ANALYSE DU BRUIT RAYONNÉ DES NAVIRES EN FONCTION DE LEURS CARACTÉRISTIQUES ET DES CONDITIONS D'OPÉRATION

Modèle paramétrique adapté à la flotte du Saint-Laurent

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en océanographie

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

PAR

© FANIRY RABETOANDRO

Août 2026

Composition du jury :

Loubna Benabbou, président du jury, Université du Québec à Rimouski, Canada

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

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

Benjamin de Mongolfier, examinateur externe, Bio Laurentia, Canada

Dépôt final le 02 août 2026

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.

À mes parents Fidy et Émilie, et à ma sœur Ando.

«Fa ny fahasoavan'Andriamanitra no nahatoy izao ahy »

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de recherche, Pierre Cauchy, pour sa disponibilité, son soutien et son accompagnement tout au long de ma maîtrise. Je lui suis sincèrement reconnaissante pour sa patience, ses commentaires pertinents, ses précieux conseils, ainsi que pour la confiance qu'il m'a accordée. Je souhaite également remercier mon co-directeur de recherche, Guillaume St-Onge, pour son accueil au sein de l'équipe MARS, sa réactivité et son appui dans la réalisation de ce travail. Je vous remercie tous les deux pour les nombreuses opportunités que vous m'avez offertes au cours de ce parcours.

Je tiens aussi à remercier Pierre Mercure-Boissonnault, agent de recherche de l'ISMER, travaillant sur le projet MARS, pour son aide précieuse notamment dans le débogage de mon code, sa grande réactivité face à mes questions techniques, la pertinence de ses commentaires et sa bienveillance.

J'aimerais également remercier l'ensemble des équipes et des centres de recherche impliqués dans le projet MARS, notamment Innovation Maritime (IMAR), OpDAQ et Multi-Électronique (MTE), ainsi que les différents partenaires financiers et les armateurs, pour leur contribution à la réalisation de ce projet. Je remercie aussi l'équipage présente lors des expéditions à bord du *Coriolis II* dans l'estuaire du Saint-Laurent.

Mes remerciements vont également au corps professoral de l'ISMER pour la qualité de la formation dispensée et pour la passion transmise tout au long de ce parcours. J'adresse aussi mes sincères remerciements au personnel administratif de l'ISMER et de l'UQAR, dont le travail et l'accompagnement contribuent grandement à la réussite des étudiant·e·s.

Je souhaite tout particulièrement remercier mes colocataires et fidèles amies de Rimouski Annabelle, Cécile, Jessie, Élisa, Maëla. Merci pour votre soutien, vos encouragements, votre compréhension et, surtout, votre amitié. Je remercie aussi toutes les

personnes qui sont devenues des ami·e·s et qui ont apporté à mon quotidien des rires, du partage et de beaux souvenirs, en particulier Abigaëlle et Jonathan. Mon expérience rimouskoise n'aurait pas été la même sans vous.

Enfin, je remercie mon chéri, Landry, pour son soutien indéfectible et ses encouragements constants tout au long de ce parcours. Je remercie profondément ma famille, qui m'a soutenue de loin dans ce projet. Un immense merci à ma sœur, et surtout à mes parents, pour leur amour, leur confiance et tous les efforts qu'ils ont faits pour moi. C'est grâce à vous que j'ai grandi avec curiosité et avec une véritable passion pour les études. Merci aussi pour vos prières, qui m'ont portée et fortifiée chaque jour.

AVANT-PROPOS

Ce projet de maîtrise s'inscrit dans l'optique de la compréhension et de la mesure du bruit sous-marin rayonné par les navires, ainsi que de la recherche de méthodes visant à réduire ce bruit, porté par le projet MARS (Marine Acoustic Research Station, https://www.projet-mars.ca/). Il a été réalisé sous la direction de Pierre Cauchy et de Guillaume St-Onge de l'ISMER-UQAR.

Dans un contexte où le transport maritime joue un rôle essentiel dans les échanges commerciaux, les impacts environnementaux qui lui sont associés suscitent un intérêt croissant. Parmi ces impacts, le bruit sous-marin rayonné par les navires constitue aujourd'hui une préoccupation importante, en raison de ses effets potentiels sur les écosystèmes marins et sur les espèces sensibles au milieu acoustique. L'étude de cette problématique apparaît donc nécessaire afin de mieux comprendre les mécanismes de génération du bruit et de contribuer à l'élaboration de stratégies d'atténuation adaptées.

Le présent manuscrit se divise en trois parties. La première correspond à une introduction générale rédigée en français, dans laquelle sont exposés le contexte de l'étude, la problématique, les objectifs de recherche et l'approche méthodologique retenue. La deuxième partie consiste en un chapitre principal rédigé en anglais sous la forme d'un article scientifique, intitulé : « Underwater radiated noise explained from ship characteristics and operating conditions - model obtained from the MARS database ». Enfin, la troisième partie présente une conclusion générale en français, qui synthétise les principaux résultats obtenus et ouvre sur les perspectives de recherche.

Les principaux résultats de ce travail ont été diffusés au cours des dernières années sous forme de présentations orales et d'affiches lors de congrès nationaux et internationaux, comme indiqué ci-dessous :

Publications – articles de conférence (1) :

F. Rabetoandro, P. Cauchy, P. Mercure-Boissonnault, G. St-Onge et S. Lafrance, (2024). Underwater radiated noise explained from ship characteristics and operating conditions – Model obtained from the MARS database INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, 270(3), 8138-8144. https://doi.org/10.3397/IN_2024_4076

Présentations orales (1) :

F. Rabetoandro, P. Cauchy, P. Mercure-Boissonnault, G. St-Onge et S. Lafrance, Decoding Underwater Radiated Noise: A Predictive Model using the MARS Database Internoise, Nantes, France, 25 - 29 août 2024.

Présentations par affiches (3) :

F. Rabetoandro, P. Cauchy, P. Mercure-Boissonnault, G. St-Onge et S. Lafrance, Using MARS project data to analyze the effect of ship characteristics and operating conditions on underwater radiated noise, Ocean Sciences Meeting 2024, Nouvelle Orléans, LA, Etats-Unis, 18 – 23 février 2024. (présentée par P. Cauchy)

F. Rabetoandro, P. Cauchy, P. Mercure-Boissonnault, G. St-Onge et S. Lafrance, Variabilité du bruit rayonnée en fonction des caractéristiques et conditions d'opération des navires, Réunion scientifique annuelle - Québec-Océan, Rivière-du-Loup, QC, Canada, 5 - 7 février 2024.

F. Rabetoandro, P. Cauchy, P. Mercure-Boissonnault, G. St-Onge et S. Lafrance, Analyse de la variabilité du bruit rayonné en fonction des caractéristiques et conditions d'opération des navires, Réunion scientifique annuelle - Québec Océan, Rivière-du-Loup, QC, Canada, 6 - 7 février 2023.

RÉSUMÉ

Le bruit sous-marin rayonné par les navires commerciaux transitant dans le chenal du Saint-Laurent a été étudié à l'aide de la base de données du projet MARS (Marine Acoustic Research Station), qui intègre les mesures du niveau de source monopôle (MSL) avec les paramètres de conception et d'exploitation des navires. L'étude s'est concentrée sur le bruit sous-marin à basse fréquence, qui contribue de manière importante au bruit anthropique dans les environnements marins. L'analyse s'est appuyée sur 398 signatures acoustiques de haute qualité recueillies entre 2021 et 2023 lors du passage de navires partenaires dans le cadre d'un protocole de navigation optimisé.

Une approche de régression fonctionnelle a été développée pour prédire les niveaux sonores des navires dans la bande de fréquences 10-500 Hz en utilisant la longueur totale du navire, sa vitesse, son tirant d'eau réel et son âge comme variables explicatives. Les performances du modèle ont été évaluées à l'aide du coefficient de détermination (R^2) et de l'erreur quadratique moyenne (RMSE). Les résultats ont montré que le modèle explique entre 30% et 80% de la variabilité observée en fonction de la fréquence. Parmi les variables explicatives, la vitesse dans l'eau a été identifiée comme le facteur dominant influençant le bruit sous-marin rayonné, en particulier aux basses fréquences. La longueur, le tirant d'eau et l'âge du navire ont également contribué à la variabilité du bruit, mais leurs effets dépendent davantage de la fréquence.

Mots clés : Bruit sous-marin rayonné, trafic maritime, Saint-Laurent, modèle de prédiction, régression fonctionnelle, caractéristiques des navires, conditions d’opération.

ABSTRACT

Underwater radiated noise from commercial ships transiting in the St. Lawrence channel was investigated using the MARS (Marine Acoustic Research Station) Project database, which integrates Monopole Source Level (MSL) measurements with ship design and operational parameters. The study focused on low-frequency underwater noise, a major contributor to anthropogenic sound in marine environments. The analysis relied on 398 high-quality acoustic signatures collected between 2021 and 2023 during partner-vessel transits conducted under an optimized navigation protocol.

A functional regression approach was developed to predict ship source levels over the 10-500 Hz frequency band using vessel length overall, speed through water, actual draft, and vessel age as explanatory variables. Model performance was evaluated using the coefficient of determination (R^2) and the root mean square error (RMSE). Results showed that the model explains between 30% and 80% of the observed variability depending on frequency. Among the explanatory variables, speed through water was identified as the dominant factor influencing underwater radiated noise, especially at low frequencies. Vessel length, draft, and age also contributed to noise variability, but their effects were more frequency dependent.

Keywords: Underwater radiated noise, marine traffic, St. Lawrence, prediction model, functional regression, ship characteristics, operational conditions.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS ix

AVANT-PROPOS xii

RÉSUMÉ xv

ABSTRACT xvii

TABLE DES MATIÈRES xix

LISTE DES TABLEAUX xxi

LISTE DES FIGURES xxiii

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES xxv

LISTE DES SYMBOLES xxix

INTRODUCTION GÉNÉRALE 1

1.1 LE COMMERCE MARITIME 2

1.1.1 LA CROISSANCE DU COMMERCE MARITIME ET LA DYNAMIQUE DE LA FLOTTE MONDIALE 2

1.1.2 LE RÉSEAU MARITIME DU SAINT LAURENT 5

1.2 LES CONTRIBUTIONS DU TRAFIC MARITIME AU BRUIT AMBIANT 8

1.2.1 GÉNÉRALITÉS 9

1.2.2 LE BRUIT DES NAVIRES 10

1.2.3 LES SONARS 11

1.2.4 LES IMPACTS DE LA POLLUTION SONORE SUR LA FAUNE MARINE 13

1.3 LES ENJEUX DE LA GESTION DURABLE DU COMMERCE MARITIME 17

1.3.1 LES RÈGLEMENTATIONS DU BRUIT SOUS MARIN 18

1.3.2 VERS UNE MEILLEURE COMPRÉHENSION : TRAVAUX SCIENTIFIQUES ET BESOINS DE RECHERCHE 19

1.4 OBJECTIFS DE L'ÉTUDE ET MÉTHODOLOGIE 20

CHAPITRE 1 ANALYSE DU BRUIT RAYONNÉ DES NAVIRES EN FONCTION DE LEURS CARACTÉRISTIQUES ET DES CONDITIONS D'OPÉRATION 22

1.1 RESUME 22

1.2 CONTEXT 23

1.2.1 Research objectives 24
1.2.2 Underwater Radiated Noise Modelling: Overview of research and approaches 24

1.3 MATERIALS AND METHODS 36

1.3.1 Data collection 36
1.3.2 Dataset overview 42
1.3.3 Functional regression model 45
1.3.4 Model evaluation metrics 47

1.4 RESULTS 48

1.4.1 Model performance across frequencies 48
1.4.2 Functional regression results 50

1.5 DISCUSSION 57

1.5.1 Insights into model accuracy and limitations 57
1.5.2 Operational approaches and transport optimization 57
1.5.3 Design approaches and underwater noise reduction 59

1.6 CONCLUSION 60

CONCLUSION GÉNÉRALE 62

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 66

LISTE DES TABLEAUX

Table 1. RMSE comparison between the baseline spectrum models and the historical Ross model 28

Table 2. Input parameters considered by the models reviewed in the literature. 41

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Croissance annuelle de la flotte mondiale de 1980 à 2024 © UNCTAD, 2024 3

Figure 2. Âge moyen de la flotte mondiale (répartition en pourcentage du nombre de navires) © UNCTAD, 2024 4

Figure 3. Évolution du carnet de commandes mondial, rapporté à la capacité de la flotte active (pourcentage %) © UNCTAD, 2024 4

Figure 4. Tonnages manutentionnés dans les ports du Québec, en 2010 et entre 2019 et 2023© IMAR et SODES, 2025 5

Figure 5. Croissance annuelle de la flotte marchande au Québec de 2019-2023 exprimée en Millions de tonnes © IMAR et SODES, 2024 6

Figure 7. Répartition des âges des navires par type (pavillons canadiens) © IMAR et SODES, 2025 7

Figure 6. Répartition des âges des navires par type (pavillons étrangers) © IMAR et SODES, 2025 7

Figure 8. Le chevauchement des gammes de fréquences entre le bruit des navires, les différents types de vocalisations émises par les cétacés et la fréquence d'audition des poissons, adapté de ©Cruz et al., 2021 15

Figure 9. Overall radiated noise level of surface ships as a function of speed (measurements from WWII) © Ross, 1976 26

Figure 10. Modeled source level of a ship with 135 000 t of displacement, at speeds of 15, 20 and 25 kn © Wittekind, 2014 31

Figure 11. MARS Station mooring configuration 37

Figure 12. Measurement site with optimized trajectory of partner vessels and navigation routes. The points E1 and E2 delineate the area for port signature measurement, while W1 and W2 define the area for starboard signature measurement. 38

Figure 13. Fleet composition of principal vessel types observed in the study. The horizontal bar chart displays the percentage distribution of four vessel categories. 42

Figure 14. Box-and-whisker plots summarizing statistics of bulkers 43

Figure 15. Observed MSL as a function of frequency for bulkers. The solid black line represents the median spectrum. 44

Figure 16. RMSE across frequencies for bulkers. 48

Figure 17. The coefficient of determination (R^2) of the MARS model. 49

Figure 18. Model results for STW 51

Figure 19. Model results for LOA 53

Figure 20. Model results for vessel draft 55

Figure 21. Model results for vessel age 56

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

AIS	Automatic Identification System (Système d'Identification automatique)
ANSI	American National Standards Institute (Institut national de normalisation américaine)
AQUO	Achieve QUieter Oceans by shipping noise footprint reduction
ASA	Acoustical Society of America (Société acoustique américaine)
AZMP	Atlantic Zone Monitoring Programme (Programme de monitorage de la zone Atlantique - PMZA)
CHS	Canadian Hydrographic Service (Service hydrographique du Canada)
COSEPAC	Comité sur la situation des espèces en péril au Canada
CPA	Closest Point of Approach (Point le plus proche)
CTD	Conductivity, Temperature, and Depth (Conductivité, Température, Profondeur)
ECHO	Enhancing Cetacean and Habitat Observation
FFT	Fast Fourier Transform (Transformée de Fourier Rapide)
GSW	Gibbs-SeaWater
GT	Gross Tonnage (Jauge brute)
IMAR	Innovation maritime

IMO	International Maritime Organization (Organisation maritime internationale - OMI)
ISO	International Organization for Standardization (Organisation internationale de normalization)
LOA	Length Overall (Longueur totale du navire)
MARS	Marine Acoustic Research Station (Station de Recherche en Acoustique Marine)
MEPC	Marine Environment Protection Committee (Comité de protection du milieu marin - CPMM)
MSL	Monopole Source Level (Niveau de source monopole)
MTE	Multi-Electronique
OMI	Organisation Maritime Internationale
PMZA	Programme de monitorage de la zone Atlantique
RMSE	Root Mean Square Error (racine de l'erreur quadratique moyenne)
SL	Source Level (Niveau de la source)
SODES	Société de Développement Économique du Saint-Laurent
SOG	Speed Over Ground (Vitesse sur le fond)
SSL	Spectral Source Level (niveau de source spectral)
STW	Speed Through Water (Vitesse sur l'eau)
TL	Transmission loss (Perte de propagation)

UNCTAD United Nations Conference on Trade and Development (Conférence des Nations Unies sur le commerce et le développement- CNUCED)

URN Underwater Radiated Noise (bruit sous-marin rayonné)

WWII World War II (Seconde guerre mondiale)

LISTE DES SYMBOLES

dB	décibel, unité d'amplitude / niveau sonore
$\boldsymbol{dB\ re\ 1\ \mu Pa^2\ @\ 1\ m}$	niveau sonore exprimé en décibels, référencé à 1 micropascal carré, mesuré à 1 mètre de la source
f	fréquence
Hz	hertz, unité de fréquence
kHz	kilohertz
kn	knots (nœuds), utilisé pour la vitesse
m	meters, mètres, utilisé pour la distance
$m.s^{-1}$	mètre par seconde, utilisé pour la célérité acoustique.
RPM	revolutions per minute (tours par minute)

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Ce mémoire s'inscrit dans la volonté de répondre aux préoccupations du gouvernement fédéral du Canada, notamment portées par Transports Canada et Pêches et Océans Canada, à travers des initiatives visant à concilier le développement du transport maritime avec la préservation de la biodiversité. Dans ce contexte, une attention particulière est accordée au bruit sous-marin généré par le trafic maritime, reconnu comme une source majeure de pollution acoustique et faisant l'objet de stratégies de mitigation, incluant la réduction du bruit à la source, notamment par le développement de navires plus silencieux. Cette étude vise à améliorer la compréhension et la quantification du bruit rayonné sous-marin des navires transitant dans le Saint-Laurent, une voie navigable d'importance stratégique pour le Canada et un écosystème marin d'une grande richesse écologique. En s'appuyant sur des données acoustiques de haute qualité, ce travail contribue aux efforts visant à développer des outils scientifiques permettant d'éclairer la gestion du trafic maritime et les politiques de réduction du bruit sous-marin.

L'introduction générale de ce mémoire présente le commerce maritime et l'importance stratégique de la voie navigable du Saint-Laurent, avant d'aborder le bruit sous-marin et de ses impacts sur la faune marine. Elle aborde ensuite les enjeux liés à la conciliation entre le commerce maritime et la protection des espèces marines. Elle se conclut par la présentation des objectifs de la recherche et de l'approche méthodologique adoptée.

1.1 LE COMMERCE MARITIME

Le transport maritime constitue un des piliers de l'économie mondiale moderne. Environ 90% des marchandises mondiales sont transportées par voie maritime, incluant des produits essentiels tels que les aliments, les combustibles fossiles, les matières premières, et les produits manufacturés. En raison de sa capacité à acheminer de grands volumes à des coûts relativement faibles, le transport maritime demeure le mode de transport le plus économique pour les échanges commerciaux. Il est également le mode de transport le moins polluant en matière d'émissions de CO_2. À titre d'illustration, pour chaque tonne de marchandises transportée sur un kilomètre, les émissions de CO_2 sont de l'ordre de 2,5 g pour un vraquier, de 10 à 14 g pour le transport ferroviaire de marchandises et d'environ 80 g pour un camion de plus de 40 tonnes. (Buhaug *et al.*, 2009).

1.1.1 LA CROISSANCE DU COMMERCE MARITIME ET LA DYNAMIQUE DE LA FLOTTE MONDIALE

Selon les économistes, le transport maritime constitue une demande dérivée, au sens où la demande de services de transport dépend directement de la demande pour les marchandises elles-mêmes (Lun *et al.*, 2023). Dans cette logique, l'expansion du commerce mondial s'est traduite par une augmentation marquée des flux maritimes, particulièrement au cours des 70 dernières années. La littérature souligne notamment une augmentation accrue du volume du transport maritime dans la seconde moitié du XX^{ème} siècle : le volume annuel de marchandises transportées par mer ayant doublé entre 1985 et 1999 pour atteindre environ 5 milliards de tonnes (Palmer, 2010). Dans cette continuité, une analyse synthétique des données enregistrées par la Conférence des Nations Unies sur le commerce et le développement (CNUCED) démontre une hausse du volume du transport maritime et du trafic en tonnes-milles de l'ordre de 3,1% à 3,8% par an (Cariou, 2020). Plus récemment, le volume du maritime mondial a atteint un volume de 12 292 milliards de tonnes en 2023, marquant une augmentation annuelle de 2,4% par rapport à 2022 (UNCTAD, 2024).

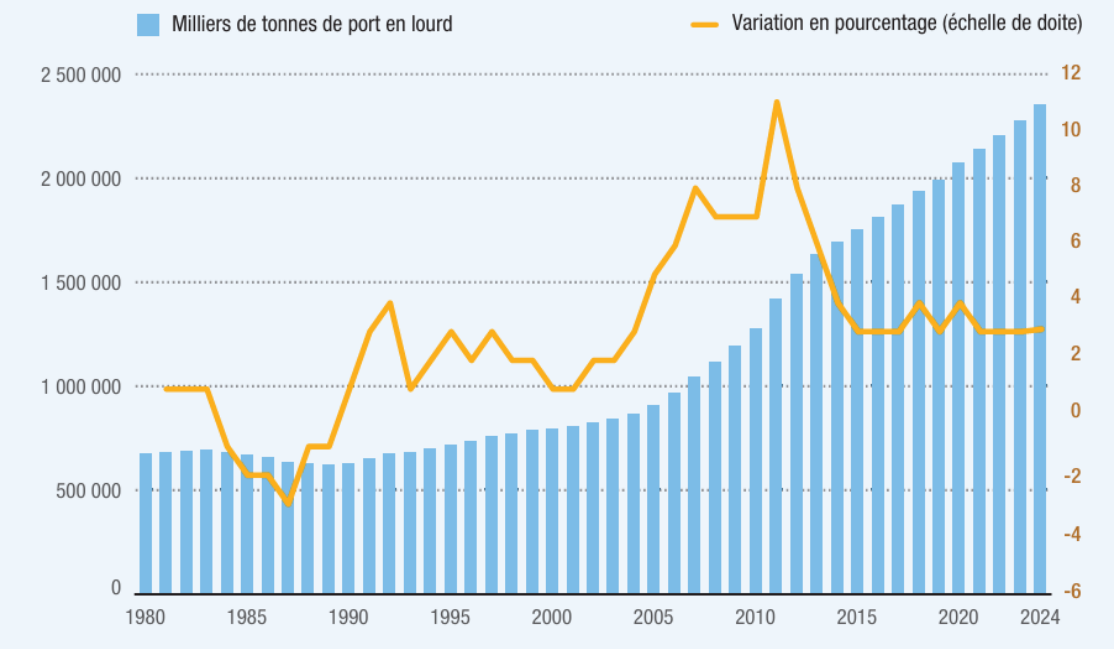


Figure 1. Croissance annuelle de la flotte mondiale de 1980 à 2024 © UNCTAD, 2024

Toutefois, la CNUCED projette une croissance annuelle moyenne d'environ 2,4% entre 2025 et 2029 et de 2,7% pour le commerce conteneurisé (UNCTAD, 2024).

Cette hausse du volume du fret maritime implique une adaptation de la flotte marchande mondiale. Au début de 2024, la flotte mondiale de transport maritime commercial comptait 109 000 navires d'au moins 100 tonneaux de jauge brute (UNCTAD, 2024) contre 105 493 navires en 2023 (UNCTAD, 2023).

Toutefois, au-delà de cette croissance en effectif, les chiffres mettent en évidence un enjeu majeur : le vieillissement de la flotte. En 2023, l'âge moyen des navires atteignait 22,4 ans et plus de la moitié de la flotte mondiale comptait désormais plus de 15 ans (Figure 2). Les vraquiers sont plus récents, avec un âge moyen d'environ 11 ans, tandis que les navires cargo sont les plus vieux avec un âge moyen de 28 ans (Figure 2). À cela s'ajoute également un ralentissement du renouvellement de la flotte, enregistrant une baisse significative depuis 2009. Malgré une légère remontée récente des commandes, sa croissance demeure faible, en raison de plusieurs facteurs tels que la disponibilité limitée des chantiers navals, le prix élevé des navires neufs, les incertitudes concernant les carburants de demain. En 2023, les navires

commandés représentaient seulement 11% de la capacité de la flotte en service contre plus de 50% en 2009 (Figure 3) (UNCTAD, 2024).

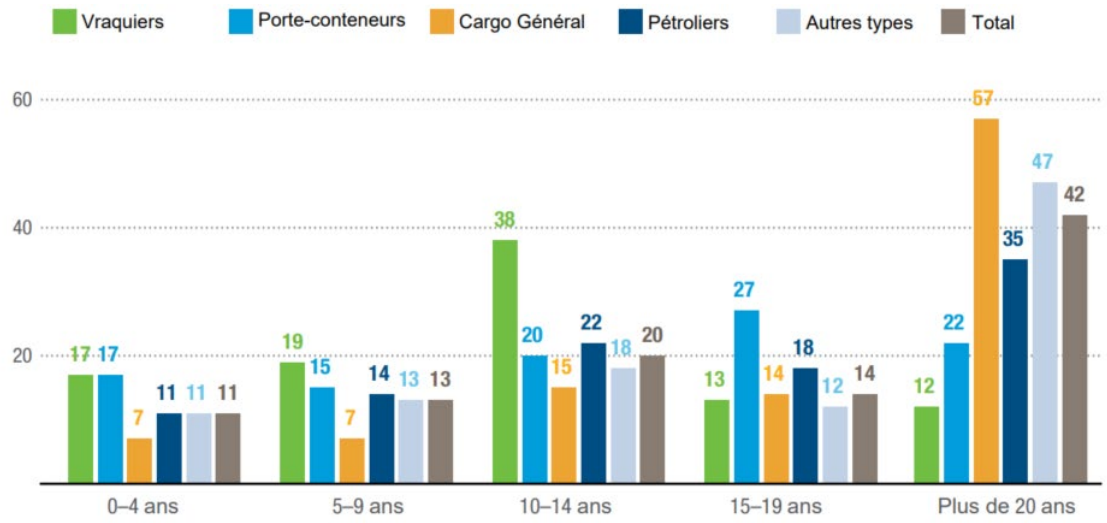


Figure 2. Âge moyen de la flotte mondiale (répartition en pourcentage du nombre de navires) © UNCTAD, 2024

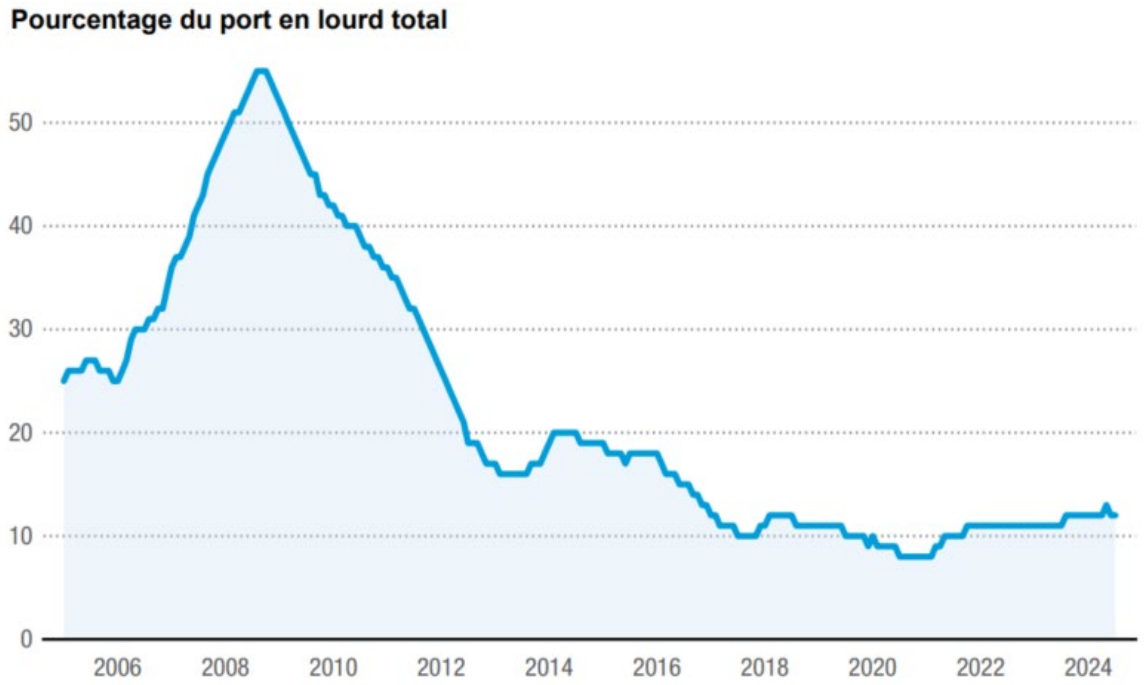
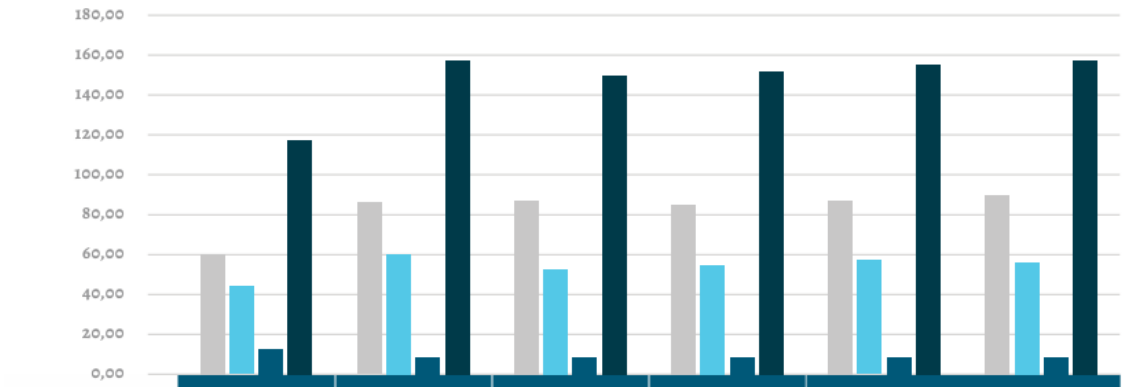


Figure 3. Évolution du carnet de commandes mondial, rapporté à la capacité de la flotte active (pourcentage %) © UNCTAD, 2024

1.1.2 LE RÉSEAU MARITIME DU SAINT LAURENT

Le Saint-Laurent joue un rôle important dans le commerce maritime. Long d'environ 4 000 km, il relie l'océan Atlantique aux Grands Lacs et constitue une voie clé pour le transport de marchandises au Canada (Vincent et Dodson, 1999 ; IMAR et SODES, 2025). Il sert aussi de porte d'entrée vers l'intérieur de l'Amérique du Nord et permet des échanges avec de nombreux pays à l'échelle internationale. À lui seul, le réseau des Grands Lacs et de la Voie maritime a manutentionné 368,9 Mt (millions de tonnes) de marchandises en 2022 (IMAR et SODES, 2025).

En parallèle, les volumes de marchandises manutentionnées dans les ports du Québec sont en hausse depuis 2010. Ils sont passés d'environ 117 Mt en 2010 à près de 157 Mt en 2019, soit une augmentation d'environ 33%. Malgré un recul pendant la pandémie, les volumes se sont accrus entre 2021 et 2022 pour atteindre près de 157 Mt en 2023 (Figure 4). Sur l'ensemble de la période 2010 - 2023, la croissance moyenne annuelle s'établit autour de



	2010	2019	2020	2021	2022	2023
Chargé	59,40	85,43	86,49	84,26	86,52	89,89
Déchargé	42,94	60,00	51,78	54,74	56,45	54,93
Estimation**	11,92	7,86	7,50	7,59	7,66	7,34
Total général*	117,32	156,70	150,15	151,82	155,46	156,74

Figure 4. Tonnages manutentionnés dans les ports du Québec, en 2010 et entre 2019 et 2023© IMAR et SODES, 2025

2,3% (IMAR et SODES, 2024). Une dynamique similaire s'observe également pour le port en lourd total des navires commerciaux transitant au Québec (Figure 5).

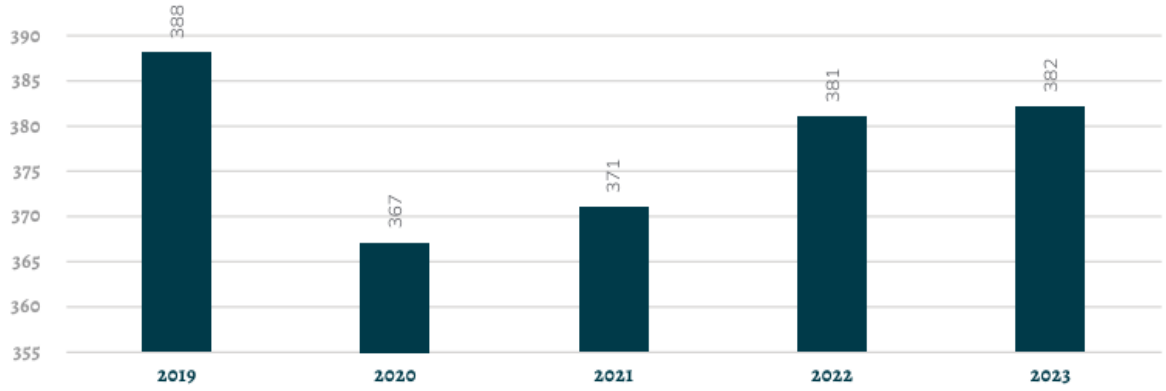
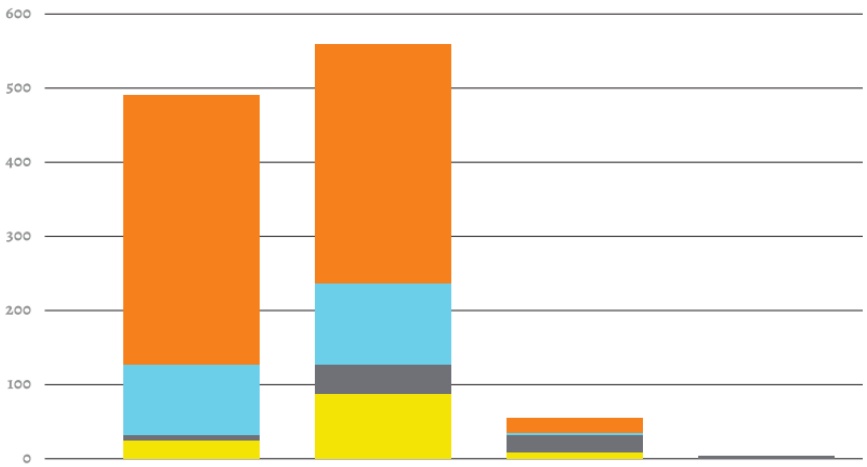


Figure 5. Croissance annuelle de la flotte marchande au Québec de 2019-2023 exprimée en Millions de tonnes © IMAR et SODES, 2024

Les caractéristiques de la flotte maritime entre 2022 et 2023 opérant au Québec se présentent comme suit (IMAR et SODES, 2025) :

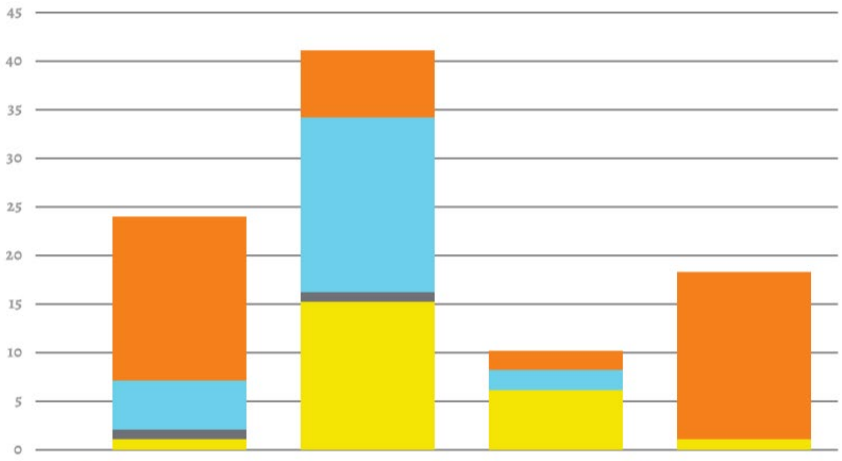
- Répartition de la flotte : les vraquiers occupent une grande partie de la flotte maritime opérant au Québec (45% pour les pavillons canadiens contre 50% pour la flotte internationale). Viennent ensuite, dans les deux cas, les porte-conteneurs, les cargos généraux, puis les autres navires.

- Âge des navires : la flotte étrangère vieillit légèrement (de 9,7 ans en 2010 à 10,9 ans en 2023), tandis que la flotte canadienne s'est au contraire rajeunie de façon marquée, passant de 25,8 ans en 2010 à 20 ans en 2023 (après 20,8 ans en 2022). L'acquisition de navires récents ou neufs par les armateurs des Grands Lacs à la fin des années 2000 a permis ce rajeunissement. L'âge moyen varie également selon le type de navire. Toutefois, les navires sous pavillon étranger opérant au Québec sont généralement, à l'exception des porte-conteneurs, plus jeunes que ceux sous pavillon canadien, ainsi que plus jeunes que la moyenne de la flotte mondiale (Figure 6, 7).



	0-10 ans	11-20 ans	21-30 ans	Plus de 30 ans
Vraquier solide	364	321	21	1
Vraquier liquide	92	111	1	0
Porte-conteneurs	8	37	24	3
Cargo général	26	88	10	0

Figure 7. Répartition des âges des navires par type (pavillons étrangers) © IMAR et SODES, 2025



	0-10 ans	11-20 ans	21-30 ans	30 ans et +
Vraquier solide	17	7	2	17
Vraquier liquide	5	18	2	0
Porte-conteneurs	1	1	0	0
Cargo général	1	15	6	1

Figure 6. Répartition des âges des navires par type (pavillons canadiens) © IMAR et SODES, 2025

1.2 LES CONTRIBUTIONS DU TRAFIC MARITIME AU BRUIT AMBIANT

Le bruit sous-marin constitue une forme de pollution qui s'est intensifiée de manière exponentielle au cours des dernières décennies (Andrew *et al.*, 2002, 2011 ; Ross, 2005 ; Jalkanen *et al.*, 2022). L'activité humaine, et en particulier le transport maritime, introduit une quantité croissante de sons artificiels dans les environnements marins, perturbant ainsi l'équilibre fragile de ces écosystèmes (Williams *et al.*, 2015). Plusieurs études indiquent que l'augmentation du trafic maritime contribue à la hausse continue du bruit ambiant aux basses fréquences. Dans certaines zones, cette hausse est estimée jusqu'à environ 3 dB par décade (Ross, 2005 ; Andrew *et al.*, 2011 ; Frisk, 2012 ; Miksis-Olds et Nichols, 2016). Une étude portant sur l'évolution des émissions sonores produites par le transport maritime mondial (Jalkanen *et al.*, 2022) a démontré que cette pollution acoustique double environ tous les 11,5 ans (+ 3 dB), avec une croissance particulièrement alarmante dans les zones arctiques (+ 3 dB en moins de 3 ans). Les projections pour 2030 anticipent une augmentation drastique de la pollution sonore océanique, résultant d'une croissance rapide et combinée de la flotte commerciale mondiale et de ses activités (Kaplan et Solomon, 2016). Les navires porte-conteneurs, les vraquiers et les pétroliers sont identifiés comme les principaux responsables, générant les trois quarts de l'énergie sonore totale. Les porte-conteneurs occupent les 50 premières places du classement des 100 navires les plus bruyant au monde. Leur impact sonore s'explique par l'augmentation de leur nombre (+12% entre 2014 et 2019), de leur taille et de leurs vitesses d'opération. Cette forte contribution sonore est aussi intrinsèquement liée au phénomène de cavitation, qui se produit dès que les navires dépassent leur seuil de vitesse critique. En effet, plus de 90% des vraquiers et des pétroliers naviguent à des vitesses supérieures à ce seuil (Jalkanen *et al.*, 2022).

Le bruit sous-marin appartient à la catégorie des polluants invisibles, au même titre que les microplastiques ou certains contaminants chimiques ce qui contribue à en sous-estimer l'impact environnemental (Gilliam, 2023). Pourtant, les répercussions de cette pollution

sonore sur la faune marine sont vastes et préoccupantes. En s'appuyant sur des indicateurs socio-économiques tels que le PIB, Sardain et al a démontré que le volume du trafic maritime mondial pourrait augmenter de 240% à 1 209% d'ici 2050, par rapport aux données observés de 2014. L'étude conclut également que la croissance du transport maritime serait plus conséquente que les modifications environnementales liées au changement climatique (Sardain *et al.*, 2019).

1.2.1 GÉNÉRALITÉS

Le son correspond à une onde acoustique de pression qui se propage dans un milieu matériel sous l'effet de compressions et de dilatations (Ross, 1976 ; Urick, 1983). Contrairement à la lumière, qui se diffuse difficilement dans l'eau de mer, le son s'y propage de manière particulièrement efficace, faisant de l'acoustique le principal vecteur d'information dans le milieu marin. Cette propriété confère au son un rôle central tant pour les organismes marins que pour les activités anthropiques (Lurton, 1998).

Le son est classiquement décrit par deux caractéristiques fondamentales : son amplitude, exprimée en décibels (dB), et sa fréquence en Hertz (Hz). Les basses fréquences correspondent à des sons graves, tandis que les hautes fréquences correspondent à des sons aigus. La propagation du son dans l'eau de mer est fortement influencée par les propriétés physiques du milieu. La célérité acoustique y est en moyenne comprise entre 1 450 et 1 550 $m \cdot s^{-1}$ (Lurton, 1998), soit environ 4,5 fois plus rapide que dans l'air (McCarthy, 2004). Cette vitesse dépend principalement de la température, de la salinité et de la pression, qui varient avec la profondeur (Lurton, 1998 ; Simmons *et al.*, 2002 ; Erbe *et al.*, 2022).

Un autre aspect fondamental de la propagation acoustique est que l'atténuation du son est 100 fois moindre dans l'eau que dans l'air. À 1 kHz, elle est de l'ordre de 5 dB/km dans l'air, contre seulement 0,08 dB/km dans l'eau. Les ondes acoustiques perdent de l'énergie au cours de leur propagation, notamment en raison de l'absorption et de la diffusion (Richardson

et al., 1995). Cette perte est d'autant plus importante que la fréquence est élevée. Ainsi, les sons de basses fréquences peuvent se propager sur de très longues distances, parfois sur des centaines de kilomètres (Hildebrand, 2009; McCarthy, 2004).

1.2.2 LE BRUIT DES NAVIRES

Le trafic maritime est le principal responsable des émissions sonores anthropiques dans les basses fréquences, entre 10Hz et 1 kHz (Hildebrand, 2009; De Mora et al., 2020; Wenz, 1962). Ce bruit est généré par le navire lui-même, à travers ses équipements et son interaction avec l'eau. Selon la littérature, on distingue généralement le bruit propre du navire du bruit rayonné dans le milieu marin (Carlton, 2012). Bien que leurs sources soient similaires, leur distinction repose essentiellement sur le point d'observation : le bruit propre renvoie au bruit perçu du point de vue du navire (notamment à bord et par ses équipements), tandis que le bruit rayonné correspond à la part transmise à l'eau et se propageant dans l'environnement marin. Il peut être perçu à distance et peut permettre sa détection à partir des dispositifs d'écoute passive (Ross, 1976 ; Carlton, 2012) .

Le bruit rayonné, dominé par les processus de propulsion (bruit d'hélice incluant le bruit de cavitation), la machinerie, et la turbulence liée à l'écoulement contribue au bruit ambiant, en particulier aux basses fréquences (Ross, 1976 ; McCarthy, 2004 ; Marage et Mori, 2013). La cavitation est la source prédominante du bruit rayonné (Ross, 1976). Lorsque l'hélice tourne, la pression chute sur certaines faces des pales. Si cette pression descend sous la pression de vapeur saturante, des bulles de vapeur se forment. L'effondrement (implosion) violent et aléatoire de ces bulles génère un bruit à large bande allant de quelques Hz à plus de 100 kHz (Ross, 1976). En présence de cavitation, le bruit de propulsion est généralement dominé par une composante large bande. Le bruit de cavitation de l'hélice représente la source de bruit la plus importante dans la signature acoustique des navires. Toutefois, lorsque la cavitation est faible ou absente, les composantes tonales liées à la rotation deviennent plus marquées. Les composantes tonales correspondent à des pics sonores à des fréquences bien

définies (et leurs harmoniques), généralement associées au régime de rotation de l'hélice et au passage des pales. C'est notamment le cas du chant de l'hélice, correspondant à un bruit en bandes étroites (Hildebrand, 2009 ; Erbe *et al.*, 2019). À ces contributions s'ajoute le bruit de machinerie, autre composante importante du bruit navire. Il provient des vibrations mécaniques des moteurs, des turbines, des générateurs et des engrenages à l'intérieur du navire. Ces vibrations sont ensuite transmises à la coque et ensuite rayonnées dans l'eau environnante (Urick., 1983). De manière générale, le bruit de machinerie contribue surtout aux basses fréquences : il se manifeste par des composantes tonales liées au rythme de combustion du moteur et à ses harmoniques, principalement sous 60 Hz, puis s'atténue progressivement à mesure que la fréquence augmente (Arveson et Vendittis, 2000). Enfin, le bruit hydrodynamique, souvent appelé bruit d'écoulement, est généré par l'interaction entre le navire en mouvement et l'eau. Le bruit d'écoulement contribue rarement de manière significative au bruit rayonné car il est le plus souvent masqué par les sources dominantes que sont la propulsion et la machinerie. Selon la littérature, ces sources de bruit émis par le navire dépendent des caractéristiques et des conditions d'opération de celui-ci. Le bruit de la machinerie, presque indépendant de la vitesse du navire, est principalement lié à la nature des équipements embarqués, à la conception de la coque et aux méthodes d'installation des équipements. À l'inverse, le bruit de la cavitation dépend fortement de la vitesse du navire et aussi de la géométrie de l'hélice (Possenti *et al.*, 2024). Enfin, le bruit d'écoulement hydrodynamique est lui aussi lié à la vitesse du navire. Toutefois dans des conditions opérationnelles usuelles, il est souvent secondaire. C'est pourquoi le bruit de cavitation et le bruit de machinerie sont généralement reconnus comme les sources dominantes du bruit sous-marin rayonné par les navires (Han *et al.*, 2018).

1.2.3 LES SONARS

Le sonar, acronyme de (Sound Navigation and Ranging), est un dispositif technologique, utilisant des ondes acoustiques pour transmettre et recevoir des informations dans milieu marin. Les premiers systèmes de détection acoustique sous-marine ont été développés au début du XX^{ème} siècle, notamment à la suite du naufrage du RMS Titanic en

1912, avant de connaître un essor important durant les deux guerres mondiales et la Guerre froide (Ainslie, 2010). Le principe repose sur l'émission d'un signal acoustique qui se propage dans l'eau. Selon la littérature, un sonar se définit par ses deux modes de fonctionnement principaux : le sonar actif et le sonar passif. Le sonar actif repose sur un émetteur et un récepteur. Il fonctionne selon le principe de l'écholocation : il émet un signal acoustique qui se propage dans le milieu avant d'être réfléchi par une cible ou un obstacle. L'analyse de l'écho reçu permet alors de déterminer la distance et la direction de la cible. À l'inverse, le sonar passif n'émet aucun signal ; il se contente de capter les sons naturellement produits par des sources externes, comme les moteurs, les hélices ou autres émissions acoustiques des navires. Le signal analysé correspond alors au bruit ou au son généré naturellement par la cible elle-même, permettant ainsi sa détection et sa caractérisation (Ainslie, 2010 ; Marage et Mori, 2013).

La fonction première et fondamentale est la détection, qui consiste à identifier la présence d'une cible ou d'un signal (comme un obstacle, un sous-marin ou un banc de poissons) dans le bruit ambiant de l'océan (Lurton, 1998). Une fois la détection établie, le système assure la localisation de la cible en mesurant la distance et la direction à laquelle elle est située. Les systèmes modernes intègrent également des fonctions d'identification et de caractérisation, permettant de reconnaître la nature de la cible ou d'estimer certains de ses paramètres spécifiques à partir de sa signature acoustique ou de l'analyse de son écho. Par ailleurs, les sonars remplissent aussi des missions de mesure et de cartographie du milieu marin (Lurton, 1998). Cela inclut les propriétés physiques du milieu marin comme la bathymétrie, la topographie des fonds marins, la vitesse et direction des courants marins (les ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)), le relief et la structure sédimentaire des fonds marins.

Les sonars peuvent être classés selon leur gamme de fréquences, qui détermine leur portée de détection et leur résolution. Les sonars à basse fréquence sont principalement utilisés pour la détection militaire à très longue distance (plus de 100 km). Ils émettent entre 100 et 500 Hz. Les sonars moyenne fréquence sont utilisés pour la détection à des distances

modérées (quelques dizaines de kilomètres), soit pour des besoins militaires (2-10 kHz), soit pour des études géologiques (le profiler de sous-sol ou « Sub Bottom Profiler » entre 3 et 5 kHz). Les sonars haute fréquence sont destinés à des usages civils et commerciaux comme la cartographie des fonds marins. Ils incluent les échosondeurs monofaisceau et multifaisceaux (opérant à plus de 10 kHz) ainsi que les sonars à balayage latéral qui permettent de visualiser des objets sur le fond avec une grande précision (Rako-Gospić et Picciulin, 2019).

Selon les niveaux de source recensés dans la littérature (exprimés en $dB\ re\ 1\ \mu Pa^2\ @\ 1\ m$), la contribution des sonars au bruit rayonné sous-marin varient selon le type de système. Parmi les sources présentant les niveaux de source les plus élevés figurent les sondeurs monofaisceau en eaux profondes, dont les émissions peuvent atteindre 240 dB et les sonars basses fréquences et moyenne fréquence qui ont des niveaux de sources d'environ 235 dB (Lurton, 2002 ; MPL, 2015 ; Rako-Gospić et Picciulin, 2019). Les niveaux de sources des systèmes multifaisceaux et des sonars à balayage latéral se situent entre 220 et 230 dB (Boebel *et al.*, 2004 ; Hildebrand, 2009 ; Rako-Gospić et Picciulin, 2019). Les sonars haute fréquence utilisés par les civils et les commerciaux produisent généralement des signaux avec des niveaux de source plus faibles, autour de 190 dB (Hildebrand, 2009 ; Popper et Hastings, 2009 ; Rako-Gospić et Picciulin, 2019). À titre de comparaison, le transport maritime continu émet à environ 184,7 dB (Rako-Gospić et Picciulin, 2019), mais son impact est différent car il est omniprésent et permanent, contrairement aux impulsions des sonars, qui sont classés comme des bruits anthropiques impulsifs (Ainslie, 2010).

1.2.4 LES IMPACTS DE LA POLLUTION SONORE SUR LA FAUNE MARINE

Dans les océans, de nombreux organismes marins, incluant les mammifères marins, les poissons et certains invertébrés, sont affectés par l'augmentation du bruit d'origine anthropique à plusieurs niveaux (Williams *et al.*, 2015). Les effets sur ces organismes marins diffèrent d'une espèce à un autre (Richardson *et al.*, 1995) . En effet, la sensibilité acoustique

d’un organisme n’est pas uniforme sur l’ensemble du spectre fréquentiel (Figure 7). Sa réponse à un stimulus sonore dépend à la fois de la fréquence du signal et du niveau de bruit (Richardson et al., 1995). Les espèces marines dépendent fondamentalement du son pour interagir avec leur environnement, que ce soit pour se reproduire, naviguer, détecter des proies ou éviter des prédateurs. Le bruit généré par les navires s'étend sur une plage de fréquences très vaste qui se superpose directement avec les plages de vocalisation et d’audition des différentes espèces.

La figure suivante (Figure 8) illustre ce chevauchement (overlap) avec les vocalisations et les fréquences d’audition de certaines espèces étudiées dans la littérature (Cruz *et al.*, 2021). La couleur rouge indique une contribution élevée pour l'URN et la couleur orange une contribution moyenne.

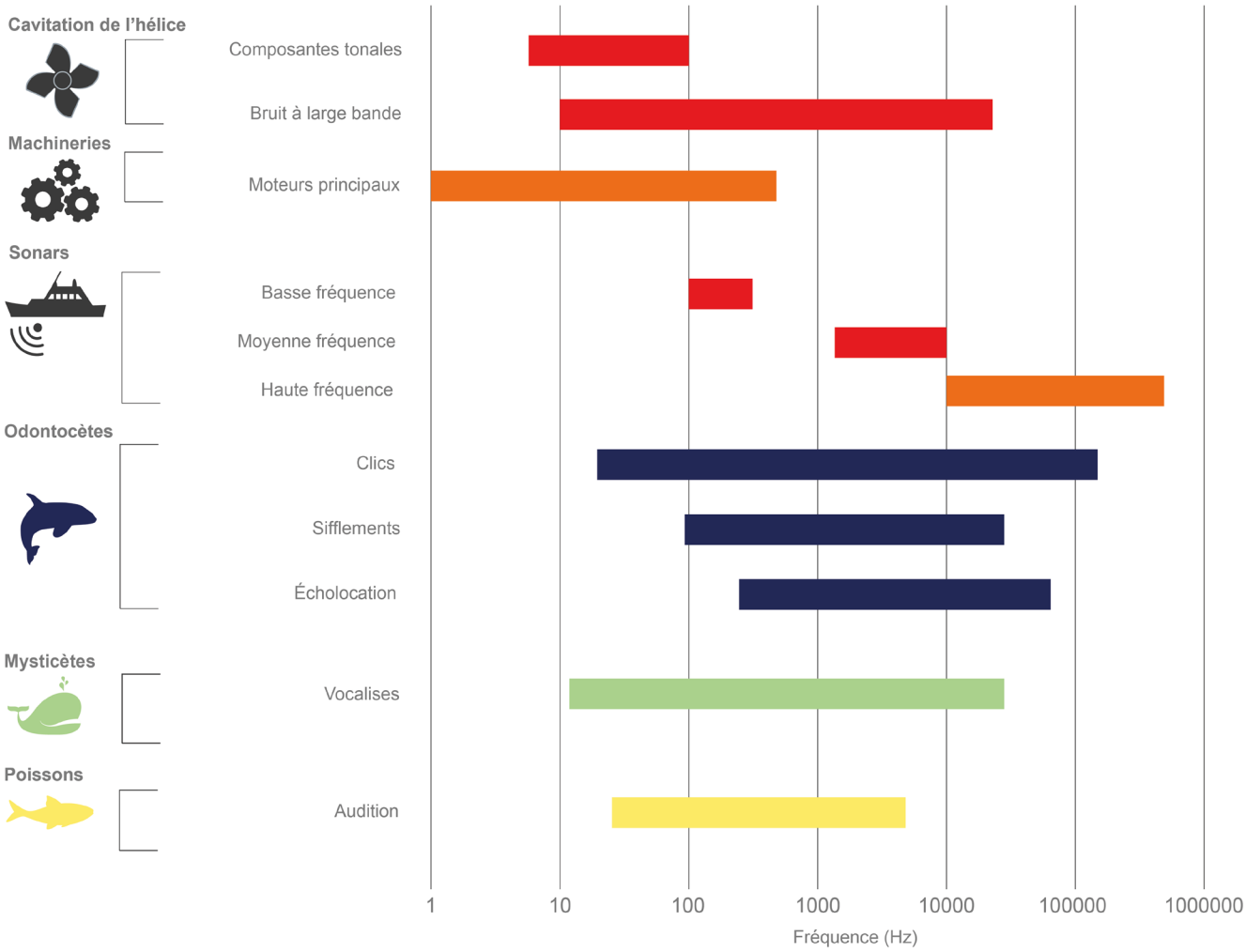


Figure 8. Le chevauchement des gammes de fréquences entre le bruit des navires, les différents types de vocalisations émises par les cétacés et la fréquence d'audition des poissons, adapté de ©Cruz et al., 2021

Les impacts du bruit sous-marin sur ces espèces peuvent être des effets comportementaux, des effets physiologiques, des effets sur la perception acoustique, des blessures et peut mener à la mort de celles-ci (Clark *et al.*, 2009 ; Johansson, 2011 ; Audoly *et al.*, 2017).

Dans la littérature, les effets comportementaux peuvent être associés à des réactions d'évitement ou d'anxiété. Chez les mammifères marins, l'exposition au bruit peut entraîner des changements dans les vocalisations et perturber les comportements d'alimentation ainsi que les interactions sociales. (Francis *et al.*, 2009 ; Simpson *et al.*, 2016 ; Cox *et al.*, 2018 ;

Hiley *et al.*, 2021). Ainsi, face au bruit, ils peuvent abandonner leurs activités de recherche de nourriture (Sivle *et al.*, 2012). Certaines espèces aussi peuvent être amenés à changer leur comportement au niveau de la durée des plongée (Falcone *et al.*, 2017) et de leur vitesse de nage (Stone et Tasker, 2023). Les nuisances sonores peuvent aussi provoquer des déplacements temporaires ou définitifs : les cétacés peuvent quitter leur habitat essentiels (Bejder *et al.*, 2006 ; Brandt *et al.*, 2011) et modifier leurs routes migratoires (Dunlop *et al.*, 2015). Chez les poissons, on peut observer des réactions de sursaut, des plongées brusques et une perte de cohésion des bancs (Blaxter *et al.*, 1981). Le bruit peut aussi réduire l'efficacité d'alimentation et affaiblir les réactions de fuite face aux prédateurs (Bracciali *et al.*, 2012), ce qui augmente le risque de mortalité. Enfin, il peut nuire à la défense de leurs habitats et de leurs œufs et alevins (Bruintjes et Radford, 2013). L'exposition aux sonars à basse fréquence provoque chez les orques et les globicéphales une modification de leur comportement de plongée, se traduisant par le remplacement des plongées de recherche de nourriture par des plongées plus courtes (Miller *et al.*, 2011 ; Sivle *et al.*, 2012 ; Rako-Gospić et Picciulin, 2019).

L'exposition au bruit peut provoquer chez les différentes espèces une augmentation du stress et des changements métaboliques (Johansson, 2011 ; Rolland *et al.*, 2012 ; Nichols *et al.*, 2015) et à une altération progressive de son système immunitaire. Il peut y avoir également des effets sur la reproduction et de l'alimentation (Lusseau et Bejder, 2007 ; Cox *et al.*, 2018). Les baleines bleues peuvent cesser de s'alimenter en profondeur ou s'enfuir rapidement lorsqu'elles sont exposées à des sonars moyenne fréquence (Goldbogen *et al.*, 2013 ; Rako-Gospić et Picciulin, 2019).

Les bruits intenses peuvent aussi provoquer des lésions physiques. Des épisodes d'échouages collectifs de baleines à bec (*Ziphius cavirostris*) ont été rapportés à la suite d'exercices impliquant des sonars militaires. L'exposition à ces émissions acoustiques perturberait leur comportement de plongée et pourrait favoriser l'apparition de lésions (Ross, 1976 ; Fernández *et al.*, 2005 ; Hildebrand, 2005 ; Rako-Gospić et Picciulin, 2019). Ils endommagent les statocystes (organes d'équilibre) chez les céphalopodes et les cellules

sensorielles de l'oreille interne chez les poissons et d'autres invertébrés (McCauley *et al.*, 2003 ; André *et al.*, 2011 ; Solé *et al.*, 2013). On peut également observer des pertes d'audition temporaires ou permanentes chez les mammifères marins, réduisant ainsi leur capacité à repérer leurs proies ou leurs prédateurs (Rako-Gospić et Picciulin, 2019).

Un autre mécanisme d'impact majeur du bruit sous-marin réside dans le masquage acoustique, par lequel le bruit anthropique peut masquer des sons naturels essentiels, tels que ceux émis par les proies, les prédateurs et les partenaires de reproduction. Les espèces auront alors du mal à se nourrir (Duarte *et al.*, 2021), à communiquer (Hawkins et Popper, 2017 ; Erbe *et al.*, 2019) et à s'orienter (Dunlop *et al.*, 2008).

Dans l'estuaire du Saint-Laurent, ces impacts sont particulièrement préoccupants, en particulier chez les mammifères marins. Parmi les cas les plus préoccupants figurent le béluga *(Delphineptarus leucas),* le rorqual bleu *(Balænoptera musculus)* et la baleine noire de l'Atlantique Nord (*Eubalaena glacialis*). Ces espèces sont toutes désignés « en voie de disparition » par le Comité sur la situation des espèces en péril au Canada (COSEPAC) (COSEPAC, 2012, 2013, 2014). Le rorqual commun *(Balaenoptera physalus) et le* marsouin commun *(Phocoena phocoena)* sont également suivis de près en raison de leur vulnérabilité et de leur statut de conservation dit préoccupante (COSEPAC, 2019, 2022).

1.3 LES ENJEUX DE LA GESTION DURABLE DU COMMERCE MARITIME

L'augmentation du PIB mondial reflète une économie globale dynamique, ce qui stimule logiquement les échanges commerciaux internationaux. Pour répondre à cette demande, la flotte maritime se développe de manière exponentielle, ce qui se traduit par une augmentation du nombre de navires et de leur tonnage brut (Frisk, 2012). Un défi majeur réside dans l'équilibre entre l'efficacité économique du transport maritime et la nécessité de minimiser son empreinte environnementale.

1.3.1 LES RÈGLEMENTATIONS DU BRUIT SOUS MARIN

À l'échelle internationale, il n'existe pas encore de réglementation fixant des limites au bruit sous-marin rayonné par les navires. Le comité de la protection du milieu marin (MEPC) de l'OMI (Organisation Maritime Internationale) a toutefois publié des lignes directrices destinées aux acteurs de la navigation commerciale (constructeurs, designers et armateurs) visant à réduire le bruit sous-marin (OMI, 2014). Ces directives formulent des recommandations applicables à tous les navires, notamment sur la conception des hélices et la forme des coques pour les nouveaux navires, les machines de bord et les mesures opérationnelles et d'entretien. En 2024, l'OMI a mis à jour ses lignes directrices sur la réduction du bruit sous-marin rayonné par les navires (OMI, 2024). Lors de la 81ème session du MEPC, un plan d'action sur la réduction du bruit sous-marin a été approuvé afin d'aider à la mise en œuvre des lignes directrices de l'OMI. Dans ce cadre, une phase d'acquisition d'expérience de trois ans est prévue jusqu'à la 85ème session du MEPC en 2026, avec la possibilité d'une prolongation de deux ans afin d'élaborer et de consolider des meilleures pratiques.

Par ailleurs, le Canada gère le bruit sous-marin des navires grâce à une combinaison de lois fédérales, d'initiatives gouvernementales stratégiques et de collaborations internationales. Sur le plan juridique, la responsabilité est partagée entre plusieurs ministères, s'appuyant sur des textes comme la Loi de 2001 sur la marine marchande du Canada (L.C. 2001, ch. 6) (modifiée en 2019 pour encadrer spécifiquement les impacts acoustiques de la navigation), ainsi que la Loi sur les pêches et la Loi sur les espèces en péril qui protègent l'habitat acoustique des mammifères marins menacés (L.C. 2002, ch. 29). Le gouvernement s'appuie par ailleurs sur des initiatives majeures de Transport Canada telles que le Plan de protection des océans et l'Initiative pour des navires silencieux ; ces programmes soutiennent le développement de technologies innovantes et la mise en œuvre de pratiques opérationnelles. Sur la scène mondiale, le Canada collabore activement avec l'OMI pour réviser et renforcer les directives mondiales de réduction du bruit des navires commerciaux. Afin d'unifier et d'optimiser toutes ces actions de gestion, le gouvernement a publié en 2024

une ébauche de la Stratégie canadienne sur le bruit sous-marin, menée par Pêches et Océans Canada.

Au niveau de l'estuaire du Saint-Laurent, plusieurs mesures d'atténuation ont été récemment déployées pour protéger la faune, telles que des limitations de vitesse, des quotas de bateaux d'excursion, l'interdiction de l'exploitation pétrolière et gazière, ainsi que la création de zones refuges inaccessibles aux navires. Une initiative pour protéger les espèces en voie de disparition dans le cadre du Plan de protection des océans, vise spécifiquement à réduire les menaces, y compris les perturbations physiques et acoustiques, qui pèsent sur l'épaulard du Sud, la baleine noire de l'Atlantique Nord le béluga de l'estuaire du Saint-Laurent.

1.3.2 VERS UNE MEILLEURE COMPRÉHENSION : TRAVAUX SCIENTIFIQUES ET BESOINS DE RECHERCHE

Les mesures du bruit sous-marin rayonné par les navires (URN) constituent un élément central des évaluations d'impact et des démarches de mitigation, puisqu'elles permettent de caractériser les niveaux sonores selon les types de navires et d'examiner l'influence des conditions d'opérations et de ses caractéristiques. On distingue généralement deux approches dans la mesure du bruit rayonné sous-marin : une approche opportuniste et une approche contrôlée. L'approche opportuniste consiste à mesurer le bruit sous-marin rayonné lors du passage de navires à proximité d'une station d'écoute. Par ailleurs, l'approche contrôlée consiste à réaliser des mesures du bruit rayonné lors du passage d'un navire spécifique, en suivant un protocole défini et des conditions aussi standardisées que possible. Dépendamment du protocole, des paramètres de navigation comme la vitesse, le régime du moteur, la route suivie sont imposés afin d'assurer la comparabilité des mesures.

Les travaux scientifiques sur la pollution sonore d'origine maritime se sont multipliés ces dernières années, avec l'objectif de mieux quantifier la contribution du trafic au bruit ambiant et d'en comprendre les mécanismes (McKenna *et al.*, 2012, 2013 ; Simard *et al.*, 2016 ; McIntyre *et al.*, 2021 ; MacGillivray *et al.*, 2022 ; Sakai *et al.*, 2023). Les recherches

combinent désormais des mesures d'URN, des données de trafic maritime (bases de données AIS) et différentes approches de modélisation pour comprendre l'influence des caractéristiques des navires et de leurs conditions d'opération sur l'URN. Malgré ces avancées, des besoins de recherche persistent, notamment pour améliorer la comparabilité des mesures et accroître la robustesse des modèles de prédiction d'URN.

1.4 OBJECTIFS DE L'ÉTUDE ET MÉTHODOLOGIE

L'étude des nuisances sonores générées par les navires repose sur la compréhension des relations complexes entre les caractéristiques physiques des navires, leurs conditions opérationnelles, et les niveaux de bruit sous-marin qu'ils génèrent. Dans ce contexte, l'objectif principal de ce mémoire est de développer un modèle du bruit sous-marin rayonné par les navires, spécifiquement adapté à la flotte opérant dans le Saint-Laurent. Ce modèle vise à établir des relations quantitatives entre les niveaux de bruit et des paramètres statiques et dynamiques des navires.

La méthodologie appliquée dans ce mémoire repose sur l'exploitation d'une base de données acoustiques de haute qualité collectée par la station acoustique MARS entre 2021 et 2023 (Mercure-Boissonnault *et al.*, 2023). Les signatures acoustiques analysées sont exprimées en Monopole Source Level (MSL) et couvrent la bande fréquentielle 10–500 Hz. Ces mesures ont été réalisées selon un protocole optimisé et conforme aux normes internationales. En complément des données acoustiques, les caractéristiques statiques et dynamiques des navires ont été extraites à partir des données AIS. Les paramètres statiques considérés incluent notamment la longueur du navire et l'âge des navires, qui reflètent des aspects liés à leur conception et à leur historique d'exploitation. Les paramètres dynamiques, quant à eux, décrivent les conditions opérationnelles lors de chaque transit, et comprennent principalement la vitesse à travers l'eau et le tirant d'eau réel.

La modélisation du bruit sous-marin rayonné repose sur l'utilisation d'un modèle de régression fonctionnelle. Cette approche statistique permet de considérer les niveaux de bruit comme des fonctions continues de la fréquence. On analysera ensuite les coefficients de régression obtenus par le modèle, ce qui permettra d'identifier les bandes fréquentielles où chaque paramètre exerce une influence significative sur le bruit rayonné.

La performance du modèle a été évaluée à l'aide de métriques statistiques classiques, telles que l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et le coefficient de détermination R^2. Ces indicateurs permettent de quantifier la capacité du modèle à reproduire les niveaux de bruit observés sur l'ensemble du spectre fréquentiel.

CHAPITRE 1
ANALYSE DU BRUIT RAYONNÉ DES NAVIRES EN FONCTION DE LEURS CARACTÉRISTIQUES ET DES CONDITIONS D'OPÉRATION

1.1 RÉSUMÉ

Comprendre comment les caractéristiques des navires et leurs conditions d'exploitation influencent le bruit sous-marin est essentiel pour identifier les pistes essentielles de réduction du bruit et évaluer les risques pour la vie marine. Cette étude vise à caractériser et à modéliser le bruit rayonné des navires commerciaux opérant dans le Saint-Laurent, à l'aide de signatures acoustiques de haute qualité. L'analyse est basée sur un ensemble de données de 398 signatures MSL des navires partenaires, collectées entre 2021 et 2023 par la Station de recherche acoustique marine MARS, suivant un protocole de mesure standardisé. Les données acoustiques ont été combinées avec les paramètres statiques et dynamiques des navires dérivés des données AIS, notamment la longueur totale du navire, l'âge du navire, la vitesse et le tirant d'eau réel du navire. Les niveaux de bruit sous-marin ont été analysés entre 10-500 Hz. La modélisation repose sur une approche de régression fonctionnelle, permettant de mieux caractériser les relations entre le bruit sous-marin rayonné et les variables prédictives associées aux navires commerciaux opérant dans la voie maritime du Saint-Laurent. Le modèle explique entre environ 30% et 80% de la variabilité observée dans les niveaux de source monopole.

.

UNDERWATER RADIATED NOISE EXPLAINED FROM SHIP CHARACTERISTICS AND OPERATING CONDITIONS - MODEL OBTAINED FROM THE MARS DATABASE.

Faniry Rabetoandro,[1] Guillaume St-Onge,[1] Pierre Mercure-Boissonnault[1] and Pierre Cauchy[1]

[1] Institut des sciences de la mer (ISMER), Université du Québec à Rimouski (UQAR), Rimouski, Québec G5L3A1, Canada

1.2 CONTEXT

Maritime shipping, responsible for 90% of global trade (Fournier *et al.*, 2018), constitutes the main source of low-frequency noise pollution in the ocean. The bustling activity within the St. Lawrence Seaway, which serves as a vital artery for maritime commerce, raises concerns about its potential impact on marine life. Intensive vessel traffic along this route generates significant underwater noise pollution, potentially disrupting inter-species communication and distorting their environmental perception. Given the critical role of this waterway in international trade and the ecological significance of its surrounding marine environment, it is imperative to thoroughly assess and address the implications of ship-generated noise on the underwater ecosystem. Among these concerns, the Marine Acoustic Research Station (MARS) project (https://www.projet-mars.ca/en) emerges as an initiative, shedding light on ship-generated noise. It aims to address the pressing issues raised by the Government of Canada (Transport Canada, Fisheries and Oceans Canada) regarding ocean protection, noise reduction, and the development of silent vessels. Understanding how to mitigate and manage this noise pollution while maintaining efficient maritime transportation is crucial for safeguarding the health and integrity of the St. Lawrence Seaway and its associated marine habitats.

1.2.1 Research objectives

This research aims to clarify the relationship between ship noise, their characteristics, and operating conditions. The ability to estimate a ship's noise level without requiring it to pass through an acoustic measurement station is highly valuable. This capability would allow for more efficient monitoring and management of noise pollution, enabling real-time assessments without the need for costly and time-consuming physical measurements.

1.2.2 Underwater Radiated Noise Modelling: Overview of research and approaches

Research into underwater noise produced by ships began during World War II (WWII), when military needs led to the development of underwater acoustics. This early work laid the groundwork for various models that estimate the radiated noise of ships using various available vessel parameters. According to the literature (Yan *et al.*, 2021), ship source level prediction models are generally classified into two main categories, based on their modeling approach. The first approach includes statistical models, which derive empirical relationships between source level (SL), ship speed, vessel length (or tonnage), and frequency, based on large datasets of measured acoustic data. These models aim to fit general trends observed across various ships and operating conditions. The second approach focuses on physical noise-generation mechanisms, modeling SL as the combined contribution of distinct sources, such as mechanical noise from engines, propeller cavitation noise, and non-cavitating propeller noise.

The Ross Model (1976) (Ross, 1976)

Ross developed one of the foundational models for predicting underwater radiated noise (URN) from merchant ships. His work was based on empirical measurements collected after WWII, covering a broad range of commercial vessels including bulk carriers, tankers, and containerships. At that time, most acoustic studies were focused on naval vessels, so Ross' contribution represented one of the first attempts to standardize URN estimates for civilian merchant fleets. Measurements were conducted at American, Canadian, and British

test ranges, including seabed recordings taken at Innehan, Scotland, in waters approximately 40 m deep. These measurements were taken for ships operating at speeds typically ranging from 8 to 24 kn.

Based on these measurements, Ross proposed a simple empirical relationship between ship speed and source level (SL), formulated as a power-law model. For frequencies above 100 Hz, this relationship can be expressed as:

$$\mathrm{SL}(f) = L'_S + 20 - 20\log f \ (f \geqslant 100) \tag{1}$$

In this expression, $SL(f)$ is the source level at a given frequency f, L'_S is the overall broadband source level, measured in the frequency band from 100 Hz to 10 kHz. Ross defined L'_S based on the observed logarithmic dependence on ship speed:

$$L'_S = 170 + 53\log\frac{U_a}{10kn} \tag{2}$$

where U_a is the speed (kn), referenced to 10 kn. Substituting into, $SL(f)$ expression, the model becomes:

$$SL(f) = 190 + 53\log\frac{U_a}{10} - 20\,log\,f \tag{3}$$

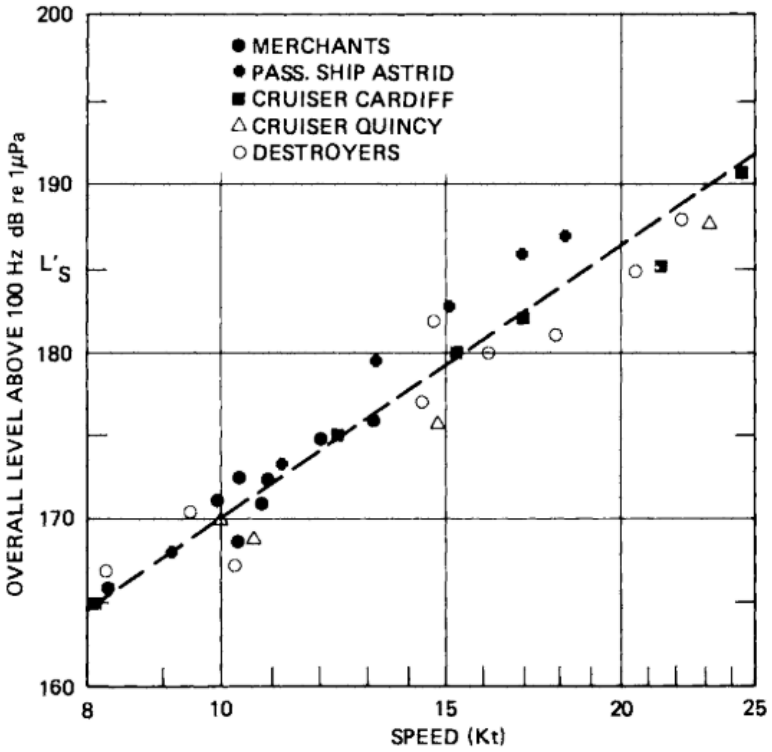


Figure 9. Overall radiated noise level of surface ships as a function of speed (measurements from WWII) © Ross, 1976

The variation from this trend was generally within ±4 dB across the observed range of speeds.

Ross also characterized tonnage as a parameter related to the length of the vessel. His analysis of WWII data on battleships and aircraft carriers revealed that ship size plays a significant role: larger vessels were consistently found to be approximately 10 dB noisier than smaller ships operating at the same speeds. Ross proposed the following formulations for the overall source level L'_S which incorporate both speed and displacement tonnage DT (in tons):

$$L'_S = 112 + 50 \log \frac{U_a}{10kn} + 15 \log DT \tag{4}$$

$$L'_S = 134 + 60 \log \frac{U_a}{10kn} + 9 \log DT \tag{5}$$

The corresponding spectral source level as a function of frequency is expressed by:

$$SL(f) = 132 + 53\log\frac{U_a}{10} + 15\,log\,DT - 20\;\;log\,f \tag{6}$$

$$SL(f) = 154 + 60\log\frac{U_a}{10} + 9\,log\,DT - 20\;\;log\,f \tag{7}$$

The results obtained by Ross revealed a positive relationship between radiated noise levels, vessel speed, and ship length. Nevertheless, the author cautioned against the direct application of this model to vessels larger than 30 000 GT.

The Wales-Heitmeyer Model (Wales et Heitmeyer, 2002)

This model was derived from extensive measurements of underwater radiated noise from merchant ships operating in the Mediterranean Sea and Eastern Atlantic Ocean. Wales and Heitmeyer conducted noise measurements on 272 merchant vessels, covering the 30–1200 Hz frequency range, and established a median spectral source level from the collected data. From the 272 ships measured, a subset of 54 vessels was retained for the model evaluation. Based on the rational spectrum approximation, introduced by Wales and Heitmeyer, the mean spectrum can be approximated by:

$$SL(f) = 230 - 45.94\log_{10}(f) + 9.17\log_{10}\left[1 + \left(\frac{f}{340}\right)^2\right] \tag{8}$$

The model achieves a remarkable accuracy of 0.6 dB rms across the 30 to 1200 Hz frequency band.

They also demonstrate that the classical Ross model produces large errors. The overall RMSE was 9.38 dB in the low-frequency band (30-400 Hz) and 8.54 dB in the high-frequency band (400-1200 Hz). For more than 25% of the vessels tested, the Ross model produced RMSE exceeding 10 dB. The model significantly overestimated the variability of the source level within the set of spectra. These results were primarily attributed to the weak correlation observed between the source level and the ship’s speed or length, when Ross's

model is applied to modern merchant ships. To take the tests further, Wales and Heitmeyer used and compared three variations of what they referred to as baseline spectrum models. The first, the "mean spectrum model," is an extreme simplification that completely ignores individual ship characteristics. The second, the "optimum power law model," like Ross's classic model, estimates ship noise by adding an adjustment value (a “displacement”) to a base spectrum. The major constraint is that this displacement must depend on a power law dictated by the ship's speed and length. But instead of using Ross's model coefficients, the computer calculates the best possible coefficients specifically in order to minimize the RMSE as much as possible. The third, the "optimum displacement model," abandons power laws entirely and freely calculates the displacement for each ship to strictly minimize the error across all data, The major conclusion drawn from this comparison is that the "optimum power law model" which strives for the best possible correlation with speed and length performs barely better than the highly basic "mean spectrum model" that entirely ignores these physical parameters. The Table 1 summarizes the RMSE results derived from the baseline spectrum models and Ross’s model.

Table 1. RMSE comparison between the baseline spectrum models and the historical Ross model

Models	**30-400 Hz**	**400-1200 Hz**	**30-1200 Hz**
Ross classical	9.38	8.54	8.82
Mean spectrum	2.24	1.32	2.20
Optimum power law	1.82	1.23	1.70
Optimum displacement	1.54	1.18	1.50

McKenna et al Model (McKenna *et al.*, 2013)

The analysis focused specifically on container ships transiting the Santa Barbara Channel off the coast of southern California. The study used an opportunistic approach combining acoustic measurements with data streams covering design characteristics, operational conditions, and oceanographic settings, totaling 593 ship passages. The study employed Generalized Additive Models (GAMs). The highest predictive power was achieved by the broad-band (20-1000 Hz) model, which explained 56% of the deviance. Using design predictors alone never explained more than 25% of the deviance. When operational and oceanographic covariates were included, the explained variability in SL increased to greater than 39%. The models with the highest predictive power, in order of selection importance, consistently included ship speed, a measure of ship size (Length overall, LOA or Gross tonnage, GT). Speed explained the most variability in SL across all frequency bands. They did not observe a significant influence of draft. Regarding the influence of vessel age, the results of this model show that older vessels produced higher noise levels (SL) in the octave band centered at 31.5 Hz. At the time of the analysis (2013), the majority of the ships studied were between 8 and 13 years old (47%), 19% were less than 8 years old, and the rest were over 13 years old. The oldest ship included in the study was 42 years old.

The Wittekind Model (Wittekind, 2014)

In his work, Wittekind tends to characterize the underwater radiated noise level of a ship by relating spectral components of noise to naval architectural features of the ship. The model emphasizes the main contributors to underwater radiated noise, which have been consistently identified as dominant across a wide range of vessel types: low frequencies from propeller cavitation, medium to high frequencies from propeller cavitation and medium frequencies from four-stroke diesel engines (Wittekind, 2014).

In order to determine the influence of the main ship parameters on URN, the following parameters were considered:

- Displacement
- Speed relative to cavitation inception speed
- Block coefficient (the ratio of displacement to the product of the ship's length, breadth, and draft
- Mass of diesel engines
- Diesel engine resiliently mounted yes or no

The data is based on measurements taken by the Hamburg Ship Model Basin (HSVA) at the hull level, just above the propeller, on modern ships at full scale. These inputs are associated with the three key contributors to radiated ship noise, observed across most vessel types: low-frequency cavitation F_1, high-frequency cavitation F_2, and diesel engine emissions F_3. The SL is calculated by the logarithmic sum of the levels of these three contributions, as shown in the equation:

$$SL = 10\log\left(10\frac{F_1}{10} + 10\frac{F_2}{10} + 10\frac{F_3}{10}\right) \tag{9}$$

The model was tested in a background noise study involving an oil tanker in a shallow water environment. The results showed that at frequencies below 150 Hz, the model's prediction of the received level corresponds very closely to the measured level. Above 150 Hz, the model's prediction gives values that are on average 4 dB higher than those measured. The uncertainty of the digital model is estimated to be within a range of ± 5 dB. The uncertainty of the propagation loss prediction is also estimated at ± 5 dB, mainly due to the unknown properties of the seabed.

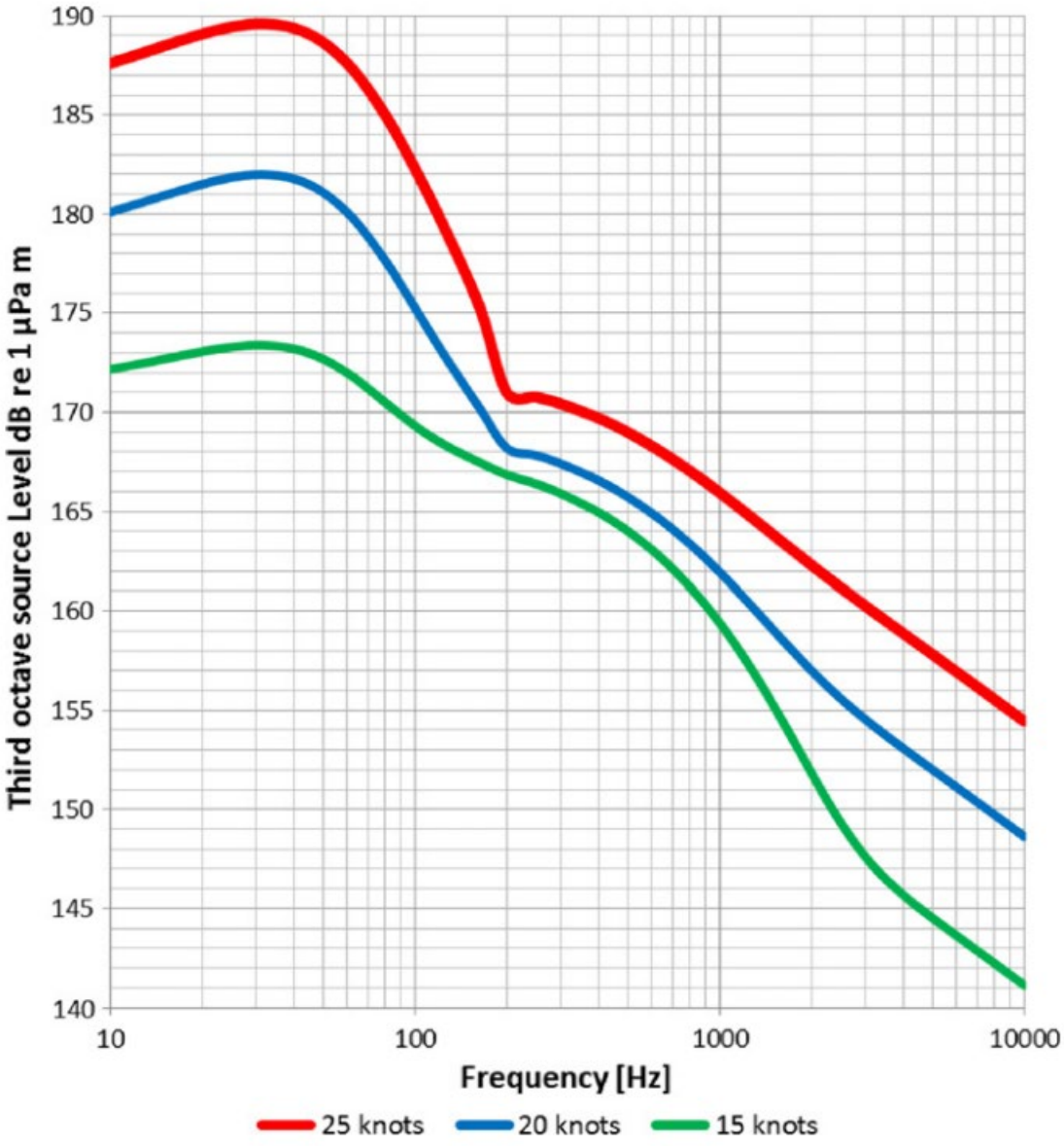


Figure 10. Modeled source level of a ship with 135 000 t of displacement, at speeds of 15, 20 and 25 kn © Wittekind, 2014

Simard et al (Simard *et al.*, 2016)

To better understand how ship characteristics influence underwater noise, a large-scale measurement campaign was conducted. The dataset consists of 255 opportunistic spectral source level (SSL) measurements collected from merchant ships transiting the lower St. Lawrence Seaway in eastern Canada. The measurement method was designed to follow the ANSI S12.64-2009 standard (ANSI/ASA, 2009).

The fleet studied consists of cargo ships, container ships, and tankers. The various parameters considered are length, breadth, draft, age, speed, and other variables. It was very diverse in terms of size. The average length of the ships was 192 ± 51 (estimated standard deviation) meters. Approximately half of the ships measured between 150 and 225 meters. Cargo ships were on average longer (203 m) than oil tankers (175 m). Among the very large ships (≥ 250 m), 70% were container ships or bulk carriers, compared to 30% oil tankers. The average width was 26.5 meters, and the average draft was 8.6 m. Their age varied from a few months to 51 years, with a mean of 15.46 ± 12.5 years. The average of sailing speed was 13,4 ± 2,9 kn. Overall, vessel speeds were similar across ship categories, although ships longer than 250 m, operated at an average speed approximately 1.6 kn higher than the rest of the fleet. These parameters were used in statistical analyses to explain the high variability observed in the SL. The most predictive parameters were selected for further analysis including length, breadth, draught, and speed, collected from AIS.

Simard et al. developed three models using stepwise least squares polynomial regressions, incorporating physical variables expressed in both linear and logarithmic forms, and their ratios. Several models were computed:

- A fifth-order polynomial model based on length (l, m), breadth (b, m), draught (d, m) and speed (s, kn) and the third-octave central frequency (f, Hz) for 247 ships >100 m:

$$
\begin{aligned}
SL(f,\ell,b,d,v) = {} & 285.40 + 0.0496f - 4.8\times10^{-7}(f-2108.26)^2 - 69.33\log_{10}(f)) \\
& -49.29(\log_{10}(f)-2.70016)^2 - 58.50(\log_{10}(f)-2.70016)^3 \\
& -41.54(\log_{10}(f)-2.70016)^4 - 7.62(\log_{10}(f)-2.70016)^5 \\
& +13.47\log_{10}(\ell) - 0.55b + 0.0008(b-26.8854)^3 + 0.706d \\
& +20.164\log_{10}(v) - 505.1(\log_{10}(v)-1.12024)^3 \\
& +2891.9(\log_{10}(v)-1.12024)^5
\end{aligned} \tag{10}
$$

- A fifth-order polynomial model based on third-octave central frequency (f, Hz) for 247 ships >100m:

$$
\begin{aligned}
SL(f) = {} & 196.26 - 10.82\log_{10}(f) + 13.56(\log_{10}(f)-2.70016)^2 \\
& -6.27(\log_{10}(f)-2.70016)^3 - 5.71(\log_{10}(f)-2.70016)^4 \\
& +3.78(\log_{10}(f)-2.70016)^5
\end{aligned} \tag{11}
$$

- A fifth-order polynomial model based on third-octave central frequency (f, Hz) for 23 ships >250 m with an added speed term (s, knots):

$$
\begin{aligned}
SL(f,s) = {} & 174.96 - 7.42\log_{10}(f) + 14.77(\log_{10}(f)-2.70016)^2 \\
& +(-14.54(\log_{10}(f)-2.70016)^3 + (-5.55(\log_{10}(f)-2.70016)^4 \\
& +6.58(\log_{10}(f)-2.70016)^5 + 0.80s
\end{aligned} \tag{12}
$$

Analyses showed that the relationships between spectral source levels (SSL) or broadband source levels (SL) and ship characteristics such as type, age, and speed were weak. Also, vessel speed exhibited a stronger influence at low frequencies (below 100 Hz), and this effect was more pronounced across all frequency bands for vessels > 250 m. The relation with ship speed was concentrated at low frequencies <100 Hz, and more prominent at all frequencies for large ships >250 m. Models explained 77%-88% of the variance of the observed SL. The most comprehensive model (Equation 12) explains 79,8% of the observed variance. The most effective model is the one developed for ships over 250m and including speed (Equation 14), which explains 88% of the variance. The model for ships over 100 m

(Equation 13) explains 77% of the variance. Simard et al also attempted to simplify his models by removing the least significant terms and still explaining more than 75% of the variance. Simard et al acknowledge that the models developed may be specific to a portion of the fleet operating in the St. Lawrence Seaway and the Great Lakes. However, what makes the model robustness is its accurate representation of the current merchant fleet navigating the main shipping route of Eastern Canada. That said, the applicability of these models to other fleets or geographic regions remains uncertain.

ECHO model (MacGillivray *et al.*, 2022)

MacGillivray et al. developed a model as part of the ECHO Program that considers the combined effects of both design and operational parameters. Built upon a dataset of 9880 measurements from commercial vessels, the model applies functional regression analysis to evaluate and quantify the influence of parameters such as vessel speed, and vessel actual draft, which were identified as the primary determinants of URN. Unlike the models presented earlier, MacGillivray's approach allows the β coefficients (i.e the effects of each predictor) to vary with frequency, whereas Ross assumed the same variation across the entire spectrum. Data were collected from opportunistic vessels transiting to and from the Port of Vancouver. These measurements represent vessels using shipping lanes to this port. The model also accounts for a wide frequency range, spanning 10 Hz to 63 000 Hz, providing a comprehensive framework for noise prediction. Functional regression analysis, an extension of standard regression, was used to model the dependencies of noise emissions. A total of nine predictor variables were selected for the final statistical model, encompassing both operational and design parameters:

$$y_i(f) = \alpha(f) + \begin{pmatrix} \log_{10}\left(\frac{d}{1\ \mathrm{m}}\right) \\ \log_{10}\left(\frac{v}{1\mathrm{kn}}\right) \\ \frac{K_w}{1\ \mathrm{m}^2\ \mathrm{s}^{-2}} \\ \frac{\varphi}{1^\circ} \\ \log_{10}\left(\frac{L}{1\ \mathrm{m}}\right) \\ \log_{10}\left(\frac{n}{1\mathrm{RPM}}\right) \\ \log_{10}\left(\frac{P}{1\ \mathrm{kW}}\right) \\ \frac{\log_{10}\left(\frac{v_0}{1\mathrm{kn}}\right) a}{1\mathrm{yr}} \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} \beta_d(f) \\ \beta_v(f) \\ \beta_{K_n}(f) \\ \beta_\varphi(f) \\ \beta_L(f) \\ \beta_n(f) \\ \beta_P(f) \\ \beta_{v_0}(f) \\ \beta_a(f) \end{pmatrix} + \varepsilon_i(f) \qquad (13)$$

where $y_i(f)$ was the estimated MSL (L_S) for measurement i, and the predictors included in the model were: Actual draft (d, m), STW (v, kn), wind resistance ($K_{w,}$ $\mathrm{m}^2\ \mathrm{s}^{-2}$), surface grazing angle ($\varphi, °$), length overall (L, m), nominal main engine revolutions per minute (n/RPM), total main engine power (P, kW), design speed (v_0, kn) and vessel age (a, y).

The vessels analyzed were grouped into six main commercial categories: bulk and general cargo ships, container ships, cruise ships, tankers, tugs, and vehicle carriers. Among the design parameters, vessel length showed the strongest correlation with underwater radiated noise across the three main ship categories (bulk carriers, container ships, and tankers). Nominal engine RPM, total engine power, design speed, and vessel age showed weaker correlations but were still statistically significant in relation to source levels.

The model revealed that depending on frequency range and vessel categories, certain parameters are positively correlated with the level of underwater noise radiation. In particular, STW (>1000 Hz), draft (100 Hz), and vessel length (for bulkers and tankers, <100

Hz) are generally associated with higher noise levels. The vessel age also shows a positive correlation in some frequency bands. Other parameters, such as wind resistance, have a more marginal influence. The model explained 25%-50% of the variability in the ECHO dataset depending on frequency band and vessel category. The average RMSE across vessel categories and frequency bands was 5.1 dB.

While prior studies have provided valuable frameworks for estimating URN, we replicate McGillivray's method, applied on the St. Lawrence fleet. Aiming to validate the pertinence and develop a model specific to the St. Lawrence fleet.

1.3 MATERIALS AND METHODS

1.3.1 Data collection

The study is based on an acoustic database consisting of 398 signatures collected between 2021 and 2023 by the MARS station during the passage of vessel partners in accordance with an optimized navigation protocol (Mercure-Boissonnault *et al.*, 2023). Acoustic signatures used in this study are expressed as Monopole Source Level (MSL) measurements collected from a single antenna at a time. It refers to the noise level measured at 1 meter from the source ($dB\ re\ 1\ \mu Pa^2\ @\ 1\ m$) and have been evaluated over third-octave bands, computed from 10 to 500 Hz. The static and dynamic parameters of each vessel were extracted from the AIS data streams collected by the dedicated receiving antenna. The speed through water of each vessel (Speed Through Water, STW) is estimated from the speed over ground (Speed Over Ground, SOG) and the surface current (speed and direction) provided by the PMZA-RIKI buoy.

1.3.1.1 MARS Acoustic Station configuration

The monitoring station is located in the St. Lawrence Estuary, off Rimouski in the province of Quebec. It records the acoustic signatures of partner vessels transiting through the St. Lawrence shipping channel lane.

It consists of four moorings (E1, E2, W1, and W2) positioned along the upbound navigation path. Each mooring includes a surface buoy and a vertical array of three acoustic recorders coupled (Aurals M3 made by Multi-Electronics, MTE) with hydrophones (GeoSpectrum) placed at various depths 80 m, 173 m, and 300 m, corresponding to depression angles of 15°, 30°, and 45°, respectively (Figure 11). These configurations adhere to the recommended specifications for vessel acoustic signature measurements, in accordance with ANSI/ASA S12.64-2009 and ISO 17208-1 standards (ANSI/ASA, 2009). The surface buoy is equipped with solar panels that provide power, enable real-time data transfer and storage, and control the acoustic recorders.

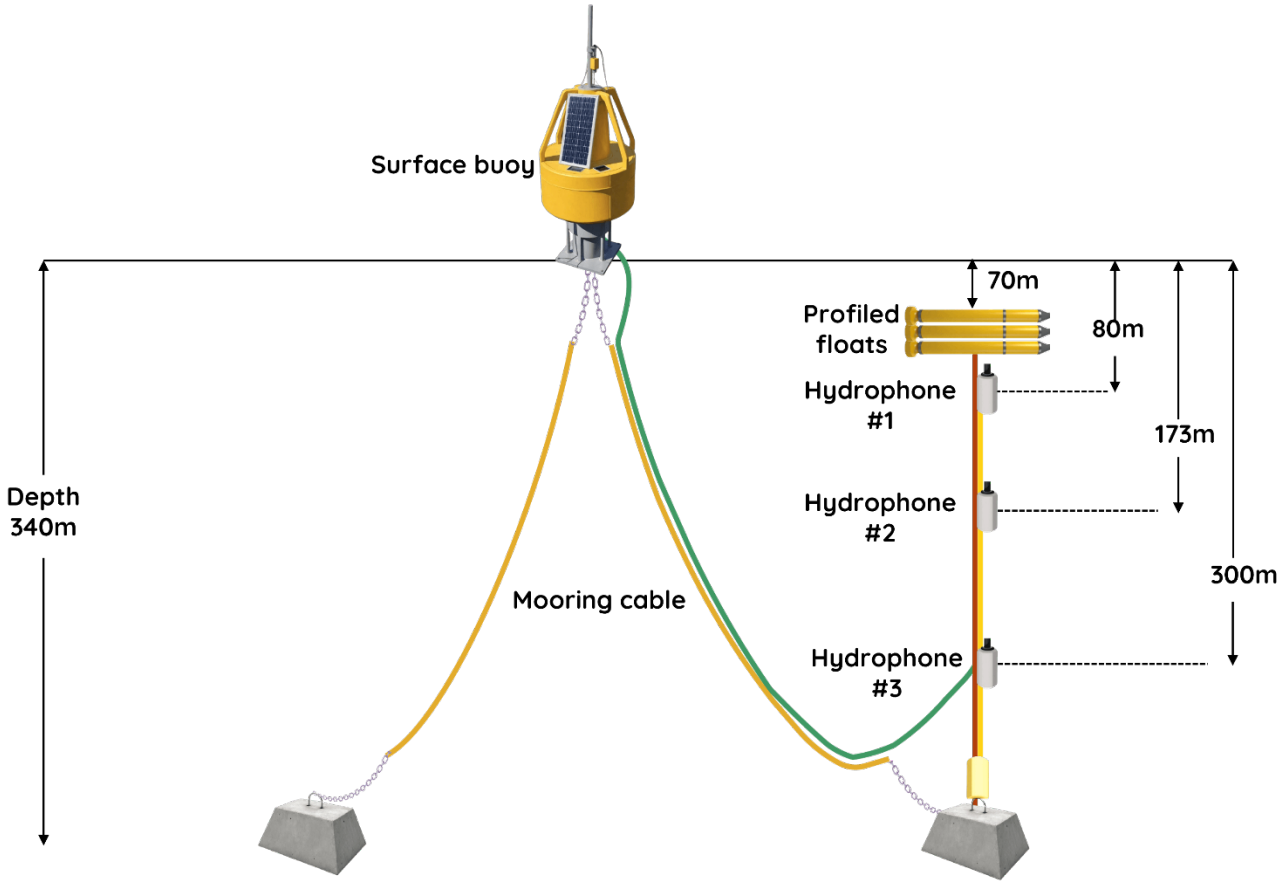


Figure 11. MARS Station mooring configuration

The moorings were strategically positioned to enable two sets of measurements, one on each side (port and starboard), while minimizing vessel trajectory deviation approximately 1.2 km in 2021 and 0.4 km in 2022 (Figure 12). This setup enables the production of acoustic signatures without the necessity of making several time-consuming passes in front of a single array, as recommended by the standards. The E1 and E2 moorings are dedicated to port-side measurements, while the W1 and W2 moorings are used for starboard measurements. The E1-E2 and W1-W2 arrays are spaced eight kilometers apart.

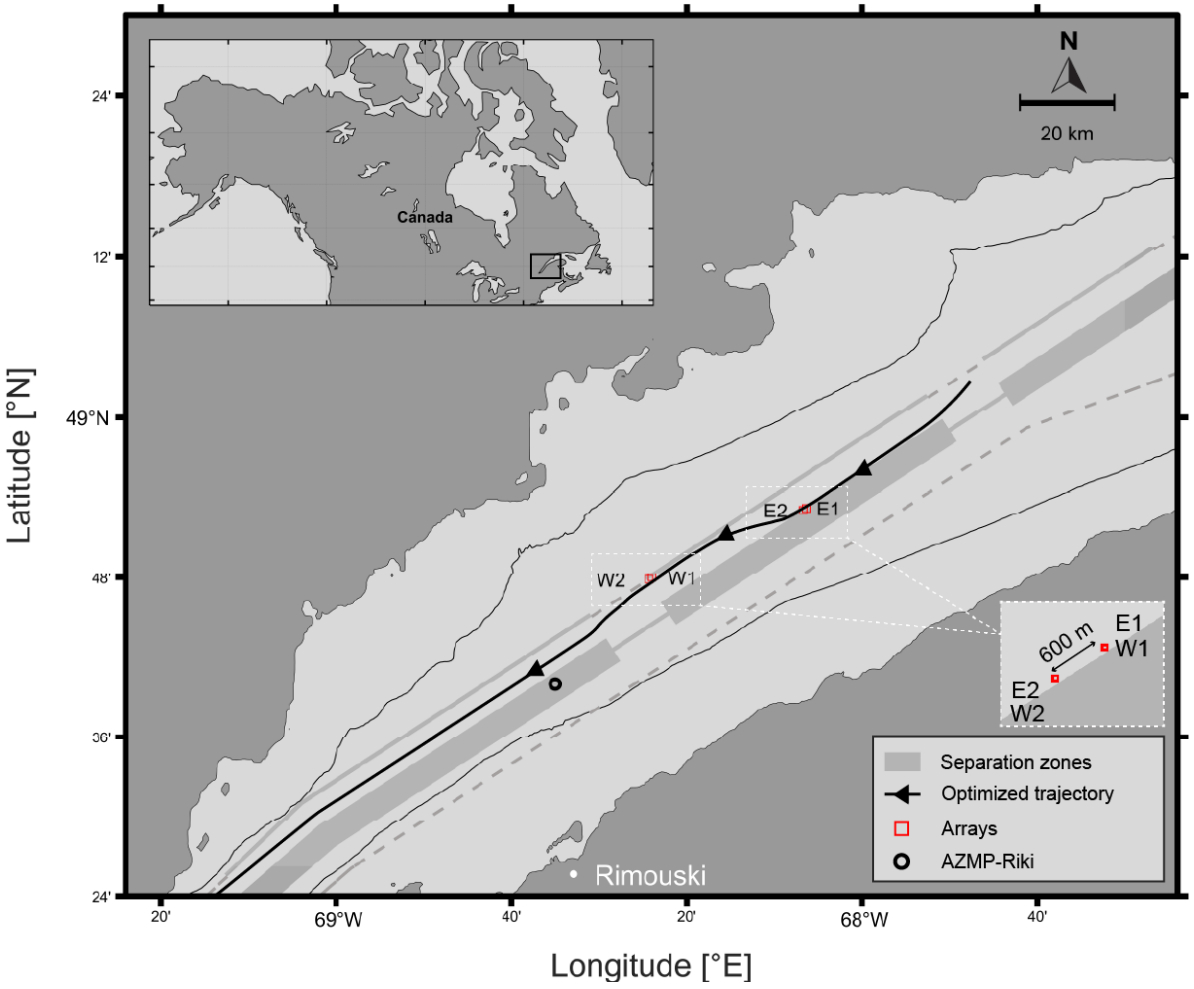


Figure 12. Measurement site with optimized trajectory of partner vessels and navigation routes. The points E1 and E2 delineate the area for port signature measurement, while W1 and W2 define the area for starboard signature measurement.

1.3.1.2 Optimized protocol measurement

The optimized protocol distributed to participating ship operators ensures the accurate measurement of acoustic signatures by providing detailed guidelines for transiting through the MARS acoustic station. It allows vessels to consistently navigate designated measurement areas, maximizing the quality of acoustic data while ensuring the safe and efficient operation of maritime traffic. This protocol involves a structured sequence of maneuvers :

- The vessel begins by adjusting its course to maintain a straight-line trajectory at a constant speed between predefined alignment points, strictly adhering to navigational regulations throughout the entire process.

- Two acoustic signatures are recorded on both the port and starboard sides during designated transit segments (300 m from antenna), with careful attention paid to maintaining stable navigation conditions. This focus on consistent speed and heading is crucial for the reliability of the measurements. The collection of four successive measurements in a single pass allows the MARS station to provide an acoustic signature measurement in accordance with international standards (ANSI/ASA, 2009).

Once the required acoustic signatures are collected, the vessel resumes its normal route.

1.3.1.3 Acoustic signatures production

They are generated through an automatic production system developed within the MARS project (Mercure-Boissonnault et al., 2023).

Distance to Closest Point of Approach (CPA)

To calculate the distance to CPA, AIS geographical positions (latitude and longitude) were transformed into X-Y coordinates in kilometers using an equirectangular projection, suitable for the small spatial scale of this study. Although not the optimal projection, it remains an area of improvement for future research. Using these coordinates, the distance between the antenna and the vessel was calculated at each time point, allowing for the identification of the closest approach.

Transmission Loss (TL)

TL calculations were performed once, annually, for each array. Mean Conductivity-Temperature-Depth (CTD) profile from the AZMP-RIKI buoy were converted into sound speed profiles using the GSW toolbox. Sediments geo-acoustic parameters and bedrock were based on Simard (2016). Bathymetric data from the Canadian Hydrographic Service (CHS) were interpolated beneath the arrays to obtain the water depth, to which mean tidal variations were added. Wavenumber integration model SCOOTER, was used to generate a propagation loss matrix (in dB), as a function of horizontal distance and depth between the source (vessel, 5 m depth) and each receiver (hydrophones, which are equipped with an integrated pressure sensor that enables depth determination).

Acoustic data processing

The MSLs were calculated following the Grade A processing method of ANSI/ASA S12.64-2009 (ANSI/ASA, 2009). Measurements are taken within a ±30° window around the CPA. The SL is obtained by correcting for TL. The final SL value is calculated as the power average of the SL measured by the three hydrophones. They are expressed in d $dB\ re\ 1\ \mu Pa^2\ @\ 1\ m$, on third-octave levels ranging from 10 to 500 Hz.

1.3.1.4 Vessel static and dynamic parameters

To develop a robust model for predicting URN, we based our selection of predictor variables on two key criteria: their demonstrated influence in the literature and their systematic availability across vessels through AIS. They are categorized into two groups: static parameters and dynamic parameters:

- **Static parameters** represent unchanging characteristics of a vessel, determined by its design and construction. These remain constant throughout a ship's transit, irrespective of operational conditions. For this study, the static parameters are the length overall (LOA) and vessel age, both available through Automatic Identification System (AIS) data.
- **Dynamic parameters**, in contrast, describe a vessel's operating conditions and loading. These parameters are speed through water (STW) and actual vessel draft. STW was calculated by combining speed over ground (SOG), obtained from AIS data, with surface current speed and direction measured by the AZMP-RIKI oceanographic buoy during each ship's transit.

Table 2. Input parameters considered by the models reviewed in the literature.

Model	Ross	W&H	McKenna et al.	Wittekind	Simard et al.	ECHO
Length	√		√	√	√	√
Age			√			√
STW	√		√	√	√	√
Draft			√	√	√	√

1.3.2 Dataset overview

This study analyzed a total of 398 transits from four distinct vessel types: bulk carriers, tankers, container ships, and general cargo vessels. Bulk carriers made up the largest proportion, contributing 41% of the observed fleet. Tankers and container ships contributed 21% and 20% of the transits, respectively, while general cargo vessels made up the smallest group, comprising 18% of the fleet. Given the significant representation of bulk carriers in the dataset, the subsequent analysis primarily focuses on this vessel category, providing detailed insights into their static and dynamic parameters and contribution to URN.

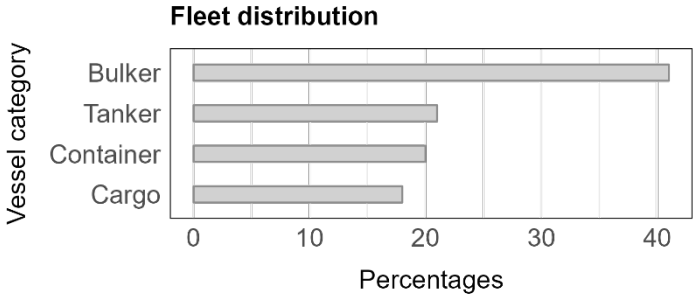


Figure 13. Fleet composition of principal vessel types observed in the study. The horizontal bar chart displays the percentage distribution of four vessel categories.

Box-and-whisker plots summarize the distribution of static and dynamic parameters for bulkers (Figure 16). The values observed show that STW varies overall between 8.9 knots and 14.8 knots. 25% of ships have an STW value of ± 11.2 knots. STW has a median value of 12 knots. 75% of ships have an STW of less than 13 knots. Observed LOA values extend from about 137 m up to 229 m. 25% of ships have a length of less than 186 m. The median LOA is 200 m. 75% of ships measure less than 225 m. Vessel draft values range from 5 m to 14 m. 25% of ships have a draft of less than 8 m, and the median value is 9 m. 75% of ships exhibit a draft not exceeding 11 m. The age of the ships in the sample ranges from 0 to 23

years. 25% of ships are 6 years old or younger, the median age is 10 years, and 75% of ships are 17 years old or younger. Outliers correspond to ships aged between 42 and 44 years, representing approximately 4.9% of the fleet.

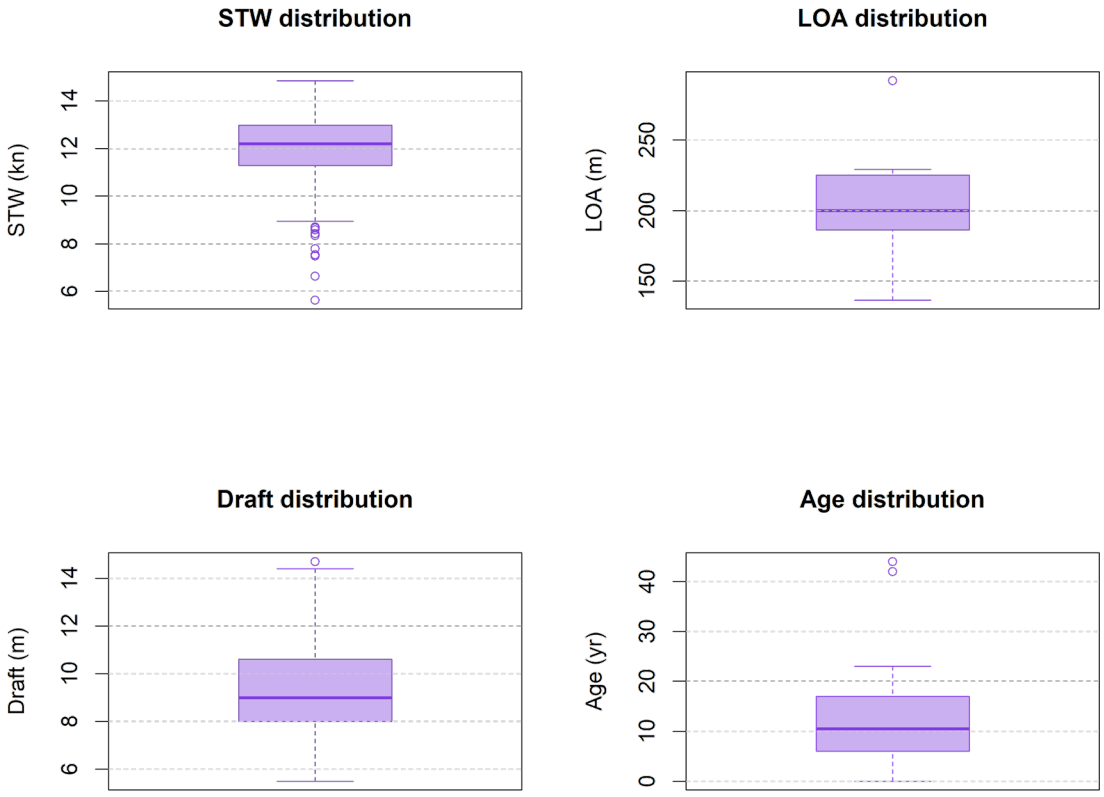


Figure 14. Box-and-whisker plots summarizing statistics of bulkers

Based on standardized measurements collected under controlled navigation conditions, Figure 17 displays the distribution of the MSL spectra of bulkers vessels, plotted across a range of frequencies from 10 Hz to 500 Hz. The average MSL spectrum reveals a broad hump, with a maximum level of 172.3 dB occurring around 50 Hz. This hump spans a wide frequency range, extending approximately from 30 to 100 Hz. These observations are consistent with those reported for the fleet studied by MacGillivray et al. (2022). Above 100

Hz, the MSL decreases steadily with increasing frequency, while the percentile bands narrow. A slight local increase is nevertheless observed around 200 Hz. Beyond ~220 Hz, the MSL remains relatively uniform, with a total variation of approximately 1.5 dB.

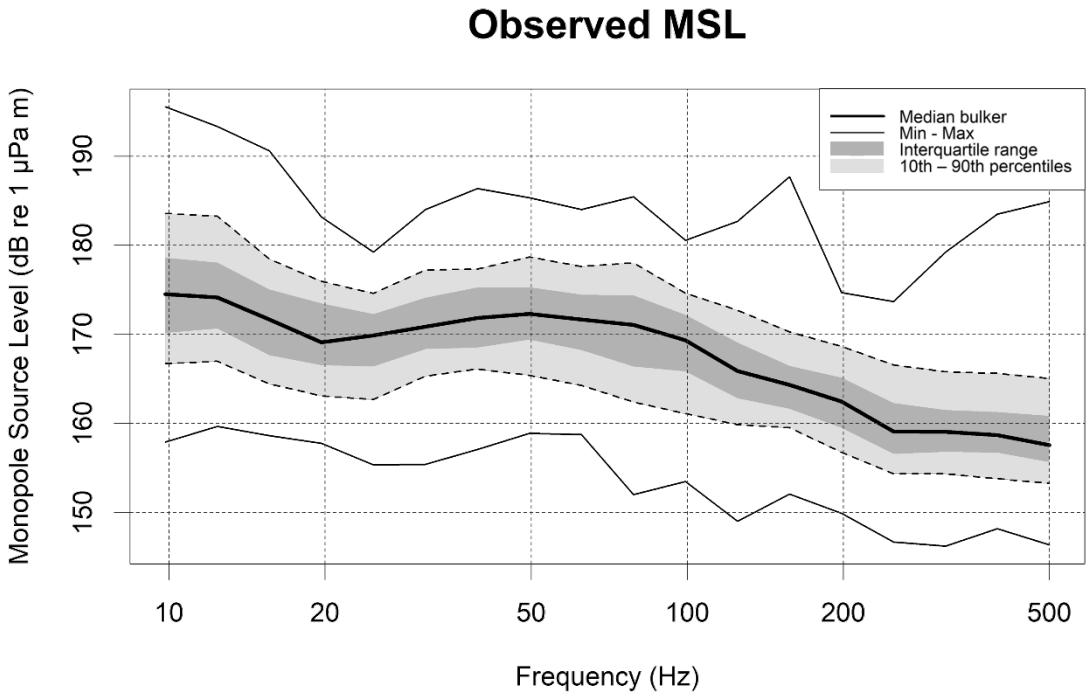


Figure 15. Observed MSL as a function of frequency for bulkers. The solid black line represents the median spectrum.

The dark shaded area indicates the interquartile range (25th -75th percentiles), while the lighter shaded area corresponds to the 10th -90th percentile range. Thin black lines show the minimum and maximum observed spectra.

1.3.3 Functional regression model

Functional data analysis, introduced by Ramsay and Silverman (2005), is a statistical technique for analyzing curve or profile characteristics. It allows simultaneous estimation of regression coefficients for each predictor variable, indicating the frequencies most correlated with the predictor and the direction of the relationship across all frequencies.

Our model, based on functional regression with multiple covariates, translates to:

$$y_i(\mathrm{f}) = \alpha(f) + \begin{pmatrix} \log_{10}\left({}^{v_i}/_{1kn}\right) \\ \log_{10}\left({}^{d_i}/_{1m}\right) \\ \log_{10}\left({}^{L_i}/_{1m}\right) \\ {}^{a_i}/_{1yr} \end{pmatrix}^{T} \begin{pmatrix} \beta_v(f) \\ \beta_l(f) \\ \beta_d(f) \\ \beta_a(f) \end{pmatrix} + \varepsilon_i(f) \qquad (14)$$

where:

- $y_i(\mathrm{f})$ is the SL measured for each transit i,
- $\alpha(f)$ the intercept,
- $\varepsilon_i(f)$ the model error for each transit i,
- $\beta_v(f), \beta_l(f), \beta_d(f), \beta_a(f)$ are the regression coefficients functions for each of the following predictors: v_i (STW), l_i(LOA), d_i (vessel actual draft), and a_i (age of the vessel).

The regression coefficient functions, $\beta(f)$, describe the relationship between underwater radiated noise (URN) and the vessel design and operating parameters, across the 10 – 500 Hz frequency range. Positive values of $\beta(f)$ indicate a positive correlation, meaning that an increase in the predictor leads to higher sound levels. In contrast, negative values of

$\beta(f)$ represent a negative correlation, where an increase in the predictor results in lower sound levels.

The functional regression model was implemented using the **fda** package in R (Ramsay *et al.*, 2009 ; Ramsay, 2025). The intercept function $\alpha(f)$ represents the baseline source level as a function of frequency, under the condition where all predictors are at their reference values: v_i=1 kn, l_i=1m, d_i=1m, and a_i=1yr. The intercept was estimated as part of the functional regression model using the **fRegress** function in the fda package in R.

The functional coefficients $\beta(f)$ were estimated using the functional regression method implemented in the **fRegress** function from the fda package. This approach allows for modeling the specific contribution of each explanatory variable to the acoustic spectra as a function of frequency. The standard errors associated with the estimated coefficients were calculated using the **fRegress.stderr** function to assess the uncertainty of the estimates. Confidence intervals at 95% were calculated using the standard errors obtained with the **fRegress.stderr** function. Plots of the coefficients, along with their confidence intervals, were generated using the **plotbeta** function to visually illustrate the relationships and their variations across frequencies.

When the confidence intervals intersect the zero line, the correlation is not statistically significant. To further clarify the interpretation of the regression functions, predicted source level plots were generated (Figure 20.b; 21.b; 22.b; 23.b). They illustrate the impact of a variation of each individual predictor on source levels of the median vessel. For each predictor, we used the variation range observed on the whole fleet (minimum, 25th percentile, median, 75th percentile, and maximum), while all other predictors are held constant at their median values. This approach isolates the effect of each predictor, making it easier to understand its specific influence on sound levels.

1.3.4 Model evaluation metrics

The performance of the model was assessed by analyzing the residuals $e_i(f)$, which represent the differences between the observed source levels and the predicted values at each frequency f. Residuals quantify the variability in the data that is not explained by the model:

$$e_i(f) = y_i(f) - [\alpha(f) + \mathbf{x}_i^{\top}\beta(f)] \tag{15}$$

Calculation of RMSE

The root mean square error (RMSE) was calculated to quantify the prediction error in decibels. The RMSE is given by :

$$\mathrm{RMSE}(f) = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} e_i(f)^2} \tag{16}$$

where N is the total number of observations provides a frequency-dependent estimate of the average prediction error in decibels. A lower RMSE indicates a better fit of the model to the data.

Calculation of R^2

The coefficient of determination (R^2) was used to evaluate the proportion of variance in the observed data explained by the model. It was computed as :

$$R^2(f) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N} e_i(f)^2}{\sum_{i=1}^{N} [y_i(f) - \bar{y}(f)]^2} \tag{17}$$

where $\bar{y}(f)$ is the mean of the observed source levels at frequency f. A R^2 value close to 1 indicates a high level of agreement between the predicted and observed values, suggesting the model effectively captures the relationship between the predictors and the source levels.

1.4 RESULTS

1.4.1 Model performance across frequencies

RMSE is highest at frequencies below 15 Hz, with a maximum at 10 Hz, and the point where it reaches its maximum is at 10 Hz, with a measured value of 6.3 dB. This corresponds to the frequency range in which the model exhibits the greatest mean deviation between predicted and observed values. For frequencies above 15 Hz, the RMSE curve displays a relatively uniform profile, maintaining an average value close to 4.2 dB throughout the range. The observed deviations from this mean are minimal (Figure 16).

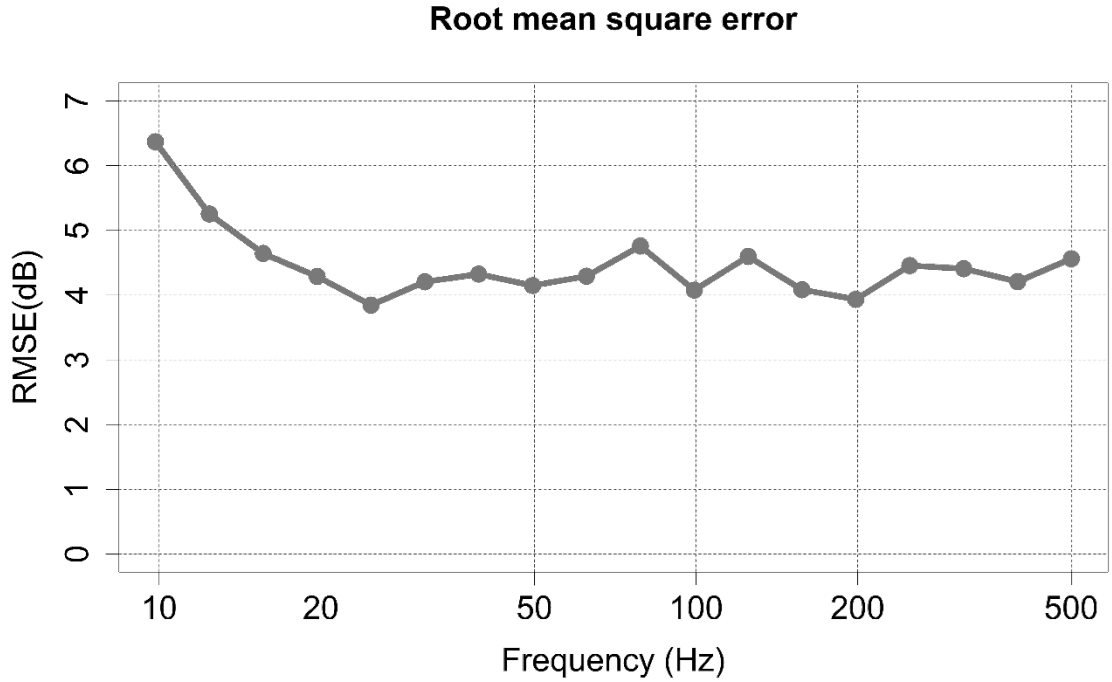


Figure 16. RMSE across frequencies for bulkers.

The coefficient of determination (R^2) shows a mean value of 0.56 across the frequency range examined. The lowest recorded value is 0.30 at 125 Hz, while the highest values, up to 0.8, are found at frequencies above 200 Hz. Between 20 Hz and 120 Hz, as well as below 20 Hz, the values are predominantly concentrated around the mean value of approximately 0.50. Overall, depending on the frequency band, the model accounts for between 30% and 80% of the variability observed in the noise level measurements (Figure 17).

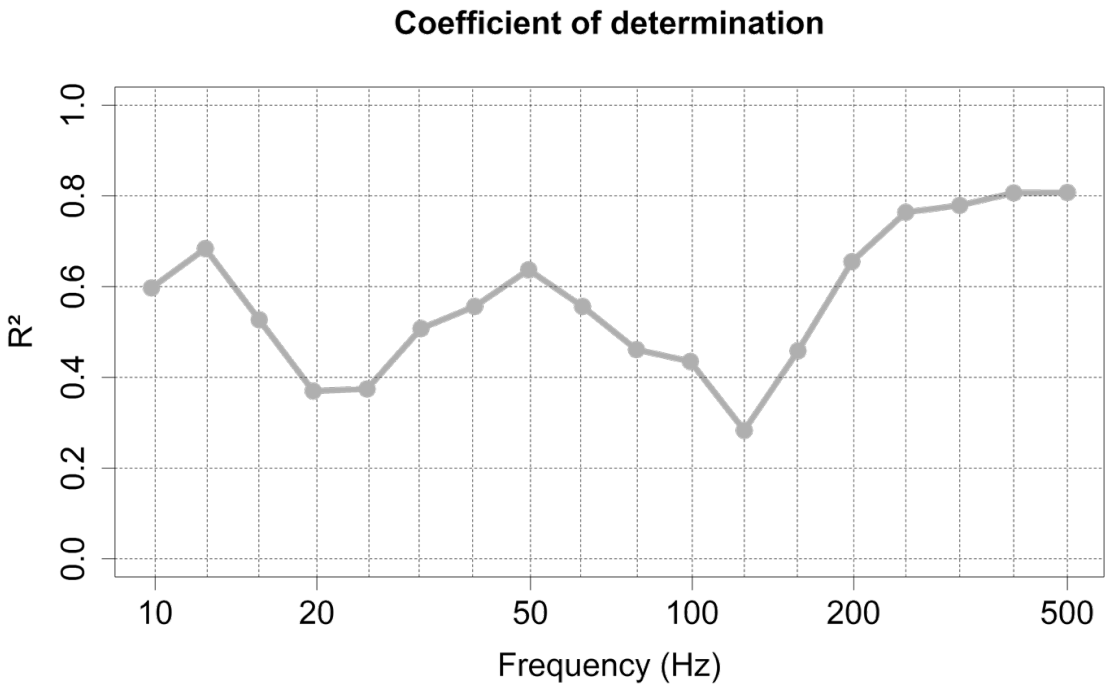


Figure 17. The coefficient of determination (R^2) of the MARS model.

1.4.2 Functional regression results

Plots (a) in this section show the regression coefficient functions, $\beta(f)$ versus frequency for each predictor variable. The solid line represents the estimated regression coefficient function for each predictor variable with respect to frequency. The shaded area delineated by dashed lines represents the 95% confidence interval of the estimated regression function. Positive values of $\beta(f)$ indicate that increasing the predictor is associated with higher source levels, whereas negative values indicate that increasing the predictor is associated with lower source levels.

Plots (b) show the influence of individual predictors on source levels ($dB\ re\ 1\ \mu Pa\ m$) of the median vessel. The purple curve represents the median MSL, which does not correspond to any specific ship in dataset. It corresponds to a theoretical vessel defined using the median values of each fleet characteristic: STW = 12kn, LOA = 200m, draft = 9m and age = 10 yr. The other curves represent deviations, which are derived by varying the predictor values at the minimum, 25th percentile, 75th percentile, and maximum levels. Each curve is color-coded to correspond to its associated predictor value.

Speed Through Water (STW)

The coefficient $\beta_v(f)$ associated with speed through water is positive across the whole spectrum for bulkers, indicating that increased STW is associated with increased SL. The STW effect is concentrated below and above 100 Hz, where significant variations were observed (Figure 20.a). The source level increases by 12 dB when STW doubles. Its influence diminishes at 100 Hz resulting in a smaller increase of 6 dB when STW doubles (Figure 18.a). The influence of STW is significant across the frequency bands, with greater uncertainty below 20 Hz.

The source level distribution for the median vessel over 11 and 15 knots observed in our dataset shows a spread of 4 dB below 100 Hz dB and 2 dB at higher frequencies. (Figure 18.b).

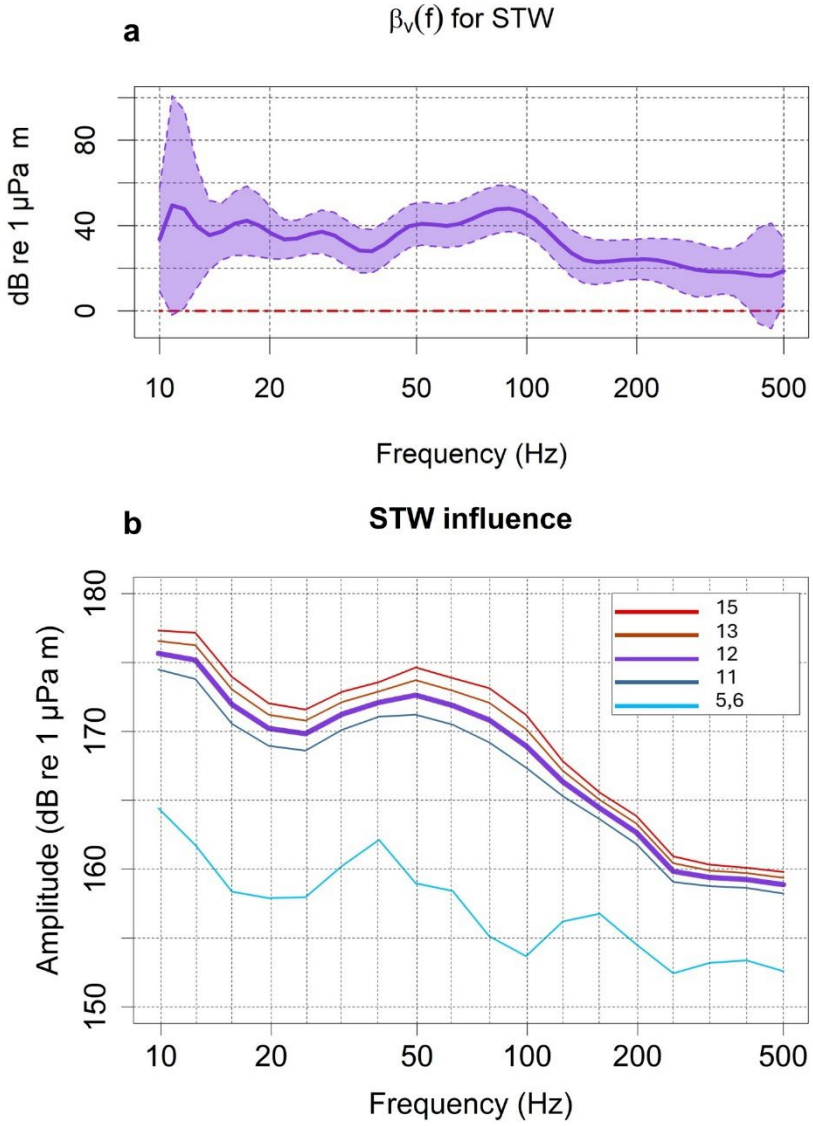


Figure 18. Model results for STW
(a) The regression coefficient function, β(f), versus frequency for STW
(b) The functional regression model predictions for bulkers.

Vessel length (Length overall, LOA)

The coefficient $\beta_l(f)$ associated with length is positive between 30 and 50 Hz, indicating that larger vessels are associated to higher source level at these frequencies, while it is negative at 15 Hz, suggesting that larger vessels may lead to reduced SL at this frequency. The relationship between vessel length and URN is not statistically significant across the rest of the spectrum. A maximum influence is observed at 40 Hz, which decreases towards 50 Hz. A difference of 4 dB is expected between ships measuring 185 m and 292 m (LOA+50%) (Figure 19.b). Figure 19.a demonstrates a dynamic range of 5 dB in significant frequency ranges.

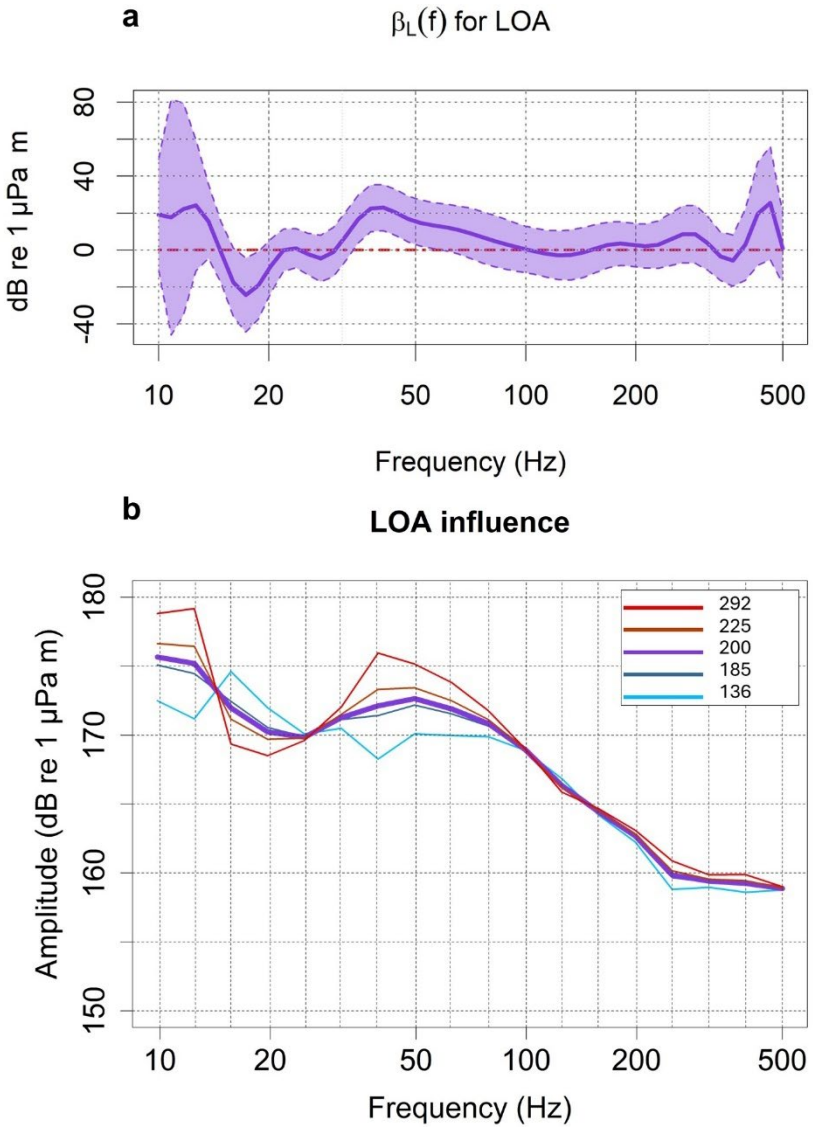


Figure 19. Model results for LOA
(a) The regression coefficient function, β(f), versus frequency for LOA
(b) The functional regression model predictions for bulkers.

Vessel actual draft

The coefficient $\beta_d(f)$ is positive around 15 Hz and between 80 and 130 Hz, indicating that an increase in the vessel's actual draft corresponds to a rise in URN (Figure 20.a). However, its effect is uncertain elsewhere. For most frequencies between 10 and 500 Hz, the confidence interval for draft does intersect the zero line, meaning the model cannot reliably predict whether an increase in draft will increase or decrease noise at those frequencies. Figure 20.b visually confirms that an increase in draft corresponds to higher sound levels, but primarily in specific frequency bands: around 15 Hz and between 80 and 130 Hz. In these ranges, the curves for higher drafts (11 m and 15 m) sit clearly above the curves for shallower drafts. Outside of these specific windows, the curves converge and overlap significantly. This reflects the statistical uncertainty shown in Figure 20.a

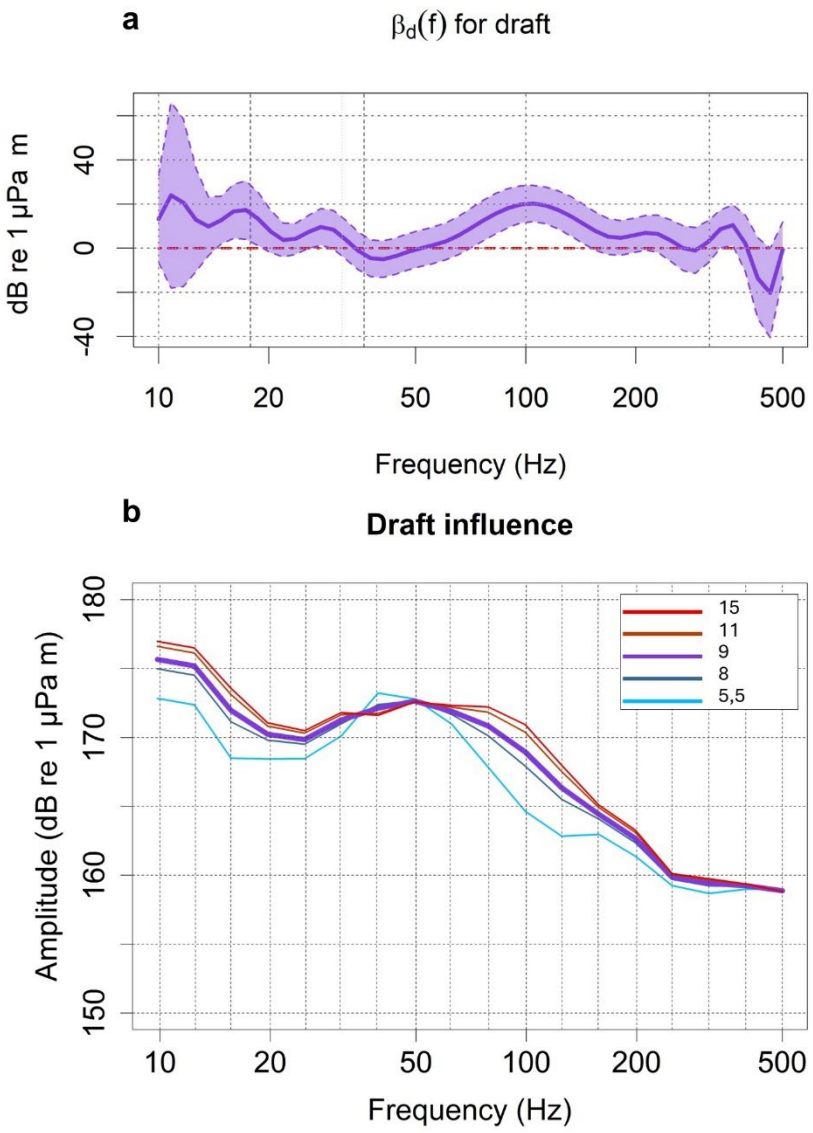


Figure 20. Model results for vessel draft
(a) The regression coefficient function, β(f), versus frequency for vessel draft
(b) The functional regression model predictions for bulkers.

Vessel age

$\beta_a(f)$ is positive beyond 30 Hz, indicating that URN increases with vessel age. For instance, after 10 years, the noise level of the same vessel is projected to rise by only 2 dB. Below 30 Hz, there is uncertainty regarding the strength of the relationship between age and noise level, particularly as the confidence interval encompasses zero (Figure 21.a). Although, as observed in Figure 21.b, we can expect less variation in noise levels with an increase in age below 50 Hz.

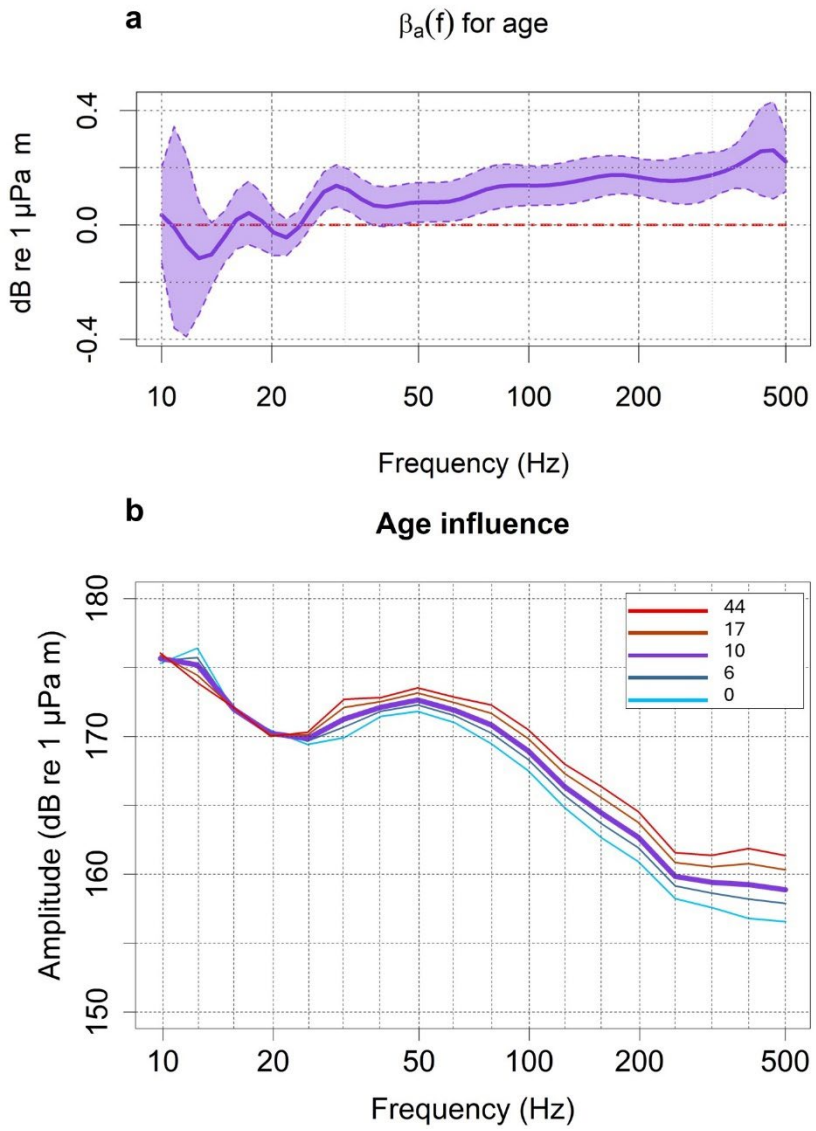


Figure 21. Model results for vessel age
(a) The regression coefficient function, β(f), versus frequency for vessel age
(b) The functional regression model predictions for bulkers.

1.5 DISCUSSION

1.5.1 Insights into model accuracy and limitations

Overall model performance

The results of model performance analysis indicate that the model explains a significant proportion of the variance (between 30% and 80%) in observed SL, with an average R^2 of 0.56 and a maximum of 0.8 above 200 Hz. A comparison with the results reported by MacGillivray (2022) for bulkers using a similar methodological approach shows that the present model achieves a higher R^2. This highlights the performance gains made possible by the collection of high-quality signatures, which was made possible through the optimized protocol measurement. The RMSE values obtained by the MARS model fall within the range of residual errors typically reported in the literature between 3-8 dB (Wales et Heitmeyer, 2002 ; Wittekind, 2014 ; MacGillivray *et al.*, 2022). At 10 Hz, the RMSE reaches its highest value of 6.37 dB. The performance of URN prediction models, as well as the influence of predictors in URN varies considerably depending on the methodology used and the specificity of the datasets.

1.5.2 Operational approaches and transport optimization

Vessel speed:

Our results clearly demonstrate that an increase in STW corresponds to a rise in noise levels, while a decrease in speed leads to a reduction in noise. This aligns with prior studies suggesting that speed regulation is an effective measure to reduce ship source levels (Ross, 1976 ; Wales et Heitmeyer, 2002 ; McKenna *et al.*, 2013 ; Wittekind, 2014 ; Simard *et al.*, 2016 ; MacGillivray *et al.*, 2022). Additionally, our findings indicate that speed has the greatest influence in low-frequency bands. The effect of speed appears stronger at low frequencies ($<$100 Hz, $\beta = 40$) than at higher frequencies ($>$150 Hz, $\beta = 20$). Nevertheless, although speed reduction can help lower URN, it is essential to maintain sufficient speeds to

ensure safety, energy efficiency, and transport effectiveness (IMO, 2023). Below a certain speed threshold, operating conditions for the propeller can become suboptimal, leading to increased cavitation and higher source levels. Therefore, finding and maintaining an appropriate speed above this threshold is crucial to balance noise reduction with operational performance(IMO, 2021).

Vessel actual draft:

The influence of actual vessel draft on URN is complex, leading to varying results across different models in the literature. It is generally recognized as one of the two most influential operational parameters alongside speed. This positive relationship is attributed to a deeper draft increasing hydrodynamic drag, requiring more engine power, and potentially intensifying vibrations and noise (MacGillivray *et al.*, 2022). Conversely, the MARS model for bulk carriers in the Saint-Lawrence Seaway only found a positive and significant correlation in specific low-frequency bands: around 15 Hz and between 80 and 130 Hz. However, the results of McKenna et al. (2013), focusing on container ships, presented a major counterpoint, as they did not observe a significant influence of draft in any of their predictive models. Adding alternative metrics might provide a more reliable estimation of propeller depth, as this information was not included in our dataset. Moreover, expanding the frequency range of our study would be beneficial, as the strongest influence of vessel actual draft has been observed at higher frequencies (>1000 Hz) (Simard *et al.*, 2016 ; MacGillivray *et al.*, 2022).

Building on these observations, understanding how to optimize a vessel's draft for reduced noise emissions without compromising efficiency is crucial. Adjustments to a ship's trim and draft offer potential for mitigating propeller cavitation noise, as optimizing these parameters can reduce the required power and, consequently, the noise associated with cavitation (IMO, 2023) However, it is important to consider that reducing the draft often necessitates adjustments to the ship’s loading (Catarino, 2021), which might require additional voyages to maintain cargo capacity. This could result in less efficient transport.

1.5.3 Design approaches and underwater noise reduction

Vessel LOA:

Even though prior studies, such as Ross (1976) and MacGillivray et al (2022), have demonstrated that vessel length is an important factor influencing noise levels, often due to the relationship between hull size, propulsion dynamics, and noise propagation, MARS model did not capture this effect. Simard et al. notes that LOA influences URN, but this influence is more clearly observable when analyzed in conjunction with vessel speed or other correlated parameters. They report that the increase in SL at frequencies below 200 Hz is associated with large ships sailing at high speeds (Simard *et al.*, 2016).

Vessel Age: maintenance

Our findings suggest that vessel age has a positive influence on underwater radiated noise (URN) at frequencies above 30 Hz. This observation aligns partially with results from MacGillivray et al. (MacGillivray *et al.*, 2022), who acknowledged that while vessel age demonstrated statistical significance, its influence was generally weaker compared to other predictors such as speed through water (STW), vessel draft, and vessel length. McKenna et al. (2013) found that vessel age has a significant covariate only in the 31.5 Hz octave band model. In this low-frequency band, the models predicted that older ships produced more noise than newer vessels. In fact, there are two issues behind the question of vessel age: aging equipment and technological modernization. This can be explained by the fact that vessel age represents an indirect variable, with its effects being primarily reflected through factors such as the deterioration of hydrodynamic performance, the deterioration of mechanical components, the increase in hull surface roughness, and the evolution of onboard technologies. In its guidelines, the IMO (2023) emphasizes that inadequate vessel maintenance can significantly increase noise emissions. In particular, marine biofouling on the propeller promotes cavitation, while blade damage, such as nicks or erosion, can generate pronounced tonal noise. In addition, hull surface roughness increases hydrodynamic resistance, thereby increasing the propeller load and further intensifying cavitation-related

noise. To mitigate these effects, the IMO recommends regular cleaning and maintenance of both the hull and propeller to reduce noise transmission through the hull.

1.6 CONCLUSION

The objective of this thesis was to characterize and model the underwater noise radiated by ships based on their static characteristics and operating conditions, in the specific context of the St. Lawrence. The study is based on a robust acoustic database consisting of 398 monopole source level (MSL) signatures collected between 2021 and 2023 by the MARS acoustic station, using an optimized measurement protocol that complies with international standards (ANSI/ASA S12.64-2009). These acoustic data were coupled with static and dynamic parameters from AIS systems, including vessel length overall LOA, vessel age, speed through water STW, and vessel actual draft.

The methodology is based on the use of functional regression, an advanced statistical approach that models noise levels as continuous functions of frequency in the 10 to 500 Hz band. This method makes it possible to simultaneously evaluate the influence of each explanatory parameter and identify the frequency bands where their contribution is significant. The model's performance was evaluated using standard metrics, including root mean square error (RMSE) and coefficient of determination (R^2). The RMSE remains relatively stable across most of the frequency range, with an average value of approximately 4-5 dB, which is consistent with, and in some cases lower than, values reported in the literature. The higher errors observed at very low frequencies highlight opportunities for future research, including the integration of additional explanatory variables that were not publicly available in the present study, such as detailed engine characteristics and propeller design parameters. Incorporating such information could improve the representation of low-frequency noise generation mechanisms and further enhance model performance.

The results indicate that speed through water STW is the dominant factor influencing underwater radiated noise, particularly at low frequencies. The effects of vessel length overall LOA, actual draft, and age are more frequency-dependent and localized. Overall, the model explains between 30% and 80% of the observed variability, depending on the frequency band, with predictive performance comparable to existing models, while being specifically tailored to the St. Lawrence fleet.

A key strength of this work lies in the use of high-quality acoustic signatures acquired under controlled and standardized conditions. The optimized measurement protocol and repeated port-starboard recordings significantly reduced measurement uncertainty and background noise contamination, thereby improving the signal-to-noise ratio and the reliability of the regression estimates. This high data quality directly contributes to the model's predictive performance and enhances confidence in the identified relationships between vessel parameters and underwater radiated noise.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le bruit rayonné sous-marin d'origine anthropique constitue aujourd'hui une pression environnementale majeure sur les écosystèmes marins. Parmi les sources de ce bruit, le transport maritime occupe une place prépondérante en raison de l'augmentation continue du trafic mondial et de la persistance des émissions acoustiques associées aux navires commerciaux. Dans des régions fortement fréquentées comme le Saint-Laurent, où les enjeux économiques, écologiques et sociétaux se superposent, la compréhension et la gestion du bruit sous-marin représentent un défi scientifique et opérationnel de premier ordre.

L'objectif central de ce mémoire était de caractériser et de quantifier l'influence des paramètres des navires sur le bruit sous-marin rayonné, en développant un modèle prédictif spécifiquement adapté à la flotte du Saint-Laurent. Les signatures acoustiques, exprimées en MSL sur la bande de fréquences 10-500 Hz, ont été couplées à des paramètres statiques et dynamiques issus des données AIS, incluant la vitesse du navire, sa longueur, son âge et son tirant d'eau réel.

Le modèle développé explique entre 30% et 80% de la variabilité observée du bruit rayonné, selon la fréquence considérée (Figure 17). La performance du modèle est attestée par une RMSE d'environ 4 à 5 dB, maintenue sur la majeure partie du spectre (Figure 16). La vitesse du navire ressort clairement comme le paramètre dominant influençant le bruit rayonné sous-marin sur l'ensemble de la bande fréquentielle analysée. Les coefficients de régression associés à la vitesse sont positifs sur toutes les fréquences, indiquant qu'une augmentation de la vitesse est associée à une augmentation du niveau de bruit, en accord avec les observations rapportées dans la littérature (Figure 18). Les effets de la longueur du navire, du tirant d'eau réel et de l'âge sont plus localisés et dépendent de la fréquence (Figure 19, 20, 21).

Cette étude contribue de manière significative à la compréhension et à la quantification du bruit rayonné par les navires traversant l'estuaire du Saint-Laurent. L'apport fondamental réside dans le développement d'un modèle prédictif robuste, spécifiquement calibré pour la flotte transitant dans cette région stratégique, offrant ainsi un outil scientifique pour éclairer les solutions pour la réduction du bruit à la source. En identifiant les paramètres influençant les niveaux de source du bruit rayonné, cette recherche fournit une première base pour l'élaboration de stratégies de gestion du trafic maritime visant à protéger les espèces sensibles et à réduire la pollution sonore. Sur le plan méthodologique, la force de ce travail repose sur l'exploitation de 398 signatures acoustiques de haute qualité, acquises selon un protocole de mesure standardisé et optimisé. Ce protocole, reposant sur des trajectoires contrôlées et des mesures répétées, a permis de réduire significativement les incertitudes liées aux conditions de navigation et au bruit ambiant (Figure 12). Par ailleurs, l'application de la régression fonctionnelle, permet de traiter les niveaux de bruit non plus comme des données isolées, mais comme des fonctions continues de la fréquence (Ramsay et Silverman, 2005).

Malgré ses performances, le modèle présente certaines limites, notamment aux très basses fréquences (<15 Hz), où les erreurs sont plus élevées (6,3 dB) (Figure 16). Les résultats de ce mémoire ouvrent plusieurs perspectives pour les recherches futures. L'étude est également restreinte par l'indisponibilité de données techniques précises non diffusées par le système AIS public, telles que les caractéristiques détaillées des moteurs ou le design des hélices, qui jouent un rôle crucial dans les mécanismes de génération sonore, notamment pour la cavitation. Cela permettrait d'améliorer la représentation des mécanismes de génération du bruit, en particulier aux basses fréquences. L'extension de la gamme fréquentielle analysée au-delà de 500 Hz offrirait également une vision plus complète des contributions des paramètres dynamiques et statiques du navire. Une autre limite de cette étude réside dans la période relativement courte couverte par les données utilisées pour développer le modèle. Bien que les mesures recueillies entre 2021 et 2023 permettent de caractériser les principales tendances de la flotte étudiée, elles ne capturent pas pleinement la variabilité temporelle du bruit rayonné, notamment pour évaluer la corrélation entre le bruit et les changements dans les conditions d'exploitation ainsi que l'évolution progressive

des caractéristiques des navires. Les opérations de maintenance et les modifications techniques des navires étant généralement réalisées sur des cycles de plusieurs années, il est essentiel de maintenir un suivi pérenne des signatures acoustiques. Cette continuité permettrait d'acquérir plus de données, de suivre l'évolution du bruit rayonné, de quantifier les effets des interventions réalisées sur les navires et d'améliorer progressivement le calibrage et la validation des modèles prédictifs. La collaboration étroite avec les armateurs est indispensable pour obtenir ces données non disponibles dans l'AIS public.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Ainslie, M. (2010). *Principles of Sonar Performance Modelling*. Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-87662-5

André, M., Solé, M., Lenoir, M., Durfort, M., Quero, C., Mas, A., Lombarte, A., van der Schaar, M., López-Bejar, M., Morell, M., Zaugg, S. et Houégnigan, L. (2011). Low-frequency sounds induce acoustic trauma in cephalopods. *Frontiers in Ecology and the Environment*, *9*(9), 489-493. https://doi.org/10.1890/100124

Andrew, R. K., Howe, B. M. et Mercer, J. A. (2011). Long-time trends in ship traffic noise for four sites off the North American West Coast. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *129*(2), 642-651. https://doi.org/10.1121/1.3518770

Andrew, R. K., Howe, B. M., Mercer, J. A. et Dzieciuch, M. A. (2002). Ocean ambient sound: Comparing the 1960s with the 1990s for a receiver off the California coast. *Acoustic Research Letters Online*, *3*, 65-70. https://doi.org/10.1121/1.1461915

ANSI/ASA. (2009). *Quantities and Procedures for Description and Measurement of Underwater Sound from Ships - Part 1: General Requirements*. American National Standards Institute, New York.

Arveson, P. T. et Vendittis, D. J. (2000). Radiated noise characteristics of a modern cargo ship. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *107*(1), 118-129. https://doi.org/10.1121/1.428344

Audoly, C., Gaggero, T., Baudin, E., Folegot, T., Rizzuto, E., Salinas Mullor, R., Andre, M., Rousset, C. et Kellett, P. (2017). Mitigation of Underwater Radiated Noise Related to

Shipping and Its Impact on Marine Life: A Practical Approach Developed in the Scope of AQUO Project. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, *42*(2), 373-387. https://doi.org/10.1109/JOE.2017.2673938

Bejder, L., Samuels, A., Whitehead, H., Gles, N., Mann, J., Connor, R., Heithaus, M., Watson-Capps, J., Flaherty, C. et Krützen, M. (2006). Decline in Relative Abundance of Bottlenose Dolphins Exposed to Long-Term Disturbance. *Conservation Biology*, *20*(6), 1791-1798. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2006.00540.x

Blaxter, J. H. S., Gray, J. A. B. et Denton, E. J. (1981). Sound and Startle Responses in Herring Shoals. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, *61*(4), 851-869. https://doi.org/10.1017/S0025315400023006

Boebel, O., Bornemann, H., Breitzke, M., Burkhardt, E., Kindermann, L., Klinck, H., Plötz, J., Ruholl, C. et Schenke, H.-W. (2004). Risk assessment of ATLAS HYDROSWEEP DS-2 hydrographic deep sea multi-beam sweeping survey echo sounder.

Bracciali, C., Campobello, D., Giacoma, C. et Sarà, G. (2012). Effects of Nautical Traffic and Noise on Foraging Patterns of Mediterranean Damselfish (Chromis chromis). *PLoS ONE*, *7*(7), e40582. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0040582

Brandt, M., Diederichs, A., Betke, K. et Nehls, G. (2011). Responses of harbour porpoises to pile driving at the Horns Rev II offshore wind farm in the Danish North Sea. *Marine Ecology Progress Series*, *421*, 205-216. https://doi.org/10.3354/meps08888

Bruintjes, R. et Radford, A. N. (2013). Context-dependent impacts of anthropogenic noise on individual and social behaviour in a cooperatively breeding fish. *Animal Behaviour*, *85*(6), 1343-1349. https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2013.03.025

Buhaug, Ø., Corbett, J. J., Endresen, Ø., Eyring, V., Faber, J., Hanayama, S., Lee, D. S., Lee, D., Lindstad, H., Markowska, A. Z., Mjelde, A., Nelissen, D., Nilsen, J., Pålsson, C., Winebrake, J. J., Wu, W. et Yoshida, K. (2009, avril). *Second IMO GHG Study 2009*.

Cariou, P. (2020, 21 juillet). *Changing Demand for Maritime Trade, International Transport Forum Discussion Paper, No. 2020/05*. https://doi.org/10.1787/a7aa98d3-en

Carlton, J. S. (2012). *Marine Propellers and Propulsion*. Elsevier. https://doi.org/10.1016/C2010-0-68327-1

Catarino, G. R. (2021). DYNAMIC DRAFT AND UNDER KEEL CLEARANCE: A HYDROGRAPHIC VIEW. *The International Hydrographic Review, 26*.

Clark, C., Ellison, W., Southall, B., Hatch, L., Van Parijs, S., Frankel, A. et 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

COSEPAC. (2012). *Sommaire du statut de l'espèce du COSEPAC sur la Rorqual bleu (Balaenoptera musculus) au Canada*. *Comité sur la situation des espèces en péril au Canada. Ottawa. xii p.*

COSEPAC. (2013). *Évaluation et Rapport de situation du COSEPAC sur la baleine noire de l'Atlantique Nord (Eubalaena glacialis) au Canada*. *Comité sur la situation des espèces en péril au Canada. Ottawa. xi + 63 pp.*

COSEPAC. (2014). *Évaluation et Rapport de situation du COSEPAC sur le béluga (Delphinapterus leucas), population de l'estuaire du Saint-Laurent, au Canada*. *Comité sur la situation des espèces en péril au Canada. Ottawa. xiv + 73 p*.

COSEPAC. (2019). *Évaluation et Rapport de situation du COSEPAC sur le Rorqual commun (Balaenoptera physalus), population de l'Atlantique et population du Pacifique, au Canada 2019*.

COSEPAC. (2022). *Évaluation et Rapport de situation du COSEPAC Marsouin commun (Phocoena phocoena), population de l'Atlantique nord-ouest, au Canada. Comité sur la situation des espèces en péril au Canada. .*

Cox, K., Brennan, L. P., Gerwing, T. G., Dudas, S. E. et Juanes, F. (2018). Sound the alarm: A meta-analysis on the effect of aquatic noise on fish behavior and physiology. *Global Change Biology*, *24*(7), 3105-3116. https://doi.org/10.1111/gcb.14106

Cruz, E., Lloyd, T., Bosschers, J., Lafeber, F. H., Vinagre, P. et Vaz, G. (2021, mars). *SOUNDS: Status of underwater noise from shipping study on inventory of existing policy, research and impacts of continuous underwater noise in Europe*.

Duarte, C. M., Chapuis, L., Collin, S. P., Costa, D. P., Devassy, R. P., Eguiluz, V. M., Erbe, C., Gordon, T. A. C., Halpern, B. S., Harding, H. R., Havlik, M. N., Meekan, M., Merchant, N. D., Miksis-Olds, J. L., Parsons, M., Predragovic, M., Radford, A. N., Radford, C. A., Simpson, S. D., … Juanes, F. (2021). The soundscape of the Anthropocene ocean. *Science*, *371*(6529). https://doi.org/10.1126/science.aba4658

Dunlop, R. A., Cato, D. H. et Noad, M. J. (2008). Non-song acoustic communication in migrating humpback whales (*Megaptera novaeangliae*). *Marine Mammal Science*, *24*(3), 613-629. https://doi.org/10.1111/j.1748-7692.2008.00208.x

Dunlop, R. A., Noad, M. J., McCauley, R. D., Kniest, E., Paton, D. et Cato, D. H. (2015). The Behavioural Response of Humpback Whales (Megaptera novaeangliae) to a 20 Cubic Inch Air Gun. *Aquatic Mammals*, *41*(4), 412-433. https://doi.org/10.1578/AM.41.4.2015.412

Erbe, C., Duncan, A. et Vigness-Raposa, K. J. (2022). Introduction to Sound Propagation Under Water. Dans *Exploring Animal Behavior Through Sound: Volume 1* (p. 185-216). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-97540-1_6

Erbe, C., Marley, S. A., Schoeman, R. P., Smith, J. N., Trigg, L. E. et Embling, C. B. (2019, 11 octobre). *The Effects of Ship Noise on Marine Mammals—A Review*. *Frontiers in Marine Science*, *6*. Frontiers Media S.A. https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00606

Falcone, E. A., Schorr, G. S., Watwood, S. L., DeRuiter, S. L., Zerbini, A. N., Andrews, R. D., Morrissey, R. P. et Moretti, D. J. (2017). Diving behaviour of Cuvier's beaked

whales exposed to two types of military sonar. *Royal Society Open Science*, *4*(8), 170629. https://doi.org/10.1098/rsos.170629

Fernández, A., Edwards, J. F., Rodríguez, F., de los Monteros, A. E., Herráez, P., Castro, P., Jaber, J. R., Martín, V. et Arbelo, M. (2005). "Gas and Fat Embolic Syndrome" Involving a Mass Stranding of Beaked Whales (Family *Ziphiidae)* Exposed to Anthropogenic Sonar Signals. *Veterinary Pathology*, *42*(4), 446-457. https://doi.org/10.1354/vp.42-4-446

Fournier, M., Casey Hilliard, R., Rezaee, S. et Pelot, R. (2018). Past, present, and future of the satellite-based automatic identification system: areas of applications (2004–2016). *WMU Journal of Maritime Affairs*, *17*(3), 311-345. https://doi.org/10.1007/S13437-018-0151-6

Francis, C. D., Ortega, C. P. et Cruz, A. (2009). Noise Pollution Changes Avian Communities and Species Interactions. *Current Biology*, *19*(16), 1415-1419. https://doi.org/10.1016/j.cub.2009.06.052

Frisk, G. V. (2012). Noiseonomics: The relationship between ambient noise levels in the sea and global economic trends. *Scientific Reports*, *2*(1), 437. https://doi.org/10.1038/srep00437

Gilliam, L. (2023). Shipping and the Ocean. Dans *The Ocean and Us* (p. 123-135). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-10812-9_12

Goldbogen, J. A., Southall, B. L., DeRuiter, S. L., Calambokidis, J., Friedlaender, A. S., Hazen, E. L., Falcone, E. A., Schorr, G. S., Douglas, A., Moretti, D. J., Kyburg, C., McKenna, M. F. et Tyack, P. L. (2013). Blue whales respond to simulated mid-frequency military sonar. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, *280*(1765), 20130657. https://doi.org/10.1098/rspb.2013.0657

Han, H. S., Lee, C. N., Jeon, S. H., Lee, K. H. et Park, S. H. (2018). Development of an evaluation method to determine cavitation inception speed with aft hull vibration using

kurtosis of the DEMON spectrum. *Ocean Engineering*, *152*, 167-180. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.01.075

Hawkins, A. D. et Popper, A. N. (2017). A sound approach to assessing the impact of underwater noise on marine fishes and invertebrates. *ICES Journal of Marine Science*, *74*(3), 635-651. https://doi.org/10.1093/icesjms/fsw205

Hildebrand, J. A. (2005). Impacts of anthropogenic. *Marine mammal research: conservation beyond crisis*, 101-124.

Hildebrand, 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

Hiley, H., Janik, V. et Götz, T. (2021). Behavioural reactions of harbour porpoises Phocoena phocoena to startle-eliciting stimuli: movement responses and practical applications. *Marine Ecology Progress Series*, *672*, 223-241. https://doi.org/10.3354/meps13757

IMAR et SODES. (2024). *État du transport maritime au Québec 2023*. https://www.innovationmaritime.ca/wp-content/uploads/sites/288/2025/03/IMAR-ETM23-WEB_2.pdf

IMAR et SODES. (2025). *État du transport maritime au Québec 2024*. https://www.innovationmaritime.ca/wp-content/uploads/sites/288/2025/02/20250212-IMAR-ETM24-Spreads-Web.pdf

IMO. (2021). *Guidelines for determining minimum propulsion power to maintain the manoeuvrability of ships in adverse conditions (MEPC.1/Circ.850/Rev.3)*.

IMO. (2023, 22 août). *Revised guidelines for the reduction of underwater radiated noise from shipping to address adverse impacts on marine life (MEPC.1/Circ.906)*.

Jalkanen, J.-P., Johansson, L., Andersson, M. H., Majamäki, E. et Sigray, P. (2022). Underwater noise emissions from ships during 2014–2020. *Environmental Pollution*, *311*, 119766. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119766

Johansson, K. (2011). *Impact of anthropogenic noise on fish behaviour and ecology*.

Kaplan, M. B. et Solomon, S. (2016). A coming boom in commercial shipping? The potential for rapid growth of noise from commercial ships by 2030. *Marine Policy*, *73*, 119-121. https://doi.org/10.1016/j.marpol.2016.07.024

LEP. *Loi sur les espèces en péril (L.C. 2002, ch. 29)*. https://laws-lois.justice.gc.ca/fra/lois/s-15.3/page-1.html

LRMM. *Loi sur la responsabilité en matière maritime, (L.C. 2001, ch. 6)*. https://laws-lois.justice.gc.ca/fra/loisAnnuelles/2001_6/

Lun, Y. H. V., Lai, K., Cheng, T. C. E. et Yang, D. (2023). *Shipping and Logistics Management*. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-26090-2

Lurton, Xavier. (1998). *Acoustique sous-marine : présentation et applications*. IFREMER.

Lurton, Xavier. (2002). *An Introduction to Underwater Acoustics: Principles and Applications* (2e éd.).

Lusseau, D. et Bejder, L. (2007). The Long-term Consequences of Short-term Responses to Disturbance Experiences from Whalewatching Impact Assessment. *International Journal of Comparative Psychology*, *20*(2). https://doi.org/10.46867/IJCP.2007.20.02.04

MacGillivray, A. O., Ainsworth, L. M., Zhao, J., Dolman, J. N., Hannay, D. E., Frouin-Mouy, H., Trounce, K. B. et White, D. A. (2022). A functional regression analysis of vessel source level measurements from the Enhancing Cetacean Habitat and Observation (ECHO) database. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *152*(3), 1547-1563. https://doi.org/10.1121/10.0013747

Marage, J. P. et Mori, Y. (2013). *Sonar and Underwater Acoustics*. Wiley. https://books.google.ca/books?id=TNcAxWoAf9kC

McCarthy, Elena. (2004). *International Regulation of Underwater Sound*. Kluwer Academic Publishers. https://doi.org/10.1007/b118284

McCauley, R. D., Fewtrell, J. et Popper, A. N. (2003). High intensity anthropogenic sound damages fish ears. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *113*(1), 638-642. https://doi.org/10.1121/1.1527962

McIntyre, D., Lee, W., Frouin-Mouy, H., Hannay, D. et Oshkai, P. (2021). Influence of propellers and operating conditions on underwater radiated noise from coastal ferry vessels. *Ocean Engineering*, *232*(September 2020). https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109075

McKenna, M. F., Ross, D., Wiggins, S. M. et Hildebrand, J. A. (2012). Underwater radiated noise from modern commercial ships. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *131*(1), 92-103. https://doi.org/10.1121/1.3664100

McKenna, M. F., Wiggins, S. M. et Hildebrand, J. A. (2013). Relationship between container ship underwater noise levels and ship design, operational and oceanographic conditions. *Scientific Reports*, *3*. https://doi.org/10.1038/SREP01760

Mercure-Boissonnault, P., Cauchy, P., Rabetoandro, F. F., Gervaise, C., St-Onge, G., Mérindol, J., de la Bathie, C. P., Catineau, H. et Lafrance, S. (2023). The Mars Database – Source Levels Measured for the Fleet Navigating the St. Lawrence Estuary. *Canadian Acoustics - Acoustique Canadienne*, *51*(3), 236-237.

Miksis-Olds, J. L. et Nichols, S. M. (2016). Is low frequency ocean sound increasing globally? *The Journal of the Acoustical Society of America*, *139*(1), 501-511. https://doi.org/10.1121/1.4938237

Miller, C., Reeb, D., Best, P., Knowlton, A., Brown, M. et Moore, M. (2011). Blubber thickness in right whales Eubalaena glacialis and Eubalaena australis related with reproduction, life history status and prey abundance. *Marine Ecology Progress Series*, *438*, 267-283. https://doi.org/10.3354/meps09174

MPL. (2015). *Methods for Quantifying Mid-Frequency Active Sonar in the SOCAL Range Complex*.

Nichols, T. A., Anderson, T. W. et Širović, A. (2015). Intermittent Noise Induces Physiological Stress in a Coastal Marine Fish. *PLOS ONE*, *10*(9), e0139157. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0139157

OMI. (2014, 7 avril). *Directives visant à réduire le bruit sous-marin produit par les navires de commerce pour atténuer leurs incidences néfastes sur la faune marine*. *MEPC.1/Circ.833*.

OMI. (2024, 15 novembre). *Directives révisées visant à réduire le bruit rayonné sous l'eau par les navires pour atténuer ses incidences néfastes sur la vie marine*. *MEPC.1/Circ.906/Rev.1*.

Palmer, M. T. (2010). Regulating Ocean Noise: A Non-traditional Threat to Maritime Security. *Maritime Affairs:Journal of the National Maritime Foundation of India*, *5*(2), 86-112. https://doi.org/10.1080/09733150903569349

Popper, A. N. et Hastings, M. C. (2009). The effects of anthropogenic sources of sound on fishes. *Journal of Fish Biology*, *75*(3), 455-489. https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2009.02319.x

Possenti, L., de Nooijer, L., de Jong, C., Lam, F.-P., Beelen, S., Bosschers, J., van Terwisga, T., Stigter, R. et Reichart, G.-J. (2024). The present and future contribution of ships to the underwater soundscape. *Frontiers in Marine Science*, *11*. https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1252901

Rako-Gospić, N. et Picciulin, M. (2019). Underwater Noise: Sources and Effects on Marine Life. Dans *World Seas: An Environmental Evaluation* (p. 367-389). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805052-1.00023-1

Ramsay, J. (2025, 21 mai). *fda: Functional Data Analysis*. *CRAN: Contributed Packages*. https://doi.org/10.32614/CRAN.package.fda

Ramsay, J., Hooker, G. et Graves, S. (2009). *Functional Data Analysis with R and MATLAB*. Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-0-387-98185-7

Ramsay, J. O. et Silverman, B. W. (2005). *Functional Data Analysis*. Springer New York. https://doi.org/10.1007/b98888

Richardson, W. John., Greene, J. C. R. ., Malme, C. I. . et Thomson, D. H. . (1995). *Marine Mammals and Noise*. Elsevier Science.

Rolland, R. M., Parks, S. E., Hunt, K. E., Castellote, M., Corkeron, P. J., Nowacek, D. P., Wasser, S. K. et Kraus, S. D. (2012). Evidence that ship noise increases stress in right whales. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, *279*(1737), 2363-2368. https://doi.org/10.1098/RSPB.2011.2429

Ross, D. (1976). *Mechanics of Underwater Noise*. Pergamon Press Inc, Oxford, UK.

Ross, D. (2005). Ship Sources of Ambient Noise. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, *30*(2), 257-261. https://doi.org/10.1109/JOE.2005.850879

Sakai, M., Haga, R., Tsuchiya, T., Akamatsu, T. et Umeda, N. (2023). Statistical analysis of measured underwater radiated noise from merchant ships using ship operational and design parameters. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *154*(2), 1095-1105. https://doi.org/10.1121/10.0020668

Sardain, A., Sardain, E. et Leung, B. (2019). Global forecasts of shipping traffic and biological invasions to 2050. *Nature Sustainability*, *2*(4), 274-282. https://doi.org/10.1038/s41893-019-0245-y

Simard, Y., Roy, N., Gervaise, C. et 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

Simmons, A. Megela., Popper, A. N. . et Fay, R. R. . (2002). *Acoustic Communication {Springer Handbook of Auditory Research ; V. 16}*. Springer-Verlag New York Inc.

Simpson, S. D., Radford, A. N., Nedelec, S. L., Ferrari, M. C. O., Chivers, D. P., McCormick, M. I. et Meekan, M. G. (2016). Anthropogenic noise increases fish mortality by predation. *Nature Communications*, *7*(1), 10544. https://doi.org/10.1038/ncomms10544

Sivle, L. D., Kvadsheim, P. H., Fahlman, A., Lam, F. P. A., Tyack, P. L. et Miller, P. J. O. (2012). Changes in dive behavior during naval sonar exposure in killer whales, long-finned pilot whales, and sperm whales. *Frontiers in Physiology*, *3*. https://doi.org/10.3389/fphys.2012.00400

Solé, M., Lenoir, M., Durfort, M., López-Bejar, M., Lombarte, A. et André, M. (2013). Ultrastructural Damage of Loligo vulgaris and Illex coindetii statocysts after Low Frequency Sound Exposure. *PLoS ONE*, *8*(10), e78825. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0078825

Stone, C. J. et Tasker, M. L. (2023). The effects of seismic airguns on cetaceans in UK waters. *J. Cetacean Res. Manage.*, *8*(3), 255-263. https://doi.org/10.47536/jcrm.v8i3.721

UNCTAD. (2023). *Review Of Maritime Transport 2022*. United Nations.

UNCTAD. (2024). *Review of Maritime Transport 2023*. United Nations.

Urick., R. J. (1983). *Principles of Underwater Sound*. (Peninsula Publishing, dir.). McGraw-Hill, New York.

Urick, R. J. . (1983). *Principles of underwater sound*. McGraw-Hill.

Vincent, W. F. et Dodson, J. J. (1999). The St. Lawrence River, Canada-USA: the Need for an Ecosystem-Level Understanding of Large Rivers. *Japanese Journal of Limnology (Rikusuigaku Zasshi)*, *60*(1), 29-50. https://doi.org/10.3739/rikusui.60.29

Wales, S. C. et Heitmeyer, R. M. (2002). An ensemble source spectra model for merchant ship-radiated noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *111*(3), 1211-1231. https://doi.org/10.1121/1.1427355

Wenz, G. M. (1962). Acoustic Ambient Noise in the Ocean: Spectra and Sources. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *34*(12), 1936-1956. https://doi.org/10.1121/1.1909155

Williams, R., Wright, A. J., Ashe, E., Blight, L. K., Bruintjes, R., Canessa, R., Clark, C. W., Cullis-Suzuki, S., Dakin, D. T., Erbe, C., Hammond, P. S., Merchant, N. D., O'Hara, P. D., Purser, J., Radford, A. N., Simpson, S. D., Thomas, L. et Wale, M. A. (2015). Impacts of anthropogenic noise on marine life: Publication patterns, new discoveries, and future directions in research and management. *Ocean & Coastal Management*, *115*, 17-24. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.05.021

Wittekind, D. K. (2014). A Simple Model for the Underwater Noise Source Level of Ships. *Journal of Ship Production and Design*, *30*(1), 7-14. https://doi.org/10.5957/JSPD.30.1.120052

Yan, X., Song, H., Peng, Z., Kong, H., Cheng, Y. et Han, L. (2021). Review of Research Results Concerning the Modelling of Shipping Noise. *Polish Maritime Research*, *28*(2), 102-115. https://doi.org/10.2478/pomr-2021-0027