatively by means of their distribution (median and quantiles) and are consistent with the literature and with the Soundscape Atlas. A dispersion of ~ 10 dB re $1\mu\text{Pa}$ is observed between the 25th and 75th percentile of the third-octave band 300 Hz and 6300 Hz, which is consistent with observations made previously in the region (Simard et al., 2010). The median noise level between 50-100 Hz measured at the station corresponds to heavy traffic noise conditions (Wenz G.W, 1962). The observed strong contribution of traffic noise to the station recordings is coherent with our expectations, the station being positioned between the upstream and downstream shipping lanes, at 2 km from each, with a daily traffic in the Lower St. Lawrence Estuary during the 3-month period of about 4 AIS-equipped ships per day within 100 km of the station. The distance from the nearest ship to the station was chosen as the metric to identify noise from shipping traffic at the station. However, other parameters could be considered to improve the analysis of anthropogenic noise at the station, such as the high variability (~ 25 dB re $1\mu\text{Pa}$) of the source level (Simard et al., 2016) and the number of ships within a given radius (Magnier & Gervaise, 2020). This variability between ships is one of the issues studied by the MARS project. The results of the project will eventually enable us to refine the model's parameters to better define the noise emitted by marine traffic in the St. Lawrence.

At 50 Hz, it has not been possible to determine the limiting distance to distinguish between close and distant traffic, due to the range limit of the AIS antenna. However, our observations suggest it is at least 100 km. The percentage of time when there are no ships within 100 km of the station during the recordings, is 8.5%, according to the AIS data. It would be useful to track ships beyond 100 km to observe the evolution of SPLs beyond 100 km until they reach the « distant traffic » limit level according to Wenz, and thus deduce the precise limit distance between the « distant traffic » and « nearby traffic » categories.

The contribution of wind speed is consistent with the literature. The median noise level from 800 Hz measured at the station corresponds to the spectral shape of the “Wind-Dependent Bubble Noise” curve in sea state 4. At low frequencies, up to 200 Hz, no correlation between the time series of TOL in the absence of ships in 30 km around the station and surface wind speed is observed (0.01-0.15) which, according to the literature, suggest that wind-generated noise is not a major contributor to ambient noise at low frequencies (Cauchy et al., 2018; Mathias et al., 2016; Vagle et al., 1990; Wenz G.W, 1962). At high frequencies, from 500 Hz, a high correlation is observed (0.61-0.80) which, according to the literature, suggest that wind-generated noise contributes significantly to the observed sound levels.

The three frequency bands analyzed in this study are representative of the frequencies used by baleen whales, toothed whales and seals living in the SL. The 50 Hz third-octave band is representative of the long-distance communication signals of mysticetes or of group cohesion ($f < 100$ Hz) such as the calls of the blue whale of the Northwest Atlantic (Berchok et al., 2006; Clark et al., 2009). The 300 Hz third-octave band is representative of the short-range signals of mysticetes and the low-frequency whistles of beluga whales, such as the calls of humpback whales (Clark et al., 2009). The 6300 Hz third-wave band is representative of the high-frequency whistles and clicks of belugas (Rasmussen et al., 2015; Zahn et al., 2021) such as the calls of the resident population of St. Lawrence belugas. However, seals, as the harbor seal (*Phoca vitulina*), the harp seal (*Pagophilus groenlandicus*) and the gray seal (*Halichoerus grypus*), have good low- and high-frequency hearing (50 Hz to 86 kHz) (Nachtsheim et al., 2023a).

The model's prediction performance in the 300 Hz band and in the 6300 Hz band enable us to robustly interpret the contribution percentages of the various sources, in this case wind and marine traffic. In the 50 Hz third-octave band, the soundscape is dominated by traffic-generated noise 100% of the recording time. In the 300 Hz and 6300 Hz bands, the soundscape is dominated by shipping traffic noise, respectively 39.3% and 34.2% of the recording time (Fig.12). As might be expected, given that most marine activity takes place

within a 30 km radius (Fig.16), in these frequencies respectively 28.8% and 26.2% of traffic noise is due to nearby ships, less than 30 km away in the 300 Hz band, and less than 10 km away in the 6300 Hz band.

Noise levels recorded at the station between August and October 2021 were compared with the risk predictions of the Atlas of the Ocean Soundscapes, and results indicated the potential for shipping noise in this area to lead to a masking of acoustic communication and detection, and changes in the behavior of marine mammals, which if experienced repeatedly and over prolonged periods of time may have impacts on the individual fitness of animals. They exceed 95% in the zone and are generated by shipping noise, which can be defined using the contribution classification model. Shipping noise is mainly generated by nearby traffic in the 6300 Hz band (beluga whales) and by distant traffic in the 300 Hz band (humpback whales).

The acoustic landscape in the 50 Hz third-octave band is dominated by ship traffic 100% of the time, and the noise level it generates corresponds to a level that could imply a reduction in detection and communication range in the station area. The marine mammal groups most likely to be affected by ship noise measured in the study area are therefore those that use low frequencies, namely the great whales: blue whale, fin whale; and the seals: harbor seal (*Phoca vitulina*), harp seal (*Pagophilus groenlandicus*) and gray seal (*Halichoerus grypus*), which have good low- and high-frequency hearing (50 Hz to 86 kHz). If these species are repeatedly exposed to shipping noise, they will modify their behavior in response to this source. This may affect their individual time and energy budgets, which in turn could lead to energy imbalance and fitness consequences if they are unable to compensate for the exposure (Nachtsheim et al., 2023a). These behavioral changes would lead to a reduction in the fitness of individuals, which could ultimately jeopardize the survival of whale and seal populations in the region (Jensen et al., 2009; Lillis & Boebel, 2018).

5. CONCLUSION

In this study, three months of acoustic recordings were analyzed, and time series of sound pressure levels were compared to time series of meteorological data (wind speed), and anthropic activity (shipping traffic).

A model was created to determine the source of the observed noise level, based on a model of wind-generated noise and a model of noise generated by nearby and distant marine traffic. This model for classifying the relative contributions of sources to the acoustic landscape described makes it possible to robustly identify the source responsible for noise levels in each frequency band representative of the cetacean species living in the SL, based solely on a wind speed and sound intensity value. The contribution of shipping traffic noise and wind-generated noise varies according to frequency bands. And these different contributions of shipping traffic, depending on the frequency band studied, imply different effects on the marine mammal species that use them. For example, at frequencies believed to be of importance to baleen whales (50 Hz), ship noise contributes to the soundscape 100% of the time, while at frequencies important to odontocete cetaceans such as beluga whales (6300 Hz) shipping noise accounts for 34.2% of the time.

These results make the model a useful tool for implementing and monitoring noise mitigation strategies to protect marine wildlife. Government strategies have been put in place to protect these species from acoustic disturbance, in collaboration with many other organizations, including the National Ocean and Atmospheric Administration, National Marine Fisheries Service and the Pacific Whale Watch Association (Fisheries and Oceans Canada., 2013). These strategies include slowing ships down with the creation of specific 10-knots speed reduction zones (called Seasonal Management Areas or SMAs) (National Marine Fisheries Service (NMFS) et al., 2013), maintaining distance, a noise management plan, raising awareness of whale distribution, encouraging reporting of collisions to help inform ship traffic management policies, mitigation efforts and online training for boaters and yachtsmen on how to act when a whale is in the navigation zone.

The results of this study suggest two approaches to mitigating shipping noise, depending on the cetacean's species (and therefore frequencies) targeted: 1/ reduction of the noise emitted (by reducing speed (Jensen et al., 2009; Pine et al., 2018) and/or using technological modifications to ship propellers (Findlay et al., 2023)) and 2/ remoteness. Depending on frequency (and therefore cetacean species), the relative importance of nearby and distant marine traffic varies, implying different potential effects on whales. Indeed, the different whale species that frequent the SL do not use the same frequency ranges. To reduce shipping noise at low frequencies, it is necessary to reduce the noise levels emitted by individual vessels. To reduce shipping noise in the medium and high frequencies, modifications to shipping routes can be considered to reduce the influence of nearby traffic and reduce noise levels emitted in target areas.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans le cadre de ce projet de maîtrise, trois mois de données acoustiques enregistrées au centre du chenal Laurentien ont été étudiées afin de décrire les niveaux sonores de la zone, définir le bruit généré par le vent dans la zone et ainsi quantifier les contributions relatives de chaque source en fonction des conditions environnementales.

Le bilan acoustique du paysage sonore dans la zone de la station a été calculé. Pour ce faire, les niveaux sonores observés ont été décrits quantitativement au moyen de leur distribution (médiane et quantiles). Les principales sources responsables de ces niveaux sonores ont été identifiées puis les séries temporelles des niveaux de pression acoustique ont été comparées aux séries temporelles des données météorologiques (vitesse du vent) et de l'activité anthropique (trafic maritime). Les enregistrements acoustiques révèlent des contributions majoritaires du trafic maritime dans les basses fréquences (50-100 Hz) et du vent dans les hautes fréquences (500-6300 Hz), qui correspondent aux courbes empiriques de ces sources de bruit décrites par Wenz en 1962. En effet, des corrélations positives ont été trouvées pour le bruit généré par le vent et le bruit du trafic maritime dans les basses, moyennes et hautes fréquences. La contribution relative de ces sources au paysage sonore local a alors été calculée dans les trois bandes de tiers d'octave : 50 Hz, 300 Hz et 6300 Hz.

Les contributions du bruit du trafic maritime et du bruit généré par le vent varient en fonction des bandes de fréquence.

Concernant le bruit généré par le vent, la forme spectrale des niveaux sonores a été dans un premier temps décrite. Le niveau de bruit médian de 800 Hz mesuré à la station correspond à la forme spectrale de la courbe du « bruit de bulle dépendant du vent » dans l'état de mer 4, et plus généralement, les SPL mesurés suivent la pente du bruit généré par le vent (Wenz G.W, 1962). Afin de caractériser précisément le bruit généré par le vent dans la

zone, les TOL dans les bandes de 300 Hz et 6300 Hz ont été analysés en fonction de la vitesse du vent de surface sur une échelle logarithmique. Un modèle de contribution a été construit et une tendance claire a été observée à partir d'une vitesse de vent élevée : le niveau sonore augmente significativement avec la vitesse du vent, comme observé précédemment (Cauchy et al., 2018 ; Mathias et al., 2016 ; Vagle et al., 1990 ; Wenz G.W, 1962). Le modèle a permis de définir les niveaux sonores générés par le vent dans la zone. Dans la bande de 6300 Hz, le vent serait un contributeur majeur au paysage sonore à partir de 3 m.s^{-1} et dans la bande de 300 Hz, il serait un contributeur majeur au paysage sonore à partir de 6 m.s^{-1} (Fig.22). À noter que dans la bande de 300 Hz, la présence d'un nombre important d'observations où le SPL dépasse largement la dépendance linéaire visible avec le logarithme de la vitesse du vent suggère que des sources autres que le bruit dépendant du vent contribuent au TOL observé, ce qui est cohérent avec la corrélation modérée (0,4) calculée.

Le bruit généré par le trafic maritime a été étudié, la forme spectrale des niveaux sonores a également été dans un premier temps décrite. Le niveau de bruit médian entre 50-100 Hz mesuré à la station correspond à des conditions de bruit de trafic intense (Wenz G.W, 1962), ce qui était attendu compte tenu de la position de la station entre les voies de navigation amont et aval du Saint-Laurent. Le bruit du trafic maritime se caractérise par une dispersion d'environ 10 dB re $1\mu\text{Pa}$ entre les valeurs de TOL du 25ème et du 75ème percentile, précédemment observée dans la région (Simard et al., 2010). Le trafic maritime a pu être divisé en deux catégories grâce au modèle de contribution : le trafic proche et le trafic lointain, et leurs proportions de contribution diffèrent. Dans la bande de tiers d'octave de 50 Hz, le paysage sonore est dominé par le bruit généré par le trafic pendant 100% du temps d'enregistrement. Dans la bande de 300 Hz, le paysage sonore est dominé par le trafic maritime pendant 39,3 % du temps d'enregistrement. Dans la bande de 6300 Hz, le paysage sonore est dominé par le trafic maritime pendant 34,2 % du temps d'enregistrement (Fig.10). Ces résultats indiquent que des méthodes d'atténuation différentes sont nécessaires pour des types de trafic maritime différents. En effet, pour réduire l'impact du trafic maritime lointain, il est nécessaire de réduire le bruit des navires. Cependant, pour réduire l'impact du trafic

maritime proche, il serait possible d'éloigner les voies de circulation des zones sensibles. Ces différentes contributions du trafic maritime, selon la bande de fréquence étudiée, impliquent aussi des effets différents sur les espèces de mammifères marins qui les utilisent. Les différentes espèces de baleines qui fréquentent le Saint-Laurent n'utilisent pas les mêmes gammes de fréquences. Dans la zone de la station, la baleine bleue est exposée au bruit des navires 100 % du temps - dont 70,9 % pour le trafic maritime proche et 29,1 % pour le trafic maritime lointain - tandis que le béluga y est exposé 34,2 % du temps. Dans le contexte actuel de développement durable et de protection des espèces en péril au Canada, il est important de tenir compte de ces différences de fréquences de communication et de noter que les stratégies de protection mises en place ne sont donc pas les mêmes selon l'espèce considérée (i.e. béluga ou rorqual bleu).

Dans l'ensemble, cette étude de contribution au paysage sonore a permis de décrire le bruit généré par le vent en fonction de sa vitesse, de définir deux catégories de trafic maritime contribuant au paysage sonore et de développer un modèle de contributeur aux niveaux sonores de la zone. À partir d'une vitesse de vent et d'un niveau d'intensité sonore, il est désormais possible de connaître la source responsable de ce niveau sonore. Cependant, des analyses similaires à la présente étude sont recommandées pour les enregistrements des périodes de mise à l'eau de la station en 2022 et 2023. Cela permettra de compléter les interprétations de la contribution du vent et du trafic maritime au paysage sonore et d'améliorer la robustesse du modèle. Elle permettra également d'élargir les connaissances sur le bruit généré par le vent dans la zone, en ajoutant par exemple des paramètres environnementaux à sa description, comme la direction du vent et la hauteur de vagues. Ainsi que pour la description du trafic maritime, en ajoutant par exemple la variabilité des niveaux de bruit entre les navires et le nombre de navire dans un périmètre donné autour de la station. De plus, la même distance limite de 30 km a été établie pour distinguer la catégorie des bateaux proches, de celle des bateaux lointains à 300 Hz et 6300 Hz. Observer le comportement des niveaux sonores après 100 km dans la bande des basses fréquences (50 Hz) permettrait de déduire la distance limite précise entre les deux catégories et de comparer les résultats au modèle empirique de Wenz. Le bruit du trafic maritime ainsi défini

pourrait être associé aux seuils sonores provoquant des effets de masquage sur les communications des mammifères marins. Ainsi, il serait possible d'établir les proportions de contribution de bruit de chacune des sources pouvant masquer dans la région du Saint-Laurent, un résultat important à des fins de conservation.

Bien que les contributions calculées dans cette étude soient en accord avec les études précédentes réalisées dans la région et sur les sources sonores majeures (Simard et al., 2010 ; Cauchy et al., 2018 ; Mathias et al., 2016 ; Vagle et al., 1990 ; Wenz G.W, 1962), des analyses de propagation sonore dans la zone de la station sont recommandées. Cela permettra dans un premier temps, de renforcer les résultats de contribution sonore et ainsi d'établir un paysage sonore complet pour les enregistrements acoustiques dans la région (ex : Erbe et al., 2016) ; et dans un second temps, d'estimer l'empreinte acoustique des navires – l'aire dans laquelle le bruit généré par le navire dépasse le bruit ambiant naturel (généré par le vent), permettant ainsi de contrôler la vitesse des navires en fonction des conditions météorologiques pour minimiser leur effet sur la faune marine. Toutes ces recommandations pourraient améliorer le modèle de contribution pour les enregistrements étudiés dans ce travail de maîtrise ainsi que les interprétations d'effets sur les mammifères marins de la région dérivées de ceux-ci.

Avant la réalisation de ce projet de maîtrise, les niveaux sonores du Saint-Laurent avaient été décrits. Désormais, son budget acoustique a été établi et ses principaux contributeurs, le vent et les navires, ont été déterminés et quantifiés.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Acevedo, A. (1991). Interactions between boats and bottlenose dolphins, *Tursiops truncatus*, in the entrance to Ensenada de La Paz, Mexico. *Aquatic Mammals*, 17(3), 120-124.
- André, M., Johansson, T., Delory, E., & Van der Schaar, M. (2005). *Cetacean Biosonar and Noise Pollution*. IEEE.
- Andrew, R. K., Howe, B. M., Mercer, J. A., & Dzieciuch, M. A. (2002). Ocean ambient sound: Comparing the 1960s with the 1990s for a receiver off the California coast. *Acoustics research letters online*, 3(2), 65-70.
- ANSI/ASA S3.21-2004 (R 2009) American National Standard Methods for Manual Pure- Tone Threshold Audiometry.
- Arveson, P. T., & Vendittis, D. J. (2000). Radiated noise characteristics of a modern cargo ship. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 107(1), 118-129.
- Au, W. W., & Hastings, M. C. (2008). *Principles of marine bioacoustics* (Vol. 510). New York: Springer.
- Au, W. W., Carder, D. A., Penner, R. H., & Scronce, B. L. (1985). Demonstration of adaptation in beluga whale echolocation signals. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 77(2), 726-730.

- Aulanier F, Simard Y, Roy N, Gervaise C, & Bandet M. (2017).** Effects of shipping on marine acoustic habitats in Canadian Arctic estimated via probabilistic modeling and mapping. *Marine Pollution Bulletin*, 125(1–2), 115–131. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.08.002>
- Aulanier, F., Simard, Y., Roy, N., Gervaise, C., & Bandet, M. (2016).** *Spatial-temporal exposure of blue whale habitats to shipping noise in St. Lawrence system.* <http://www.dfo-mpo.gc.ca/csas-sccs/>
- Bailleul, F., Lesage, V., Power, M., Doidge, D. W., & Hammill, M. O. (2012a).** Differences in diving and movement patterns of two groups of beluga whales in a changing Arctic environment reveal discrete populations. *Endangered Species Research*, 17(1), 27–41. <https://doi.org/10.3354/esr00420>
- Bailleul, F., Lesage, V., Power, M., Doidge, D. W., & Hammill, M. O. (2012b).** Migration phenology of beluga whales in a changing Arctic. *Climate Research*, 53(3), 169–178. <https://doi.org/10.3354/cr01104>
- Banjós, R. E. (1966).** The Cold Layer in the Gulf of St. Lawrence. *Journal of Geophysical Research*, 71(6).
- Barclay, D. R., & Buckingham, M. J. (2013).** Depth dependence of wind-driven, broadband ambient noise in the Philippine Sea. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 133(1), 62–71. <https://doi.org/10.1121/1.4768885>
- Barkham, S. H. (1984).** The Basque whaling establishments in Labrador 1536-1632-A summary. *Arctic*, 37(4), 515-519.
- Beamish, P. (1974).** Whale acoustics. *Canadian Acoustics*, 2(4), 8-12.

- B**eamish, P., & Mitchell, E. (1971). Ultrasonic sounds recorded in the presence of a blue whale *Balaenoptera musculus*. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*. Elsevier, 18(8), 803.
- B**eauchamp, G. (2009). How does food density influence vigilance in birds and mammals?.
- Animal Behaviour*, 78(2), 223-231.
- B**éland, P., Martineau, D., Robichaud, P., Plante, R. and Greendale, R. (1987). Échouages de mammifères marins sur les côtes du Québec dans l'Estuaire et le Golfe du Saint-Laurent de 1982 à 1985. Rapport technique canadien des sciences halieutiques et aquatiques. (In press.)
- B**elkovitch, V. M., & Shekotov, M. N. (1993). *The belukha whale: natural behavior and bioacoustics*.
- B**enoit, J., El-Sabh, M. I., & Tang, C. L. (1985). Structure and Seasonal Characteristics of the Gaspé Current. *Journal of Geophysical Research*, 90(C2), 3225–3236.
<https://doi.org/10.1029/JC090iC02p03225>
- B**erchok, C. L., Bradley, D. L., & Gabrielson, T. B. (2006). St. Lawrence blue whale vocalizations revisited: Characterization of calls detected from 1998 to 2001. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 120(4), 2340–2354.
<https://doi.org/10.1121/1.2335676>
- B**lane, J. M. (1990). Avoidance and Interactive Behaviour of the St. Lawrence Beluga: Whale (*Delphinapterus leucas*) in Response to Recreational Boating. *Geography & IES*. University of Toronto Theses.

Boivin, Y., & INESL. (1990). Survols aériens pour l'estimation de la distribution saisonnière et des déplacements des bélugas, INESL, Montréal, Québec. 91 p. Available at : Institut National d'Ecotoxicologie du Saint-Laurent, 5040 Mentana, Montréal, QC, CAN. H2J3C3

Bourgault, D., Saucier, F. J., & Lin, C. A. (2001). Shear instability in the St. Lawrence Estuary, Canada: A comparison of fine-scale observations and estuarine circulation model results. In *Journal of Geophysical Research: Oceans* (Vol. 106, Issue C5, pp. 9393–9409). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1029/2000jc900165>

Boyd, I. L., Frisk, G., Urban, E., Tyack, P., Ausubel, J., Seeyave, S., Cato, D., Southal, B., Weise, M., Andrew, R., Akamatsu, T., Ling, R. D., Erbe, C., Farmer, D., Gentry, R., Gross, T., Hawkins, A., Li, F., Metcalf, K., ... Shinke, T. (2011). An international quietocean experiment. *Oceanography*, *24*(2), 174–181. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2011.37>

Brillant, S. W., Wimmer, T., Rangeley, R. W., & Taggart, C. T. (2017). A timely opportunity to protect North Atlantic right whales in Canada. *Marine Policy*, *81*, 160–166. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2017.03.030>

Brodie, P.F., 1989. The white whale, *Delphinapterus leucas* (Pallas, 1776). In: Ridgway, S.H., Harrison, R.J. (Eds.), *Handbook of marine mammals*, vol. 4. Academic Press, London, pp. 119–144.

Brumm, H. (2004). The impact of environmental noise on song amplitude in a territorial bird. *Journal of animal ecology*, 434-440.

- B**uckingham, M. J. (1980). A theoretical model of ambient noise in a low-loss, shallow waterchannel. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 67(4), 1186–1192. <http://asadl.org/terms>
- C**alambokidis, J., & Barlow, J. (2004). Abundance of Blue and Humpback Whales in the Eastern North Pacific Estimated by Capture-Recapture and Line-Transect Methods. *Marine Mammal Science*, 20(1), 63–85.
- C**alambokidis, J., Douglas, A., Falcone, E., & Schlender, L. (2007). Final report: Abundance of blue whales off the US west coast using photo identification. *In Report to the Southwest Fisheries Science Centre*. Cascadia Research.
- C**alambokidis, J., Steiger, G. H., Straley, J. M., Herman, L. M., Cerchio, S., Salden, D. R., Urban, J., Jacobsen, J. K., Ziegler, O. Von, Balcomb, K. C., & Gabriele, C. M. (2001). Movements and Population Structure of Humpback Whales in the North Pacific. *Marine Mammal Science*, 17(4), 769–794.
- C**alambokidis, J., Steiger, G. H., Rasmussen, K., Urban, J. R., Ladron de Guevara, P. P., Salinas, M., Jacobsen, J. K., Scott Baker, C., & Herman, L. M. (2000). Migratory destinations of humpback whales that feed off California, Oregon and Washington. *Marine Ecology Progress Series*, 192, 295–304.
- C**anada. Department of Fisheries and Oceans. (2020). *Action plan to reduce the impact of noise on the beluga whale (Delphinapterus leucas) and other marine mammals at risk in the St. Lawrence estuary*.
- C**astellote, M., Mooney, T. A., Quakenbush, L., Hobbs, R., Goertz, C., & Gaglione, E. (2014). Baseline hearing abilities and variability in wild beluga whales (Delphinapterus leucas). *Journal of Experimental Biology*, 217(10), 1682–1691. <https://doi.org/10.1242/jeb.093252>

- Cauchy, P., Heywood, K. J., Merchant, N. D., Risch, D., Queste, B. Y., & Testor, P. (2023). Gliders for passive acoustic monitoring of the oceanic environment. *Frontiers in Remote Sensing*, 4, 1106533.
- Cauchy, P., Heywood, K. J., Merchant, N. D., Queste, B. Y., & Testor, P. (2018). Wind Speed Measured from Underwater Gliders Using Passive Acoustics. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-17>
- Caupin, F., & Herbert, E. (2006). Cavitation in water: a review. *Comptes Rendus Physique*, 7(9-10), 1000-1017.
- Cerchio, S., & Dahlheim, M. (2001). Variation in feeding vocalizations of humpback whales megaptera novaeangliae from southeast alaska. *Bioacoustics*, 11(4), 277–295. <https://doi.org/10.1080/09524622.2001.9753468>
- Chaire de recherche du MPO à l'ISMER-UQAR en acoustique marine appliquée à la recherche sur l'écosystème et les mammifères marins. (2021). Ocean Soundscape Atlas [Data set]. <https://doi.org/10.26071/ogsl-a0016579-2fa>
- Charlevoix, P. F. X. D., & Bellin, J. N. (1744). Histoire et description générale de la Nouvelle France, avec le Journal historique d'un voyage fait par ordre du roi dans l'Amérique Septentrionale. (No Title).
- Chion, C., Lagrois, D., Dupras, J., Turgeon, S., McQuinn, I. H., Michaud, R., Ménard, N., & Parrott, L. (2017). Underwater acoustic impacts of shipping management measures: Results from a social-ecological model of boat and whale movements in the St. Lawrence River Estuary (Canada). *Ecological Modelling*, 354, 72–87. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2017.03.014>

- Christensen, I., Haug, T., & Øien, N. (1992). A review of feeding and reproduction in largebaleen whales (Mysticeti) and sperm whales *Physeter macrocephalus* in Norwegian and adjacent waters. *Fauna Norvegica Series A*, 13, 39–48.
- Clapham, P. J. (2018). Humpback whale: *Megaptera novaeangliae*. In *Encyclopedia of marine mammals* (pp. 489-492). Academic Press.
- Clapham, P. J. (2009). Humpback whale: *Megaptera novaeangliae*. In *Encyclopedia of Marine Mammals*. 582-585. 10.1016/B978-0-12-373553-9.00135-8.
- Clapham, P. J. (2000). The humpback whale. *Cetacean Societies, field studies of dolphins and whales*. Chicago: The University of Chicago, 173-196.
- Clapham, P. J., Young, S. B., & Brownell JR, R. L. (1999). Baleen whales: conservation issues and the status of the most endangered populations. *Mammal Review*, 29(1), 37–62.
- Clapham, P. J., & Mead, J. G. (1999). *Megaptera novaeangliae*. *Mammalian Species* 60(4), 1–9.
- Clapham, P. J. (1996). The social and reproductive biology of humpback whales: anecological perspective. *Mammal Review*, 26(1), 27-49.
- Clark, C. W., Ellison, W. T., Southall, B. L., Hatch, L., Van Parijs, S. M., Frankel, A., & Ponirakis, D. (2009). Acoustic masking in marine ecosystems: Intuitions, analysis, and implication. *Marine Ecology Progress Series*, 395, 201–222. <https://doi.org/10.3354/meps08402>
- Comeau, N. (1945). *La Vie et le Sport sur la Côte-Nord*, traduit de l'anglais par Nazaire Levasseur. Québec, Garneau.

- Contribution from the European Union. (2018). *United Nations Open-ended Informal Consultative Process on Oceans and the Law of the Sea The effects of anthropogenic underwater noise Contribution from the European Union.* <http://eur-lex.europa.eu/legal->
- Cooke, J. G. (2018). Megaptera novaeangliae. The IUCN Red List of Threatened Species 2018:e.T13006A50362794. In IUCN. <https://doi.org/10.2305/IUCN.UK.2018-2.RLTS.T13006A50362794.en>
- Cooke, J. G. (2019). Balaenoptera musculus, Blue Whale (errata version published in 2019). The *IUCN Red List Of Threatened Species*, 8235, 2018–2. <https://doi.org/10.2305/IUCN.UK.2018>
- Corkeron, P. J., & Connor, R. C. (1999). Why Do Baleen Whales Migrate? *Marine MammalScience*, 15(4), 1228–1229.
- COSEPAC, 2009. Évaluation et Rapport de situation du COSEPAC sur la cicindèle verte à lunules (*Cicindela patruela*) au Canada. *Comité sur la situation des espèces en péril au Canada*. Ottawa. vii + 39 p.
- Cummings, W. C., & Thompson, P. O. (1971). Underwater sounds from the blue whale, *Balaenoptera musculus*. *The journal of the Acoustical Society of America*, 50(4B), 1193-1198.
- Currie, J. J., Stack, S. H., & Kaufman, G. D. (2023). Modelling whale-vessel encounters: the role of speed in mitigating collisions with humpback whales (*Megaptera novaeangliae*). *Journal of Cetacean Research and Management*, 17, 57–63.

- D'Arcy, J.** (2009). *La Voie Maritime du Saint-Laurent : Cinquante Ans et l'Avenir à Nos Portes*. Penumbra Press.
- Dahlheim., E.** 1987. *Bioacoustics of the gray whale (Eschrichtias robustus)*. Ph.D. thesis, University of British Columbia, Vancouver, B.C. 315 p
- Darling, J. D., & Bérubé, M.** (2001). Interactions Of Singing Humpback Whales with OtherMales. *Marine Mammal Science*, 17(3), 570–584.
- Darling, J. D., Jones, M. E., Nicklin, C. P., & Darling1, J. D.** (2006). Humpback Whale Songs: Do They Organize Males during the Breeding Season? *Behaviour*, 143(9), 1051–1101.
- De Vernal, A., St-Onge, G., & Gilbert, D.** (2011). Oceanography and quaternary geology ofthe St. Lawrence Estuary and the Saguenay Fjord. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 14(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/14/1/012004>
- Delarue, J., Kowarski, K. A., Maxner, E. E., MacDonnell, J. T., & Martin, S. B.** (2018). Acoustic monitoring along Canada's east coast: August 2015 to July 2017. JASCO Applied Sciences for Environmental Studies Research Fund: Dartmouth, NS, Canada.
- Demers, A., & Canada. Department of Fisheries and Oceans.** (2012). *Recovery strategy forthe beluga whale (Delphinapterus leucas), St. Lawrence Estuary population in Canada*. Fisheries and Oceans Canada.
- Dickinson, A. B., & Sanger, C. W.** (2005). Twentieth-century shore-station whaling in Newfoundland and Labrador. *McGill-Queen's Press-MQUP*.

- D**ionne, S., 2001. Plan de conservation des écosystèmes du parc marin du Saguenay–Saint-Laurent. *Parcs Canada*, 538 pp.
- D**olphin, W. F. (1987). Dive behavior and estimated energy expenditure of foraging humpback whales in southeast Alaska. *Canadian Journal of Zoology*, 65(2), 354–362.
- D**oniol-Valcroze, T., Berteaux, D., Larouche, P., & Sears, R. (2007). *Influence of thermal fronts on habitat selection by four rorqual whale species in the Gulf of St. Lawrence.*
- D**rinkwater, K. F., & Gilbert, D. (2004). Hydrographic variability in the waters of the Gulf of St. Lawrence, the Scotian Shelf and the eastern Gulf of Maine (NAFO Subarea 4) during 1991-2000. *Journal of Northwest Atlantic Fishery Science*, 34, 85–101. <https://doi.org/10.2960/J.v34.m545>
- D**uchesne, M. J., Pinet, N., Bédard, K., St-Onge, G., Lajeunesse, P., Campbell, D. C., & Bolduc, A. (2010). Role of the bedrock topography in the Quaternary filling of a giant estuarine basin: The Lower St. Lawrence Estuary, Eastern Canada. *Basin Research*, 22(6), 933–951. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2117.2009.00457.x>
- D**uchesne, M. J., Pinet, N., Bolduc, A., Bédard, K., & Lavoie, D. (2007). Seismic stratigraphy of the lower St. Lawrence River estuary (Quebec) Quaternary deposits and seismic signature of the underlying geological domains. In *Geological Survey of Canada*. Geological Survey of Canada.
- E**dds, P. L. (1982). Vocalizations of the Blue Whale, *Balaenoptera musculus*, in the St. Lawrence River. *Journal of Mammalogy*, 63(2), 345–347.

- E**dds, P. L., & Macfarlane, J. A. F. (1987). Occurrence and general behavior of balaenopterid cetaceans summering in the St. Lawrence Estuary, Canada. *Canadian Journal of Zoology*, 65(6), 1363–1376.
- E**dds, P. L., Andrew, J., & Macfarlane, F. (1987). Occurrence and general behavior of balaenopterid cetaceans summering in the St. Lawrence Estuary, Canada. *Canadian Journal of Zoology*, 65(6), 1363–1376. www.nrcresearchpress.com
- E**l-Sabh, M. (1976). Surface Circulation Pattern in the Gulf of St. Lawrence. *Journal of the Fisheries Board of Canada*, 33(1), 124–138. www.nrcresearchpress.com
- E**l-Sabh, M. I., & Silverberg, N. (1990). Oceanography of a Large-Scale Estuarine System - The St. Lawrence. In M. J. Bowman, R. T. Barber, C. N. K. Mooers, & J. A. Raven (Eds.), *Oceanography of a Large-Scale Estuarine System* (Springer-Verlag). Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-7534-4>
- E**lvin, S. S., & Taggart, C. T. (2008). Right whales and vessels in Canadian waters. *Marine Policy*, 32(3), 379–386. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2007.08.001>
- E**nglish, G., & Hackston, D. C. (2013). *Impacts environnementaux et sociaux du transport maritime dans la région des Grands Lacs et de la Voie maritime du Saint-Laurent*.
- E**rbe, C. (2002). Underwater noise of whale-watching boats and potential effects on killer whales (*Orcinus orca*), based on an acoustic impact model. *Marine Mammal Science*, 18(2), 394–418.
- E**rbe, C., & Farmer, D. M. (1998). Masked hearing thresholds of a beluga whale (*Delphinapterus leucas*) in icebreaker noise. *Deep-Sea Research Part II: Topical*

Studies in Oceanography, 45(7), 1373–1388. [https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(98\)00027-7](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(98)00027-7)

Erbe, C., Dent, M. L., Gannon, W. L., McCauley, R. D., Römer, H., Southall, B. L. & Thomas, J. A. (2022). The effects of noise on animals. In *Exploring Animal Behavior Through Sound: Volume 1: Methods* (pp. 459-506). Cham: Springer International Publishing.

Evans, D. L., Watts, D. R., Halpern, D., & Bourassa, S. (1984). Oceanic winds measured from the seafloor. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 89(C3), 3457-3461.

Farina, A. (2014). Soundscape and landscape ecology. *Soundscape ecology: Principles, patterns, methods and applications*, 1-28.

Farina, A., Gage, S.H., Salutari, P. (2018). Testing the ecoacoustics event detection and identification (EEDI) model on Mediterranean soundscapes. *Ecol. Ind.* 85, 698–715.

Farji-Brener, A. G., Dalton, M. C., Balza, U., Curtis, A., Lemus-Domínguez, I., Fernández-Hilario, R., & Cáceres-Levi, D. (2018). Working in the rain? Why leaf-cutting ants stop foraging when it's raining. *Insectes Sociaux*, 65, 233-239.

Finley, K. 1. (1990). Isabella Bay, Baffin Island: an important historical and present-day concentration area for the endangered bowhead whale (*Balaena mysticetus*) of the eastern Canadian Arctic. *Arctic*, 137-152.

Finley, K. J., & Renaud, W. E. (1980). Marine Mammals Inhabiting the Baffin Bay North Water in Winter. *Arctic Institute of North America*, 33(4), 724–738.

- F**inneran, J. J., Schlundt, C. E., Carder, D. A., & Ridgway, S. H. (2002). Auditory filter shapes for the bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*) and the white whale (*Delphinapterus leucas*) derived with notched noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 112(1), 322-328.
- F**isheries and Oceans Canada. (2013). *Recovery Strategy for the North Pacific Humpback Whale (Megaptera novaeangliae) in Canada. Species at Risk Act Recovery Strategy Series.*
- F**isheries and Oceans Canada. (2022). *Données de surface en temps réel provenant des bouées VIKING dans le cadre du Programme de monitoring de la zone Atlantique (PMZA) [Data set].* (NaN). <https://doi.org/10.26071/ogsl-06f7045a-51a5>
- F**letcher, J. L., & Busnel, R. G. (1978). Summary and discussion. Effects of noise on wildlife. *Academic Press, Inc., NY.* 305pp, 303-305.
- F**oote, A., Osborne, R., & Hoelzel, A. (2004). Whale-call response to masking boat noise. *Nature*, 428, 910–910.
- F**rancis, C. D., Ortega, C. P., & Cruz, A. (2009). Noise pollution changes avian communities and species interactions. *Current biology*, 19(16), 1415-1419.
- F**risk, G. V. (2012). Noise economics: The relationship between ambient noise levels in the sea and global economic trends. *Scientific reports*, 2(1), 437.
- G**eipel, I., Smeekes, M. J., Halfwerk, W., & Page, R. A. (2019). Noise as an informational cue for decision-making: the sound of rain delays bat emergence. *Journal of Experimental Biology*, 222(3), jeb192005.

- Gervaise, C., Aulanier, F., Simard, Y., & Roy, N. (2015).** Mapping probability of shipping sound exposure level. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *137*(6), EL429–EL435. <https://doi.org/10.1121/1.4921673>
- Gervaise, C., Simard, Y., Aulanier, F., & Roy, N. (2021).** Optimizing passive acoustic systems for marine mammal detection and localization: Application to real-time monitoring north Atlantic right whales in Gulf of St. Lawrence. *Applied Acoustics*, *178*, 107949. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.107949>
- Gervaise, C., Simard, Y., Roy, N., Kinda, B., Menard, N., & Ménard, N. (2012).** Shippingnoise in whale habitat: Characteristics, sources, budget, and impact on belugas in Saguenay-St. Lawrence Marine Park hub. *Journal of the Acoustical Society of America*, *132*(1). <https://doi.org/10.1121/1.4728190>
- Giard, S., Simard, Y., & Roy, N. (2020).** Decadal passive acoustics time series of St. Lawrence estuary beluga. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *147*(3), 1874–1884. <https://doi.org/10.1121/10.0000922>
- Gibb, R., Browning, E., Glover-Kapfer, P., & Jones, K. E. (2019).** Emerging opportunities and challenges for passive acoustics in ecological assessment and monitoring. *Methods in Ecology and Evolution*, *10*(2), 169-185.
- Gilbert, D., & Pettigrew, B. (1997).** Interannual variability (1948-1994) of the CIL core temperature in the Gulf of St. Lawrence. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, *54*, 57–67.
- Gomez, C., Lawson, J. W., Wright, A. J., Buren, A. D., Tollit, D., & Lesage, V. (2016).** A systematic review on the behavioural responses of wild marine mammals to noise: the disparity between science and policy. *Canadian Journal of Zoology*, *94*(12), 801-819.

Gordon, J. C. D., Moscrop, A., Carlson, C., Ingram, S., Leaper, R., Matthews, J., et al. (1998). Distribution, movements, and residency of sperm whales off the commonwealth of Dominica, Eastern Caribbean: implications for the development and regulation of the local whale watching industry. *Report of the International Whaling Commission*, 48, 551e557.

Gosselin, J. F., Lesage, V., Robillard, A. (2001). Population index estimate for the beluga of the St Lawrence River Estuary in 2000. DFO Can. Sci. Advis. Secr., Sci. Advis. Rep. 2001/049. Available at: http://www.meds-sdmm.dfo-mpo.gc.ca/csas/applications/Publications/search_f.asp

Gosselin, J.-F., Hammill, M. O., Mosnier, A., & Lesage, V. (2017). *Abundance index of St. Lawrence Estuary beluga, Delphinapterus leucas, from aerial visual surveys flown in August 2014 and an update on reported deaths.* <http://www.dfo-mpo.gc.ca/csas-sccs/>

Gosselin, J.-F., Hammill, M.O., Lesage, V. (2007). Comparison of photographic and visual abundance indices of belugas in the St. Lawrence Estuary in 2003 and 2005. DFO Can. Sci. Advis. Secr., Res. Doc. 2007/025, 27 p. Available at: http://www.meds-sdmm.dfo-mpo.gc.ca/csas/applications/Publications/search_f.asp

Gratton, Y., Mertz, G., & Gagne, J. A. (1988). Satellite observations of tidal upwelling and mixing in the St. Lawrence estuary. *Journal of Geophysical Research*, 93(C6), 6947–6954. <https://doi.org/10.1029/JC093iC06p06947>

Gregg, E. J., Nichol, L., Ford, J. K. B., Ellis, G., & Trites, A. W. (2000). Migration and Population Structure of Northeastern Pacific Whales Off Coastal British Columbia: An Analysis of Commercial Whaling Records from 1908-1967. *Marine Mammal Science*, 16(4), 699–727.

- G**rinfeder, E., Hauptert, S., Ducrettet, M., Barlet, J., Reynet, M. P., Sèbe, F., & Sueur, J. (2022). Soundscape dynamics of a cold protected forest: dominance of aircraft noise. *Landscape Ecology*, 37(2), 567–582. <https://doi.org/10.1007/s10980-021-01360-1>
- H**ain, J. H. W., Carter, G. R., Kraus, S. D., Mayo, C. A., & Winn, H. E. (1982). Megaptera Novaengliae, in the Western North Atlantic. *Fish Bull*, 80, 259.
- H**aley, D. (1986). *Marine Mammals of Eastern North Pacific and Arctic Waters* (Pacific Search Press).
- H**ammill, M.O., Measures, L.N., Gosselin, J.-F., Lesage, V. 2007. Lack of recovery in St Lawrence estuary beluga. DFO Can. Sci. Advis. Sec., Sci. Advis. Rep. 2007/026.
- H**anache, P., Spataro, T., Firmat, C., Boyer, N., Fonseca, P., & Médoc, V. (2020). Noise- induced reduction in the attack rate of a planktivorous freshwater fish revealed by functional response analysis. *Freshwater Biology*, 65(1), 75-85.
- H**ildebrand, J. A. (2009). Anthropogenic and natural sources of ambient noise in the ocean. *Marine Ecology Progress Series*, 395, 5–20. <https://doi.org/10.3354/meps08353>
- H**jort, J., & Ruud, J. T. (1929). Whaling and fishing in the North Atlantic. <https://doi.org/10.17895/ices.pub.19902097>
- H**olt, M. M., Noren, D. P., Veirs, V., Emmons, C. K., & Veirs, S. (2009). Speaking up: Killer whales (*Orcinus orca*) increase their call amplitude in response to vessel noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 125(1), EL27–EL32. <https://doi.org/10.1121/1.3040028>

- Holt**, M. M., Tennessen, J. B., Hanson, M. B., Emmons, C. K., Giles, D. A., Hogan, J. T., & Ford, M. J. (2021). Vessels and their sounds reduce prey capture effort by endangered killer whales (*Orcinus orca*). *Marine Environmental Research*, 170. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2021.105429>
- Ingram**, R. G. (1976). Characteristics of a tide-induced estuarine front. *Journal of Geophysical Research*, 81(12), 1951–1959. <https://doi.org/10.1029/jc081i012p01951>
- Ingram**, R. G., & El-Sabh, M. I. (1990). Fronts and mesoscale features in the St Lawrence estuary. *Oceanography of a Large-Scale Estuarine System*, 39, 71–93. <https://doi.org/10.1029/ce039p0071>
- Jensen**, F. H., Bejder, L., Wahlberg, M., Soto, N. A., Johnson, M., & Madsen, P. T. (2009). Vessel noise effects on delphinid communication. *Marine Ecology Progress Series*, 395, 161–175. <https://doi.org/10.3354/meps08204>
- Jonsgård**, Å. (1966). The distribution of Balaenopteridae in the north Atlantic Ocean. *Whales, dolphins and porpoises*, 114-124.
- Jonsgård**, Å. (1955). The stocks of blue whales (*Balaenoptera musculus*) in the North Atlantic Ocean and adjacent Arctic waters. *Norsk Hvalfangsttid*, 44(9), 297–311.
- Jurasz**, C. M., & Jurasz, V. P. (1979). *Feeding modes of the humpback whale, Megaptera novaeangliae, in southeast Alaska.*
- Kastelein**, R. A., Van Heerden, D., Gransier, R., & Hoek, L. (2013). Behavioral responses of a harbor porpoise (*Phocoena phocoena*) to playbacks of broadband

pile driving sounds. *Marine Environmental Research*, 92, 206–214.
<https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2013.09.020>

Katona, S. K., & Beard, J. A. (1990). Population Size, Migrations and feeding Aggregations of the Humpback Whale (*Megaptera novaeangliae*) in the Western North Atlantic Ocean. *Report of the International Whaling Commission (Special Issue 12)*, 295–306.

Kawamura, A. (1980). A Review of Food of Balaenopterid Whales. *Sci. Rep. Whales Res. Inst.*, 32, 155–197.

Ketchum, B. H., & Rawn, A. M. (1951). *The exchanges of fresh and salt waters in tidal estuaries*.

Kibblewhite, A. C., Denham, R. N., & Barnes, D. J. (1967). Unusual Low-Frequency Signals Observed in New Zealand Waters. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 41(3), 644–655. <http://acousticalsociety.org/content/terms>.

Kinda, G. B., Simard, Y., Gervaise, C., Mars, J. I., & Fortier, L. (2015). Arctic underwater noise transients from sea ice deformation: Characteristics, annual time series, and forcing in Beaufort Sea. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 138(4), 2034-2045.

Kinda, G. B., Simard, Y., Gervaise, C., Mars, J. I., & Fortier, L. (2013). Under-ice ambient noise in Eastern Beaufort Sea, Canadian Arctic, and its relation to environmental forcing. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 134(1), 77-87.

Kingsley, M. C. S. (1993). *Census, trend and status of the St. Lawrence beluga population in 1992*.

- Kingsley, M. C. S.** (1996). *Population Index Estimate for the Belugas of the St Lawrence in 1995*.
- Kingsley, M. C. S.** (1998). Population index estimates for the St. Lawrence belugas, 1973- 1995. *Marine Mammal Science*, 14(3), 508–529.
<https://doi.org/10.1111/j.1748-7692.1998.tb00739.x>
- Kingsley, M. C. S., & Reeves, R. R.** (1998). Aerial surveys of cetaceans in the Gulf of St. Lawrence in 1995 and 1996. *Canadian Journal of Zoology*, 76(8), 1529–1550.
- Kingsley, M.C.S., Hammill, M.O.** (1991). Photographic census surveys of the St Lawrence beluga population, 1988 and 1990. *Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci.* 1776: 19 p.
- Kipple, B., & Gabriele, C.** (2004). Underwater noise from skiffs to ships. *In Proc. of Glacier Bay Science Symposium* (pp. 172-175).
- Kipple, B., & Gabriele, C.** (2003). Underwater Noise from Skiffs to Ships. *Proceedings of the Fourth Glacier Bay Science Symposium*, 172–175.
- Kleinenberg, S. E., Yablokov, A. V., Bel'kovich, V. M., & Tarasevich, M. N.** (1964). Beluga investigation of the species. Nauka, Moscow [Translated from Russian. Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, No. 1923, 1969].
- Kloepper, L. N., Nachtigall, P. E., & Breese, M.** (2010). Change in echolocation signals with hearing loss in a false killer whale (*Pseudorca crassidens*). *The Journal of the Acoustical Society of America*, 128(4), 2233–2237.
<https://doi.org/10.1121/1.3478851>

- K**nudsen, V. O., Wilson, J. V., & Anderson, N. S. (1948). The attenuation of audible sound in fog and smoke. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 20(6), 849-857.
- K**rause, B. (2008). Anatomy of the Soundscape: Evolving Perspectives. *Journal of the AudioEngineering Society*, 56(1/2), 73–80.
- K**ruses, (1991). The interactions between killer whales and boats in Johnstone Strait, B.C. Pages 148-159 in K. Pryor and K. S. Norris, eds. *Dolphins societies: Discoveries and puzzles*. University of California Press, Berkeley, CA.
- L**agerquist, B. A., Stafford, K. M., & Mate, B. R. (2000). Dive characteristics of satellite-monitored blue whales (*Balaenoptera musculus*) off the Central California Coast. *Marine Mammal Science*, 16(2), 375–391. <https://doi.org/10.1111/j.1748-7692.2000.tb00931.x>
- L**auterborn, W., & Ohl, C. D. (1997). Cavitation bubble dynamics. *Ultrasonics sonochemistry*, 4(2), 65-75.
- L**auzier, L. M., & Trites, R. W. (1958). The Deep Waters in the Laurentian. *Journal of the Fisheries Board of Canada*, 15(6), 1247–1257.
- L**avoie, P. A., Bonn, F., Dubois, J., & El-Sabh, E. M. I. (1985). Structure thermique et variabilité du courant de surface de l'estuaire maritime du Saint-Laurent à l'aide d'images du satellite hcomm. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 11(1), 70–84. <https://doi.org/10.1080/07038992.1985.10855079>
- L**egendre, L., & Demers, S. (1984). Towards dynamic biological oceanography and limnology. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 41(1), 2–19. www.nrcresearchpress.com

- Lemon, D. D., Farmer, D. M., & Watts, D. R. (1984).** Acoustic measurements of wind speed and precipitation over a continental shelf. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 89(C3), 3462-3472.
- Lengagne, T., & Slater, P. J. (2002).** The effects of rain on acoustic communication: tawny owls have good reason for calling less in wet weather. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 269(1505), 2121-2125.
- Lesage, V. (2021).** The challenges of a small population exposed to multiple anthropogenic stressors and a changing climate: The St. Lawrence estuary beluga. In *Polar Research* (Vol. 40). Norwegian Polar Institute. <https://doi.org/10.33265/polar.v40.5523>
- Lesage, V., Barrette, C., Kingsley, M. C. S., & Sjøre, B. (1999).** The effect of vessel noise on the vocal behavior of belugas in the St. Lawrence River estuary, Canada. *Marine Mammal Science*, 15(1), 65–84. <https://doi.org/10.1111/j.1748-7692.1999.tb00782.x>
- Lesage, V., Gavrilchuk, K., Andrews, R. D., & Sears, R. (2017).** Foraging areas, migratory movements and winter destinations of blue whales from the western North Atlantic. *Endangered Species Research*, 34, 27–43. <https://doi.org/10.3354/esr00838>
- Lesage, V., Gosselin, J.-F., Hammill, M., Kingsley, M. C. S., & Lawson, J. (2007).** *Ecologically and Biologically Significant Areas (EBSAs) in the Estuary and Gulf of St. Lawrence – A marine mammal perspective*. <http://www.dfo-mpo.gc.ca/csas/>
- Lesage, V., McQuinn, I., Carrier, D., Gosselin, J.-F., Mosnier, A. (2014).** Exposure of the Beluga (*Delphinapterus leucas*) to Marine Traffic Under Various Scenarios of

Transit Route Diversion in the St. Lawrence Estuary (No. 2013/125), DFO Canadian Science Advisory Secretariat. Fisheries and Oceans Canada, Ottawa.

Litchfi, C., Ackman, R. G., Sipos, J. C., & Eaton, C. A. (1971). Isovaleroyl Triglycerides from the Blubber and Melon Oils of the Beluga Whale (*Delphinapterus leucas*). *Lipids*, 6(9), 674–681.

Loring, D. H., & Nota, D. J. G. (1973). *Morphology and sediments Gulf of St. Lawrence*.

Lusseau, D., Bain, D. E., Williams, R., & Smith, J. C. (2009). Vessel traffic disrupts the foraging behavior of southern resident killer whales *Orcinus orca*. *Endangered Species Research*, 6(3), 211–221. <https://doi.org/10.3354/esr00154>

Magnier, C., & Gervaise, C. (2020). Acoustic and photographic monitoring of coastal maritime traffic: Influence on the soundscape. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 147(6), 3749–3757. <https://doi.org/10.1121/10.0001321>

Marchand, C., Simard, Y., & Gratton, Y. (1999). Concentration of capelin (*Mallotus villosus*) in tidal upwelling fronts at the head of the Laurentian Channel in the St. Lawrence estuary. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 56(10), 1832–1848.

Martin, A. R., & Smith, T. G. (1992). Deep Diving in Wild, Free-Ranging Beluga Whales, *Delphinapterus leucas*. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 49(3), 462–466. www.nrcresearchpress.com

Martin Associates – Lancaster P. (2023). *Economic Impacts of Maritime Shipping in the Great Lakes-St. Lawrence Region*.

- M**ate, B. R., Lagerquist, B. A., & Calambokidis, J. (1999). Movements Of North Pacific Blue Whales During the Feeding Season Off Southern California and Their Southern Fall Migration. *Marine Mammal Science*, 15(4), 1246–1257.
- M**athias, D., Gervaise, C., & Di Iorio, L. (2016). Wind dependence of ambient noise in a biologically rich coastal area. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 139(2), 839–850. <https://doi.org/10.1121/1.4941917>
- M**Carthy, E. (2004). Scientific Aspects of Underwater Sound. International regulation of underwater sound: establishing rules and standards to address ocean noise pollution, 9-81.
- M**cQuinn, I. H., Lesage, V., Carrier, D., Larrivée, G., Samson, Y., Chartrand, S., ... & Theriault, J. (2011). A threatened beluga (*Delphinapterus leucas*) population in the traffic lane: Vessel-generated noise characteristics of the Saguenay-St. Lawrence Marine Park, Canada. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 130(6), 3661-3673.
- M**edwin, H., & Beaky, M. M. (1989). Bubble sources of the Knudsen Sea noise spectra. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 86(3), 1124-1130.
- M**énard, N., Conversano, M., & Samuel Turgeon. (2018). La protection des habitats de la population de bélugas (*Delphinapterus leucas*) du Saint-Laurent : bilan et considérations sur les besoins de conservation. *Le Naturaliste Canadien*, 142(2), 80–105.
- M**énard, N., Michaud, R., Chion, C., & Turgeon, S. (2014). *Documentation of Maritime Traffic and Navigational Interactions with St. Lawrence Estuary Beluga (*Delphinapterus leucas*) in Calving Areas Between 2003 and 2012*. <http://www.dfo-mpo.gc.ca/csas-sccs/>

- M**énard, N., M. Pagé, V. Busque, I. Croteau, R. Picard, et D. Gobeil. 2007. Rapport sur l'état du parc marin du Saguenay-Saint-Laurent 2007. 65 p. + annexes.
- M**erchant, N. D., Fristrup, K. M., Johnson, M. P., Tyack, P. L., Witt, M. J., Blondel, P., & Parks, S. E. (2015). Measuring acoustic habitats. *Methods in Ecology and Evolution*, 6(3), 257–265. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12330>
- M**eyer-Gutbrod, E. L., Greene, C. H., & Davies, K. T. A. (2018). *Marine Species Range Shifts Necessitate Advanced Policy Planning: The Case Of The North Atlantic Right Whale*. 31(2), 19–23. <https://doi.org/10.2307/26542646>
- M**ichaud, R. (1993). Distribution estivale du béluga du Saint-Laurent : synthèse 1986 à 1992. Ministère des pêches et des océans, Direction de la gestion des pêches et de l'habitat, Division de la gestion de l'habitat du poisson.
- M**ichaud, R., Chadenet, V. (1990). Survol aérien pour l'estimation de la distribution printanière et des déplacements des bélugas du Saint-Laurent. Préparé par l'Institut National d'Écotoxicologie du Saint-Laurent, pour Pêches et Océans Canada. 36p. Available at: Maurice Lamontagne Institute, P.O. Box 1000, 850 Route de la mer, Mont-Joli, QC, CAN, G5H 3Z4
- M**ickle, M. F., & Higgs, D. M. (2018). Integrating techniques: A review of the effects of anthropogenic noise on freshwater fish. In *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* (Vol. 75, Issue 9, pp. 1534–1541). Canadian Science Publishing. <https://doi.org/10.1139/cjfas-2017-0245>
- M**izroch, S. A., Rice, D. W., & Breiwick, J. M. (1984). The Blue Whale, *Balaenoptera musculus*. *Marine Fisheries Review*, 46(4), 15.

Mooers, A. O., Doak, D. F., Scott Findlay, C., Green, D. M., Grouios, C., Manne, L. L., Rashvand, A., Rudd, M. A., & Whitton, J. (2010). Science, Policy, and Species at Risk in Canada. *BioScience*, 60(10), 843–849. <https://doi.org/10.1525/bio.2010.60.10.11>

Mosnier, A., Gosselin, J.-F., & Lesage, V. (2022). *Distribution saisonnière et concentration de quatre espèces de baleine à fanons dans l'estuaire du Saint-Laurent, basé sur 22 ans de données d'observations de Pêches et Océans Canada.*

Mullet, T. C., Gage, S. H., Morton, J. M., & Huettmann, F. (2016). Temporal and spatial variation of a winter soundscape in south-central Alaska. *Landscape Ecology*, 31, 1117-1137.

National Marine Fisheries Service (NMFS). (2018). *Technical Guidance for Assessing the Effects of Anthropogenic Sound on Marine Mammal Hearing (Version 2.0): Underwater Thresholds for Onset of Permanent and Temporary Threshold Shifts.* U.S. Dept. of Commer., NOAA. NOAA Technical Memorandum NMFS-OPR-59, 167 p.

National Marine Fisheries Service (NMFS), National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), & Department of Commerce. (2013). Endangered Fish and Wildlife; Final Rule to Remove the Sunset Provision of the Final Rule Implementing Vessel Speed Restrictions To Reduce the Threat of Ship Collisions With North Atlantic Right Whales. In *National Oceanic and Atmospheric Administration - Rules and Regulations* (Vol. 78, Issue 236). <http://www.nmfs.noaa.gov/pr/>

National Research Council (NRC). (2003). Ocean Noise and Marine Mammals. In *Ocean Noise and Marine Mammals.* National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/10564>

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2013). Endangered fish and wildlife; final rule to remove the sunset provision of the final rule implementing vessel speed restrictions to reduce the threat of ship collisions with North Atlantic Right Whales. *Federal Register*, 78(236), 73726-73736.

Nedelec, S. (2015). *Impacts of anthropogenic noise on behaviour, development and fitness of fishes and invertebrates* [University of Bristol, Bristol]. <https://theses.hal.science/tel-02099631>

Nemoto, T., 1959. Food of baleen whales with reference to whale movement. *Sci. Rep. Whales Res. Inst.*, (14), 149-290.

Noad, M. J., Cato, D. H., Bryden, M. M., Jenner, M. N., & Jenner, K. C. S. (2000). Cultural revolution in whale songs. *Nature*, 408(6812), 537–537.

Nystuen, J. A., & Ma, B. (2002). Using ambient sound to passively monitor sea surface processes. In *Proceedings of the Sixth Pan Ocean Remote Sensing Conference (PORSEC)* (pp. 9-14). New York, NY: PORSEC Association.

Nystuen, J. A., McGlothlin, C. C., & Cook, M. S. (1993). The underwater sound generated by heavy rainfall. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 93(6), 3169-3177.

O’Corry-Crowe, G. (2009). Beluga Whale: *Delphinapterus leucas*. In *Encyclopedia of Marine Mammals* (pp. 108–112). University of Chicago Press.

Pack, A. A., Herman, L. M., Deakos, M. H., Hakala, S., Craig, A. S., Olson, J. R., Spitz, S.S., Herman, E., Goetschius, K., and Lammers, M. O. (2005). “First report of sounds recorded from individual humpback whale calves on the Hawaiian wintering grounds,” paper presented at the 16th Biennial Conf. Biology of Marine Mammals, San Diego, CA.

Palsbøll, P. J., Allen, J., Bérubé, M., Clapham, P. J., Feddersen, T. P., Hammond, P. S., Hudson, R. R., Jørgensen, H., Katona, S., Larsen, A. H., Larsen, F., Lien, J., Mattila, D.K., Sigurjónsson, J., Sears, R., Smith, T., Sponer, R., Stevick, P., & Øien, N. (1996). Genetic tagging of humpback whales. *Nature*, 388(6644), 767–769.

Payne, R. S., & McVay, S. (1971). Songs of Humpback Whales emit sounds in long, predictable patte ranging over frequencies audible to huma. *Science*, 173, 585–597.

Pêches et Océans Canada (MPO). (2022). Données de surface en temps réel provenant des bouées VIKING dans le cadre du Programme de monitoring de la zone Atlantique (PMZA) [Data set]. (NaN). <https://doi.org/10.26071/ogsl-06f7045a-51a5>

Pêches et Océans Canada (MPO). (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 + XI p.

Pêches et Océans Canada (MPO). (2009). Programme de rétablissement du rorqual bleu (*Balaenoptera musculus*), population de l'Atlantique Nord-Ouest au Canada [PROPOSITION], Série de Programmes de rétablissement de la Loi sur les espèces en péril, Pêches et Océans Canada, Québec, vi + 64 p.

Pêches et Océans Canada (MPO). (2005b). Évaluation du potentiel de rétablissement des populations de bélugas de la baie de Cumberland, de la baie d'Ungava, de l'est de la baie d'Hudson et du Saint-Laurent (*Delphinapterus leucas*). Secrétariat canadien de consultation scientifique. Avis scientifique 2005/036. 15p

- P**êches et Océans Canada (MPO). (2004). Identification des zones d'importance écologique et biologique. Secr. Can. de consult. sci. du MPO, Rapport sur l'état des écosystèmes 2004/006.
- P**ijanowski, B. C., Villanueva-Rivera, L. J., Dumyahn, S. L., Farina, A., Krause, B. L., Napoletano, B. M., ... & Pieretti, N. (2011). Soundscape ecology: the science of sound in the landscape. *BioScience*, 61(3), 203-216.
- P**inet, N., Brake, V., Campbell, C., & Duchesne, M. (2011). Seafloor and Shallow Subsurface of the St. Lawrence River Estuary. *Geoscience Canada*, 38(1), 31–40.
- P**ippard, L. (1990). Ailing whales, water and marine management systems. An urgency for fresh, new approaches. Dans: prescott, J. et M. Gauquelin (édit.). Pour l'avenir du béluga : compte rendu du Forum international pour l'avenir du béluga. Presses de l'Université du Québec, Sillery, Québec, p. 3-17.
- P**ippard, L. (1985a). Status of the St. Lawrence River population of Beluga, *Delphinapterus leucas*. *Canadian field-naturalist*. Ottawa ON, 99(3), 438-450.
- P**ippard, L., & Malcolm, H. (1978). White whales (*Delphinapterus leucas*). Observations on their distribution, population and critical habitats in the St. Lawrence and Saguenay Rivers. *Department of Indian and Northern Affairs, Parks Canada*.
- P**lourde, Lehoux, McQuinn, Ih, & Lesage. (2017). *Describing krill distribution in the western North Atlantic using statistical habitat models*. <https://www.researchgate.net/publication/313296977>
- P**olicy Headquarters (2020). Department of Transportation. Hand, 20590, 0001.

- P**opper, A. N., & Hastings, M. C. (2009). The effects of anthropogenic sources of sound on fishes. In *Journal of Fish Biology* (Vol. 75, Issue 3, pp. 455–489). <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2009.02319.x>
- P**oulter, T. C. (1968) Marine mammals. In: Animal communication, techniques of study and results of research, T. A. SEBEOK, editor, Indiana Univ. Press, 405--465.
- P**rince, M. (1905). Some of the present problems of abnormal psychology. *Psychological Review*, 12(2-3), 118.
- P**rosperetti, A., & Oguz, H. N. (1993). The impact of drops on liquid surfaces and the underwater noise of rain. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 25(1), 577-602.
- P**utland, R. L., Merchant, N. D., Farcas, A., & Radford, C. A. (2018). Vessel noise cuts down communication space for vocalizing fish and marine mammals. *Global Change Biology*, 24(4), 1708–1721. <https://doi.org/10.1111/gcb.13996>
- R**amp, C., Delarue, J., Bérubé, M., Hammond, P. S., & Sears, R. (2014). Fin whale survival and abundance in the gulf of St. Lawrence, Canada. *Endangered Species Research*, 23(2), 125–132. <https://doi.org/10.3354/esr00571>
- R**asmussen, M. H., Koblitz, J. C., & Laidre, K. L. (2015). Buzzes and high-frequency clicks recorded from narwhals (*Monodon monoceros*) at their wintering ground. *Aquatic Mammals*, 41(3), 256–264. <https://doi.org/10.1578/AM.41.3.2015.256>
- R**eeves, R. R., Smith, T. D., Josephson, E. A., Clapham, P. J., & Woolmer, G. (2004). Historical observations of humpback and blue whales in the North Atlantic Ocean: Clues to migratory routes and possibly additional feeding grounds. *Marine Mammal Science*, 20(4), 774–786. <https://doi.org/10.1111/j.1748-7692.2004.tb01192.x>

Reeves, R. R., & Mitchell, E. (1984). Catch history and initial population of white whales (*Delphinapterus leucas*) in the river and Gulf of St. Lawrence, eastern Canada. *Naturaliste canadien*, 111(1), 63-121.

Réjean Dufour, Hugues Benoît, Martin Castonguay, Joël Chasse, Laure Devine, Peter Galbraith, Michel Harvey, Pierre Larouche, Sylvie Lessard, Brian Petrie, Louise Savard, Claude Savenkoff, Liliane St-Amand, & Michel Starr. (2010). *Rapport sur l'état et les tendances des écosystèmes : écozone de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent*. <http://www.dfo-mpo.gc.ca/csas/>

Richardson, W. J., Greene Jr, C. R., Malme, C. I., & Thomson, D. H. (2013). Marine mammals and noise. *Academic press*.

Richardson, W. J., & Würsig, B. (1997). Influences of man-made noise and other human actions on cetacean behaviour. *Marine and Freshwater Behaviour and Physiology*, 29(1-4), 183-209. <https://doi.org/10.1080/10236249709379006>

Ridgway, S. H., Carder, D. A., Kamolnick, T., Smith, R. R., Schlundt, C. E., & Elsberry, W. R. (2001). Hearing and whistling in the deep sea: depth influences whistle spectra but does not attenuate hearing by white whales (*Delphinapterus leucas*) (Odontoceti, Cetacea). *Journal of Experimental Biology*, 204(22), 3829-3841.

Riser, S. C., Nystuen, J., & Rogers, A. (2008). Monsoon effects in the Bay of Bengal inferred from profiling float-based measurements of wind speed and rainfall. *Limnology and Oceanography*, 53(5 PART 2), 2080-2093. https://doi.org/10.4319/lo.2008.53.5_part_2.2080

Rivers, J. A. (1997). Blue whale, *Balaenoptera musculus*, vocalizations from the waters off central California. *Marine Mammal Science*, 13(2), 186-195.

Rolland, R. M., Parks, S. E., Hunt, K. E., Castellote, M., Corkeron, P. J., Nowacek, D. P., Wasser, S. K., & Kraus, S. D. (2012). Evidence that ship noise increases stress in rightwhales. *Proceedings: Biological Sciences*, 279(1737), 2363–2368.

Ross, D., & Kuperman, W. A. (1976). *Mechanics of underwater noise*.

Saint-Cyr, D. N. (1886). Réponse à une adresse de l'Assemblée législative en date du 19 avril 1886, demandant copie du rapport d'un voyage fait au Labrador canadien, en vertu d'un ordre en conseil, par M. Saint-Cyr, ancien député, conservateur du musée de l'Instruction publique aussi copie de son catalogue des plantes et des oiseaux de la Côte Nord et des îles faisant partie du Labrador canadien, exposés au musée de l'Instruction publique. sn.

Saucier, F. J., & Chassé, J. (2000). Tidal circulation and buoyancy effects in the St. Lawrence Estuary. *Atmosphere - Ocean*, 38(4), 505–556.
<https://doi.org/10.1080/07055900.2000.9649658>

Saucier, F. J., Roy, F., Senneville, S., Smith, G., Lefavre, D., Zakardjian, B., & Dumais, J.-F. (2009). Modelling of the circulation in the Estuary and Gulf of St. Lawrence in response to variations in freshwater runoff and winds. *Revue Des Sciences de l'Eau*, 22(2), 159–176.

Schafer, R. M. (1969). *The new soundscape*. Don Mills: BMI Canada Limited.

Schlundt, C. E., Finneran, J. J., Carder, D. A., & Ridgway, S. H. (2000). Temporary shift in masked hearing thresholds of bottlenose dolphins, *Tursiops truncatus*, and white whales, *Delphinapterus leucas*, after exposure to intense tones. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 107(6), 3496-3508.

- Shajahan, N., Barclay, D. R., & Lin, Y. T. (2022). Mapping of surface-generated noise coherence. *Frontiers in Marine Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.1016702>
- Seaman, G. A., Lowry, L. F., & Frost, K. J. (1982). Foods of belukha whales (*Delphinapterus leucas*) in western Alaska. *Biological Systems*.
- Sears, R. (2002). Blue Whale. In: Perrin, WF, Wursig, B. & Thewissen, JGM. *Encyclopedia of Marine Mammals*, 112-116.
- Sears, R., & Calambokidis, J. (2002). COSEWIC Assessment and Update Status Report on the Blue Whale, *Balaenoptera musculus*, Atlantic Population, Pacific Population, in Canada. *Committee on the Status of Endangered Wildlife in Canada*.
- Sears, R., Wenzel, F.W. & Williamson, J.M. (1987). The Blue Whale: A catalogue of individuals from the western North Atlantic (Gulf of St. Lawrence). Mingan Island Cetacean Study (MICS Inc.), St. Lambert, Qc. 27pp.
- Sears, R., & Williamson, J. M. (1982). A preliminary aerial survey of marine mammals for the Gulf of St. Lawrence to determine their distribution and relative abundance. Mingan Island Cetacean Survey-Station de Recherches des Iles Mingan (MICS), Falmouth, Mass., and Sept-Iles, Que.
- Sergeant, D. E., & Hoek, W. (1988). An update of the status of white whales *Delphinapterus leucas* in the Saint Lawrence Estuary, Canada. *Biological Conservation*, 45(4), 287- 302.

- Sergeant, D. E., & Brodie, P. F. (1975). Identity, abundance, and present status of populations of white whales, *Delphinapterus leucas*, in North America. *Journal of the Fisheries Board of Canada*, 32(7), 1047-1054.
- Sergeant, D.E., 1966. Populations of large whale species in the western North Atlantic with special reference to the fin whale. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, Arctic Biological Station, circular No. 9.
- Silber, G. K. (1986). The relationship of social vocalizations to surface behavior and aggression in the Hawaiian humpback whale (*Megaptera novaeangliae*). *Canadian Journal of Zoology*, 64(10), 2075–2080. www.nrcresearchpress.com
- Simard, Y. (2009). The Saguenay-St. Lawrence Marine Park: Oceanographic processes at the basis of this unique forage site of northwest Atlantic whales. *Revue Des Sciences de l'Eau*, 22(2), 177–197. <https://doi.org/10.7202/037481ar>
- Simard, Y., Lepage, R., & Gervaise, C. (2010). Anthropogenic sound exposure of marine mammals from seaways: Estimates for Lower St. Lawrence Seaway, eastern Canada. *Applied Acoustics*, 71(11), 1093–1098. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2010.05.012>
- Simard, Y., Roy, N., Gervaise, C., & Giard, S. (2016). 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. <https://doi.org/10.1121/1.4962557>
- Simons, R., Monismith, S., Saucier, F., Johnson, L., & Winkler, G. (2010). Modelling stratification and baroclinic flow in the estuarine transition zone of the St. Lawrence Estuary. *Atmosphere - Ocean*, 48(2), 132–146. <https://doi.org/10.3137/OC316.2010>

- Smith, G. J. D., & Gaskin, D. E. (1983).** An environmental index for habitat utilization by female harbour porpoises with calves near deer island, bay of fundy. *Ophelia*, 22(1), 1–13. <https://doi.org/10.1080/00785326.1983.10427221>
- Smith, J. N., Goldizen, A. W., Dunlop, R. A., & Noad, M. J. (2008).** Songs of male humpback whales, *Megaptera novaeangliae*, are involved in intersexual interactions. *Animal Behaviour*, 76(2), 467–477. <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2008.02.013>
- Southall BL, Bowles AE, Ellison WT, Finneran JJ and others (2007)** Marine mammal noise exposure criteria: initial scientific recommendations. *Aquatic Mammals*, 33:411–522
- Southall, B. L., Bowles, A. E., Ellison, W. T., Finneran, J. J., Gentry, R. L., Greene, C. R., Kastak, D., Ketten, D. R., Miller, J. H., Nachtigall, P. E., Richardson, W. J., Thomas, J.A., & Tyack, P. L. (2008).** Marine mammal noise-exposure criteria: Initial scientific recommendations. *Bioacoustics*, 17(1–3), 273–275. <https://doi.org/10.1080/09524622.2008.9753846>
- Southall, E. B. L., Finneran, J. J., Reichmuth, C., Nachtigall, P. E., Ketten, D. R., Bowles, A. E., Ellison, W. T., Nowacek, D. P., & Tyack, P. L. (2019).** Marine mammal noise exposure criteria: Updated scientific recommendations for residual hearing effects. *Aquatic Mammals*, 45(2), 125–232. <https://doi.org/10.1578/AM.45.2.2019.125>
- St-Onge, G., Stoner, J. S., & Hillaire-Marcel, C. (2003).** Holocene paleomagnetic records from the St. Lawrence Estuary, eastern Canada: Centennial- to millennial-scale geomagnetic modulation of cosmogenic isotopes. *Earth and Planetary Science Letters*, 209(1–2), 113–130. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(03\)00079-7](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00079-7)

Syvitski, J. P. M., & Praeg, D. B. (1989). Quaternary Sedimentation in the St. Lawrence Estuary and Adjoining Areas, Eastern Canada: An Overview Based on High-Resolution Seismo-Stratigraphy. *Géographie Physique et Quaternaire*, 43(3), 291–310. <https://doi.org/10.7202/032784ar>

Syvitski, J. P. M., & Praeg, D. B. (2007). Quaternary Sedimentation in the St. Lawrence Estuary and Adjoining Areas, Eastern Canada: An Overview Based on High-Resolution Seismo-Stratigraphy. *Géographie Physique et Quaternaire*, 43(3), 291–310. <https://doi.org/10.7202/032784ar>

Therriault, J. C. , & Lacroix, G. (1976). Nutrients, Chlorophyll, and Internal tides in the St. Lawrence Estuary. *Journal of the Fisheries Board of Canada*, 33(12), 2747–2757.

The St. Lawrence Seaway Management Corporation (STSMC) (2023). The Seaway: A Critical Link in the Supply Chain, Annual Corporate Summary 2022/2023.

Thompson, P. O., Findley, L. T., Vidal, O., & Cummings, W. C. (1996). Underwater sound of blue whales, *Balaenoptera musculus*, in the Gulf of California, Mexico. *Marine Mammal Science*, 12(1), 288–293.

Thompson, P. O., Cummings, W. C., & Kennison, S. J. (1977). Sound production of humpback whales, *Megaptera novaeangliae*, in Alaskan waters. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 62(S1), S89-S89.

Tishechkin, D. Y. (2013). Vibrational background noise in herbaceous plants and its impact on acoustic communication of small Auchenorrhyncha and Psyllinea (Homoptera). *Entomological review*, 93, 548-558.

Tougaard, J. (2021). *Thresholds for behavioural responses to noise in marine mammals (Background note to revision of guidelines from the Danish Energy Agency)*.

- T**ransport Canada. (2020). *Canada's Oceans Protection Plan*.
- T**url, C. W., Penner, R. H., & Au, W. W. L. (1987). Comparison of target detection capabilities of the beluga and bottlenose dolphin. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 82(5), 1487–1491. <http://acousticalsociety.org/content/terms>.
- T**yack, P. L. (2008). Implications for marine mammals of large-scale changes in the marine acoustic environment. *Journal of Mammalogy*, 89, 549–558. <https://academic.oup.com/jmammal/article/89/3/549/860105>
- V**agle, S., W. G. Large, & D. M. Farmer. (1990). An Evaluation of the WOTAN Technique of Inferring Oceanic Winds from Underwater Ambient Sound. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*.
- V**akkayilt, R., Grabert, H. C., & Large, W. G. (1996). Oceanic Winds Estimated from Underwater Ambient Noise Observations in SWADE. *Oceans '96 MTS/IEEE Conference Proceedings; The Coastal Ocean—Prospects for the 21st Century*, 45–51.
- V**ergara, V., & Barrett-Lennard, L. G. (2008). Vocal development in a Beluga calf (*Delphinapterus leucas*). *Aquatic Mammals*, 34(1), 123–143. <https://doi.org/10.1578/AM.34.1.2008.123>
- V**ergara, V., Wood, J., Lesage, V., Ames, A., Mikus, M. A., & Michaud, R. (2021). Can you hear me? Impacts of underwater noise on communication space of adult, sub-adult and calf contact calls of endangered St. Lawrence belugas (*Delphinapterus leucas*). *Polar Research*, 40. <https://doi.org/10.33265/polar.v40.5521>
- V**ladykov, V. D. (1944). Chasse, biologie et valeur économique du Marsouin Blanc ou Béluga (*Delphinapterus leucas*) du fleuve et du golfe Saint-Laurent. (No Title).

- Watkins, W. A.** (1986). Whale reactions to human activities in Cape Cod waters. *Marine mammal science*, 2(4), 251-262.
- Weilgart, L.** (2018). *The Impact of Ocean Noise Pollution on Fish and Invertebrates*.
- Wenz G.W.** (1962). *Acoustic Ambient Noise in the Ocean: Spectra and Sources*.
<http://asadl.org/terms>
- Weston, D. E., & Black, R. I.** (1965). Some unusual low-frequency biological noises underwater. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 12(3), 295–298.
- William Ford Dolphin.** (1987). Dive behavior and estimated energy expenditure of foraging humpback whales in southeast Alaska. *Canadian Journal of Zoology*, 65(2), 354–362.
- Winn, H. E., & Winn, L. K.** (1978). The Song of the Humpback Whale *Megaptera novaeangliae* in the West Indies. *Marine Biology*, 47, 97–111.
- Winn, H. E., Thompson, T. J., Cummings, W. C., Hain, J., Hudnall, J., Hays, H., & Steiner, W. W.** (1981). Song of the humpback whale population comparisons. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 8, 41–46.
- Womersley, F. C., Humphries, N. E., Queiroz, N., Vedor, M., da Costa, I., Furtado, M., Tyminski, J. P., Abrantes, K., Araujo, G., Bach, S. S., Barnett, A., Berumen, M. L., Lion, S. B., Braun, C. D., Clingham, E., Cochran, J. E. M., de la Parra, R., Diamant, S., Dove, A. D. M., ... Sims, D. W.** (2022). Global collision-risk hotspots of marine traffic and the world's largest fish, the whale shark. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(20), e2117440119.
<https://doi.org/10.1073/pnas.2117440119>

- Yochem**, P. K. & Leatherwood, S. (1985). Blue whale *Balaenoptera musculus* (Linnaeus 1758). In Handbook of marine mammals. 3. *The sirenians and baleen whales* (ed. S. H. Ridgway & R. Harrison), 193–240. London: Academic Press.
- Zahn**, M. J., Rankin, S., McCullough, J. L. K., Koblitz, J. C., Archer, F., Rasmussen, M. H., & Laidre, K. L. (2021). Acoustic differentiation and classification of wild belugas and narwhals using echolocation clicks. *Scientific Reports*, *11*(1), 22141. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01441-w>
- Zedel**, L., Gordon, L., & Osterhus, S. (1999). Ocean ambient sound instrument system: Acoustic estimation of wind speed and direction from a subsurface package. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, *16*(8), 1118-1126.
- Zelick**, R., Mann, D. A., & Popper, A. N. (1999). Acoustic communication in fishes and frogs. *Comp. Hear. Fish Amphib. Springer Handb. Audit. Res.*, *11*, 363–411.
- Zollinger**, S. A., & Brumm, H. (2015). Why birds sing loud songs and why they sometimes don't. *Animal Behaviour*, *105*, 289-295.