



OPTIMISATION ET AMÉLIORATION DE LA MESURE DU BRUIT RAYONNÉ PAR LES NAVIRES

COMPRENDRE LA VARIABILITÉ DE LA MESURE DES SIGNATURES DE NAVIRES POUR DIFFÉRENTS CAS D'ÉTUDES

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en océanographie

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

PAR

© CECILE PERRIER DE LA BATHIE

Avril 2025

Composition du jury :

Cédric Chavanne, 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**

**Florent Le Courtois, examinateur externe, DGA TN (Direction Générale de
l'Armement Techniques Navales), France**

Dépôt initial le 16 décembre 2024

Dépôt final le 24 avril 2025

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 mon père Patrice

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je voudrais remercier chaleureusement mon directeur de recherche, Pierre Cauchy, pour sa confiance sur la réalisation de ce projet de maîtrise, de sa disponibilité et de son soutien tout au long de ces deux années. Je tiens également à remercier mon co-directeur de recherche, Guillaume St-Onge pour ses avis constructifs et pour sa rapide réactivité dans les corrections et commentaires des différents travaux. Je tiens à les remercier pour toutes les opportunités offertes, notamment les nombreuses participations aux conférences dans la région du Québec et à l'étranger. Ces contacts et échanges ont été très enrichissants scientifiquement, culturellement et humainement et seront pertinentes pour le futur.

J'aimerais également remercier Pierre Mercure-Boissonnault, agent de recherche de l'ISMER, travaillant sur le projet MARS, pour sa disponibilité à répondre à mes nombreuses questions techniques tout au long de mon projet et pour ses recommandations éclairées sur l'article.

Ensuite, j'aimerais remercier toute l'équipage du R/V Coriolis II pour toutes les expéditions réalisées nécessaires à ce projet de recherche. Aussi, j'aimerais remercier toutes les équipes et centre de recherches impliquée dans le projet MARS (Innovation Maritime IMAR, OpDAQ et Multi-Electronique (MTE)). J'aimerais aussi remercier Québec-Océan et l'Université du Québec à Rimouski (UQAR) pour avoir participé financièrement et permis de me rendre à des congrès à l'étranger.

Je souhaite également remercier mon papa et mes amies à Rimouski, Faniry, Annabelle, Jessie, Elisa et Maëla, qui ont été d'un énorme soutien pendant ces années de maîtrise.

AVANT-PROPOS

Ce projet de maîtrise sur l'optimisation et l'amélioration de la mesure du bruit rayonné par les navires s'insère dans le projet de Station de Recherche en Acoustique Marine (MARS) sous la direction de Pierre Cauchy et de Guillaume St-Onge de l'ISMER-UQAR. Le présent manuscrit est composé de trois parties : une introduction générale rédigée en français, présentant le contexte général de l'étude, l'objectif de recherche et la méthode. S'ensuit un chapitre principal rédigé en anglais sous la forme d'un article scientifique. Le titre de cet article est « *Optimizing and Improving the Measurement of Radiated Noise from Vessels* » et sera publié dans la revue The Journal of the Acoustical Society of America. En tant que premier auteur, j'ai joué un rôle central dans l'élaboration de la problématique et des objectifs de recherche, les traitements et analyses des données acoustiques. Le deuxième auteur, Guillaume St-Onge a apporté sa contribution à la formation de la problématique et des objectifs de recherche, ainsi qu'à la révision de l'article. L'agent de recherche à l'ISMER, Pierre Mercure-Boissonnault, en tant que troisième auteur, a contribué au traitement des données brutes acoustiques et à la révision de l'article. Enfin, Pierre Cauchy, quatrième auteur, a participé à l'élaboration de la problématique et des objectifs de recherche, à la structuration de la méthodologie, ainsi qu'à la révision de l'article. Pour finir, le mémoire présente une conclusion générale rédigée en français reprenant les principaux résultats obtenus et les limites et perspectives subséquentes.

Les travaux réalisés dans le cadre de cette maîtrise sont en cours de préparation pour une publication sous forme d'un article scientifique dans la revue The Journal of the Acoustical Society of America et sera révisé par les pairs. Par ailleurs, les principaux résultats ont été diffusés au cours des deux dernières années à travers des présentations orales et des affiches lors de congrès nationaux et internationaux, comme détaillé ci-dessous.

Publications – articles de conférence (2) :

C. Perrier de la Bathie, P. Cauchy, P. Mercure-Boissonnault, G. St-Onge et S. Lafrance, (2024). Can we be confident about vessel noise measurements? *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, 270(3), 8322–8331. https://doi.org/10.3397/IN_2024_4076

C. Perrier de la Bathie, P. Cauchy, P. Mercure-Boissonnault, G. St-Onge, C. Gervaise et S. Lafrance, The MARS database – Analysis of the variability of vessel acoustic signatures measured as a function of hydrophone configuration, *Canadian Acoustics*, 51 (3), 238–239

Présentations orales (2) :

C. Perrier de la Bathie, P. Cauchy, P. Mercure-Boissonnault, G. St-Onge et S. Lafrance, Can we be confident about vessel noise measurements? Internoise, Nantes, France, 25 – 29 août 2024.

C. Perrier de la Bathie, P. Cauchy, P. Mercure-Boissonnault, G. St-Onge, C. Gervaise et S. Lafrance, The MARS database – Analysis of the variability of vessel acoustic signatures measured as a function of hydrophone configuration, Semaine canadienne de l’acoustique, Montréal, QC, Canada, 3 – 6 octobre 2023.

Présentations par affiches (3) :

C. Perrier de la Bathie, P. Cauchy, G. St-Onge, P. Mercure-Boissonnault, C. Gervaise et S. Lafrance, Uncertainties in radiated vessel noise measurements as a function of measuring station configuration, Ocean Sciences Meeting 2024, Nouvelle Orléans, LA, Etats-Unis, 18 – 23 février 2024.

C. Perrier de la Bathie, P. Cauchy, G. St-Onge, P. Mercure-Boissonnault, C. Gervaise et S. Lafrance, Variability of Vessel Acoustic Signature Measurements, Réunion scientifique annuelle – Québec-Océan, Rivière-du-Loup, QC, Canada, 5 – 7 février 2024.

C. Perrier de la Bathie, P. Cauchy et G. St-Onge, Analyse de la variabilité des signatures acoustiques de navires mesurée en fonction de la configuration des hydrophones, Réunion scientifique annuelle – Québec Océan, Rivière-du-Loup, QC, Canada, 6 – 7 février 2023.

RÉSUMÉ

L'intensification du trafic maritime entraîne une hausse du bruit sous-marin. Des protocoles normalisés ont été publiés pour faciliter une mesure précise de cette source de bruit. Ils sont cependant souvent complexes à être mise en place dans des conditions opérationnelles réelles. Cela exige des compromis, notamment pour une infrastructure de mesure permanente. Un exemple est la station de recherche en acoustique marine MARS (<https://www.projet-mars.ca>), conçue pour mesurer une flotte importante sur une longue période. Les performances de mesure de la station MARS ont été évaluées à l'aide d'un ensemble de données regroupant 55 passages du navire de recherche R/V Coriolis II collectées par six triplets d'hydrophones distinctes que nous appellerons antennes par la suite au cours des été/automne 2022 et 2023.

Le chapitre principal du mémoire porte sur la quantification des incertitudes de mesure dans le cadre de trois scénarios représentant différentes configurations matérielles et protocoles de mesure. Chaque scénario répond à des cas d'étude spécifique, sur la maintenance ou non des antennes par la récupération et le déploiement, sur la mesure du bruit rayonné par les navires. Ils couvrent plusieurs qualités de niveau de mesure, allant du plus élevé défini par la norme pour des mesures sans maintenance mais également à une méthode simplifiée, adaptée aux mesures subissant une maintenance pour une grande flotte. La répétabilité est alors un outil idéal pour quantifier la limite de sensibilité de chacun des scénarios. Les données recueillies montrent tout d'abord que la répétabilité permet de connaître la limite de modification de bruit rayonné pouvant être détectée avec certitude par nos mesures. Ensuite, concernant les mesures avec maintenance, une précision de 3,3 dB a été démontrée. Enfin, l'optimisation sur des mesures sans maintenance peut se faire de deux manières : doubler les passages pour réduire l'incertitude à 2,1 dB, ou utiliser deux antennes successives pour atteindre une répétabilité de 0,8 dB. Cette dernière solution étant idéale pour les grandes flottes malgré des coûts de déploiement plus élevés.

Mots clés : Acoustique sous-marine, Navires, Bruit, Norme, Configuration, Hydrophone, Répétabilité, Optimisation, Saint-Laurent, Trafic maritime.

ABSTRACT

Increased maritime traffic is leading to more underwater noise. Standardized protocols have been issued, to facilitate accurate measurement from this source. They are however often challenging to implement in real-life operational conditions and require compromises, especially when aiming for a permanent measurement infrastructure that would provide measurements of a large fleet, over a long time, such as the station designed within the MARS (Marine Acoustic Research Station) project. Measurement performance of the MARS project station was assessed using a specific dataset of 55 underwater radiated noise measurements from R/V Coriolis II collected by six distinct hydrophone arrays during summer/fall 2022 and 2023.

The main chapter of the master's thesis deals with the quantification of measurement uncertainties in the context of three scenarios representing different hardware configurations and measurement protocols. Each scenario corresponds to a specific maintenance and no-maintenance case study in the measurement of radiated noise from vessels. They cover several measurement level qualities, from the highest defined by the standard for maintenance-free measurements to a simplified method, suitable for measurements undergoing maintenance for a large fleet. Repeatability is therefore an ideal tool for quantifying the sensitivity limit of each scenario. First, the data collected show that repeatability allows us to know the limit of radiated noise change that can be detected with certainty by our measurements. Secondly, for measurements with maintenance, an accuracy of 3.3 dB was demonstrated. Finally, there are two ways of optimizing maintenance-free measurements: double the passages to reduce uncertainty to 2.1 dB, or use two successive arrays to reach 0.8 dB, the latter being ideal for large fleets despite increased costs.

Keywords: Underwater acoustics, Vessels, Noise, Standard, Configuration, Hydrophone, Repeatability, Optimization, Saint-Laurent, Maritime Traffic.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	ix
AVANT-PROPOS.....	xi
RÉSUMÉ.....	xv
ABSTRACT.....	xvii
TABLE DES MATIÈRES.....	xix
LISTE DES TABLEAUX.....	xxi
LISTE DES FIGURES.....	xxii
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES.....	xxv
LISTE DES SYMBOLES.....	xxviii
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
1. CONTEXTE GENERAL.....	2
1.1 Ondes acoustiques.....	2
1.2 Acoustique sous-marine.....	2
1.3 Le son, un élément omniprésent dans les océans.....	6
1.4 Le transport maritime.....	7
1.5 L'estuaire du Saint-Laurent (ESL), une zone d'étude remarquable.....	13
1.6 Les réglementations.....	15
2. PROBLEMATIQUE.....	16
3. OBJECTIFS DE RECHERCHE ET METHODE UTILISEE.....	19
CHAPITRE 1 Optimisation et amélioration de la mesure du bruit rayonné par un navire.....	23
1.1 RESUME.....	23
1.2 OPTIMIZING AND IMPROVING THE MEASUREMENT OF RADIATED NOISE FROM VESSELS.....	25

1.3	INTRODUCTION.....	25
1.4	MATERIALS AND METHODS	27
1.4.1	Data collection	27
1.4.2	Acoustic data processing.....	34
1.4.3	Comparative analysis, measurement uncertainty.....	37
1.5	RESULTS.....	41
1.5.1	Scenario a: Unique and multiple arrays, single transit	41
1.5.2	Scenario b: Unique and multiple arrays, multiple transits.....	44
1.5.3	Scenario c: Single hydrophone	45
1.6	DISCUSSION.....	46
1.6.1	Repeatability	46
1.6.2	Recommendations for improved measurement quality and robustness.....	50
1.7	CONCLUSIONS	51
	CONCLUSION GÉNÉRALE	53
	ANNEXES	58
1.1	ANNEXE I	58
	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	60

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Les principales lignes directrices pour la mesure du bruit sous-marin selon trois Grades A, B et C.	18
Table 2 : Description of the Coriolis II propulsion, power supply, fuel and water capacities, as well as support equipment.....	32
Table 3. Description of R/V Coriolis II missions in front of the MARS station arrays. The name of the experiment, targeted arrays, number of transits, Speed Trough Water (STW) in knot, and distance (m) from the array are indicated.	34
Table 4. Repeatabilities observed for each dataset and scenario. The number of measurements used to calculate repeatability is in brackets (n). Scenario a: One transit = one measurement. Scenario b: Several transits = one measurement.	40
Table 5. Repeatability (in dB) for each hydrophone Bottom, Center and Top for the scenario c. The overall repeatability of each array is also mentioned.....	46
Table A I. Hydrophone sensitivity values at 100 Hz in 2022 and 2023. Values marked “None” correspond to arrays not studied in the present chapter.	58

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Modélisation du bruit ambiant selon Wenz : spectre et distribution des fréquences des différentes sources sonores sous-marines (reproduction de Miksis-Olds et al., 2013)	5
Figure 2. Croissance annuelle de la flotte mondiale de 1980 à 2023. L'histogramme présente le port en lourd de la flotte mondiale et la courbe exprime son taux de variation annuel en pourcentage (©UNCTAD, 2024).	10
Figure 3. Tendances des émissions sonores sous-marines dans les zones marines : le bleu foncé indique un doublement du bruit des navires en plus de 10 ans ou une diminution au fil du temps ; le jaune clair indique un doublement dans un délai de 7,5 à 10 ans ; le rouge clair indique un doublement dans un délai de 5 à 7,5 ans ; enfin le rouge foncé représente un doublement dans un délai de moins de 3 ans (©Jalkanen et al., 2022).	11
Figure 4. Carte de densité de trafic maritime par jour par km ² dans l'ESL et le golfe du Saint-Laurent et toute la côte Est du Canada. © Pêche et Océans Canada., 2019.	14
Figure 5. A. Localization of the Mars station in North America in the black square, and B. Zoom on the St. Lawrence Estuary with the black dot representing the west and east mooring locations. Instrumented buoy PMZA-RIKI collected environmental data (wind, currents, and hydrographic profiles). The source of the bathymetry data is from GEBCO Digital Atlas, https://www.gebco.net/	27
Figure 6. Hydrophone array configuration for grades A and B. The depths used in the MARS project, d1 = 80 m, d2 = 173 m and d3 = 300 m correspond to 15°, 30° and 45° angles from the sea surface for a distance at CPA of 300 m.	29
Figure 7. Run Standard's recommendation. The vessel follows a straight-line course, the starting point of the course being twice the Data Window Length before the CPA, same as the ending point.	30
Figure 8. Photo of research vessel R/V Coriolis II © Guillaume St-Onge, and B. Photo of an acoustic measurement array of MARS station deployed during the R/V Coriolis II mission in May 2023.	33

Figure 9. Spectrograms of three transits from the R/V Coriolis II measured by the W1 and W2 arrays in May 2022. The red box highlights the noticeably higher low-frequency noise measured by the Bottom W2 hydrophone.	35
Figure 10. Median of all transits at 10 knots and between 200 and 400 m in front of the 7 independent arrays. Measures for 2022 are dotted lines, while those for 2023 are solid lines.	42
Figure 11. Distribution of the absolute difference between W2 and W1 MSL spectra over the 10 runs and above the median. 75 th , 85 th and the 95 th percentiles are shown in dotted lines.	43
Figure 12. Median run of successive array in black and W subset in grey. The patches represents the repeatabilities of both subsets observed on each third-octave band.	44
Figure 13. Spectra calculated from three arrays on the oceanographic vessel R/V Coriolis II using Grade A (A.) and Grade B (B.) protocols.	45

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

AIS	Automatic Identification System (Système d'Identification automatique)
ANOVA	Analysis of variance (Analyse de la variance)
ANSI	American National Standards Institute (Institut national de normalisation américaine)
ASA	Acoustical Society of America (Société acoustique américaine)
CCG	Canadian Coast Guard (Garde côtière canadienne)
CPA	Closest Point of Approach (Point le plus proche)
DWL	Data Window Length (Fenêtre d'acquisition des données)
ESL	Estuaire du Saint-Laurent
GPS	Global Positioning System (Système Mondial de positionnement)
INS	Initiative pour des Navires Silencieux
ISMER	Institut des sciences de la mer
ISO	International Organization for Standardization (Organisation internationale de normalization)
LEP	Loi canadienne sur les Espèces en Péril
MARS	Marine Acoustic Research Station (Station de Recherche en Acoustique Marine)

MEPC	Marine Environment Protection Committee (Comité de la protection du milieu marin)
MSL	Monopole Source Level (Niveau de source monopole)
MTE	Multi-Electronique
OMI	Organisation Maritime Internationale
PL	Propagation Loss (Perte en propagation)
R/V	Research Vessel (Navire océanographique)
RL	Receive Level (Niveau reçu)
SL	Source Level (Niveau de la source)
STW	Speed Through Water (Vitesse surface)
TPL	Tonnes de Port en Lourd
UNCTAD	United Nations Conference Trade and Development (Conférence des Nations Unies pour le Commerce Et le Développement)
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture)
UQAR	Université du Québec à Rimouski
URN	Underwater Radiated Noise (bruit sous-marin rayonné)

LISTE DES SYMBOLES

c	Célérité du son (m.s^{-1})
d	Distance (m)
dB	Niveau de bruit décibel (dB re 1 μPa)
f	Fréquence (Hz)
p	Pression ($\text{Pa} = \text{N.m}^{-2}$)
ρ	Masse volumique (kg.m^{-3})
T	Période (s)
v	Vitesse (nœud = 1 mille marin/heure)

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'introduction générale de ce mémoire présente tout d'abord le contexte du projet de recherche : la problématique de l'étude, les objectifs et la justification de l'approche méthodologique.

Le son est un phénomène capital pour beaucoup d'espèces, que ce soit sur terre ou dans les profondeurs des océans (UNESCO, 2017). Dans un environnement où la visibilité est très réduite comme les océans, il est essentiel de pouvoir se fier à l'audition car le son, par rapport à la lumière, se propage beaucoup mieux dans l'eau (Lin & Kawagucci, 2024). Certaines espèces marines ont donc développé l'audition pour s'adapter à leur milieu (Eggleston et al., 2016; Johnson et al., 2004; Montgomery et al., 2006; Solé et al., 2023; Visser et al., 2022). Depuis les années 60, l'intensification du trafic maritime et le développement des industries maritimes a fait prendre conscience d'une nouvelle forme de pollution dans les océans, la pollution sonore sous-marine (Chahouri et al., 2022; Duarte et al., 2021; Erbe et al., 2022; McCarthy, 2007; Merchant et al., 2014; Richardson et al., 1995; Southall, 2005). Afin de limiter les risques, des réglementations ont été mises en place, mais la mesure du bruit sous-marin rayonné par les navires reste délicate (Vendittis & Arveson, 2022). Le projet MARS (Station de Recherche en Acoustique Marine, <https://www.projet-mars.ca/>) a conçu et a mis en opération une station d'enregistrement et un protocole de mesure du bruit émis par les navires en suivant au plus près la norme internationale ANSI/ASA S12/64-2009 (Accredited Standards Committee S12, 2019). Cette station, déployée dans l'estuaire du Saint-Laurent (ESL) a été mise en place de 2021 à 2023 et a pour but de comprendre et de mesurer le bruit des navires. Le projet de recherche couvert par ce mémoire se focalise sur l'incertitude des mesures de signature des navires. En effet, la mesure précise du bruit est très complexe et est sensible aux différentes applications des conditions de mesures. Il est important de bien comprendre avec précision les différentes sources de bruits émis afin d'améliorer les mesures

de précaution et de mitigation qui peuvent être réalisées sur un navire pour réduire son niveau d'émission du bruit sous-marin.

1. CONTEXTE GENERAL

1.1 Ondes acoustiques

Le son est une onde mécanique de compression et dilatation locale (McCarthy, 2007; Ross, 1976; Urick, 1983) qui est caractérisée par la fréquence, exprimée en hertz (Hz) et par l'amplitude (dB). Cette onde a besoin d'un support matériel élastique pour se propager (gaz, liquide ou solide). L'onde acoustique est caractérisée par son amplitude du mouvement local de chaque particule, par la vitesse du fluide correspondant à ce mouvement et par la pression acoustique. Cette dernière correspond aux variations locales de pression causées par la compression et la dilatation du fluide. L'unité de la pression acoustique est exprimée en *Pascals* ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ N.m}^{-2}$). La vitesse de propagation de l'onde, aussi appelé la célérité de l'onde (c), dépend fortement de la masse volumique (ρ) mais également du module d'élasticité (E) du milieu, par la relation $c = \sqrt{E/\rho}$. Les signaux acoustiques sont définis par leur fréquence (f) ou leur période (T). La longueur d'onde correspond à la distance entre deux points qui subissent le même état vibratoire avec un décalage d'une période T ou un déphasage 2π . Ainsi, la longueur d'onde correspond à la distance parcourue par l'onde pendant une période T à une vitesse c .

1.2 Acoustique sous-marine

En acoustique sous-marine, la pression acoustique est la grandeur la plus employée (Ross, 1976). Les hydrophones, des microphones sous-marins, sont des capteurs de pression. Cette grandeur acoustique est en général quantifiée logarithmiquement et est notée en décibels (dB). Par définition, le décibel correspond à dix fois le logarithme décimal du rapport entre deux puissances. Par exemple $10\log_{10}(P_1/P_2)$ quantifie le rapport entre deux

puissances. Dans le cas de la pression acoustique, la puissance P_i est proportionnelle au carré de la pression p_i^2 , le rapport exprimé en dB est donc $20\log_{10}(p_1/p_2)$. Pour donner en décibels un niveau absolu de pression, on doit utiliser des grandeurs de référence. En acoustique sous-marine, les niveaux sonores sont indiqués relativement à la pression de référence 1 μPa (Lurton, 2002). On exprime ainsi le niveau sonore par des décibels relatifs à 1 μPa (dB re 1 μPa).

Le son se comporte différemment selon les propriétés physiques rencontrées du milieu. Le milieu marin est un excellent conducteur des ondes sonores (Lurton, 2002; McCarthy, 2007; Ross, 1976; Urick, 1983) dans lequel il peut se propager sur des centaines, voire des milliers de kilomètres pour les basses fréquences, contrairement à la lumière qui ne peut y pénétrer que sur quelques mètres. Le son se déplace 4,5 fois plus vite dans l'eau de mer que dans l'air, atteignant environ 1500 m.s^{-1} (Bobber, 1970; McCarthy, 2007). Cette différence est fortement influencée par les modules d'élasticité. Dans l'eau, la vitesse du son varie également selon d'autres facteurs tels que la salinité, la température et la pression (Erbe et al., 2022; Lurton, 2002). La profondeur de l'eau et la composition du fond marin ont aussi un impact notable sur la propagation du son (Ainslie, 2010; Erbe et al., 2022; Hampton, 1967; Lurton, 2002). En effet, l'énergie de l'onde sera partiellement ou totalement réfléchié ou absorbée sur la surface du fond selon les conditions rencontrées.

Différents sons composent les océans et ses diverses sources combinées donnent le paysage acoustique sous-marin (Duarte et al., 2021). Le bruit sous-marin se divise généralement en trois catégories (Duarte et al., 2021): la géophonie, qui inclut les sons produits par les phénomènes météorologiques (vent, précipitation), océaniques (courants) et géologiques (séismes) ; la biophonie, qui regroupe les sons provenant de l'activité biologique (comme ceux des mammifères marins ou des poissons) ; et l'anthropophonie, qui concerne les sons d'origine humaine (tels que les bruits de navires, sonars, battage de pieux et constructions maritimes). Ces différentes sources sonores peuvent interférer entre elles lorsqu'elles partagent les mêmes bandes de fréquence. Le modèle de Wenz (Wenz, 1962,

1972) répertorie les bandes de fréquences couvertes par ces sources ainsi que leurs niveaux sonores.

Comme illustré dans la Figure 1, les très basses fréquences, de 1 Hz à 100 Hz, sont principalement dominées par les événements sismiques naturels et les pressions exercées par les vagues océaniques. Le trafic maritime est, quant à lui, la principale source de bruit dans les basses fréquences, entre 10 Hz et 1000 Hz. Enfin, les contributions biologiques se retrouvent sur presque tout le spectre, allant de 10 Hz à plusieurs dizaines de kilohertz, en fonction des espèces et des conditions environnementales locales.

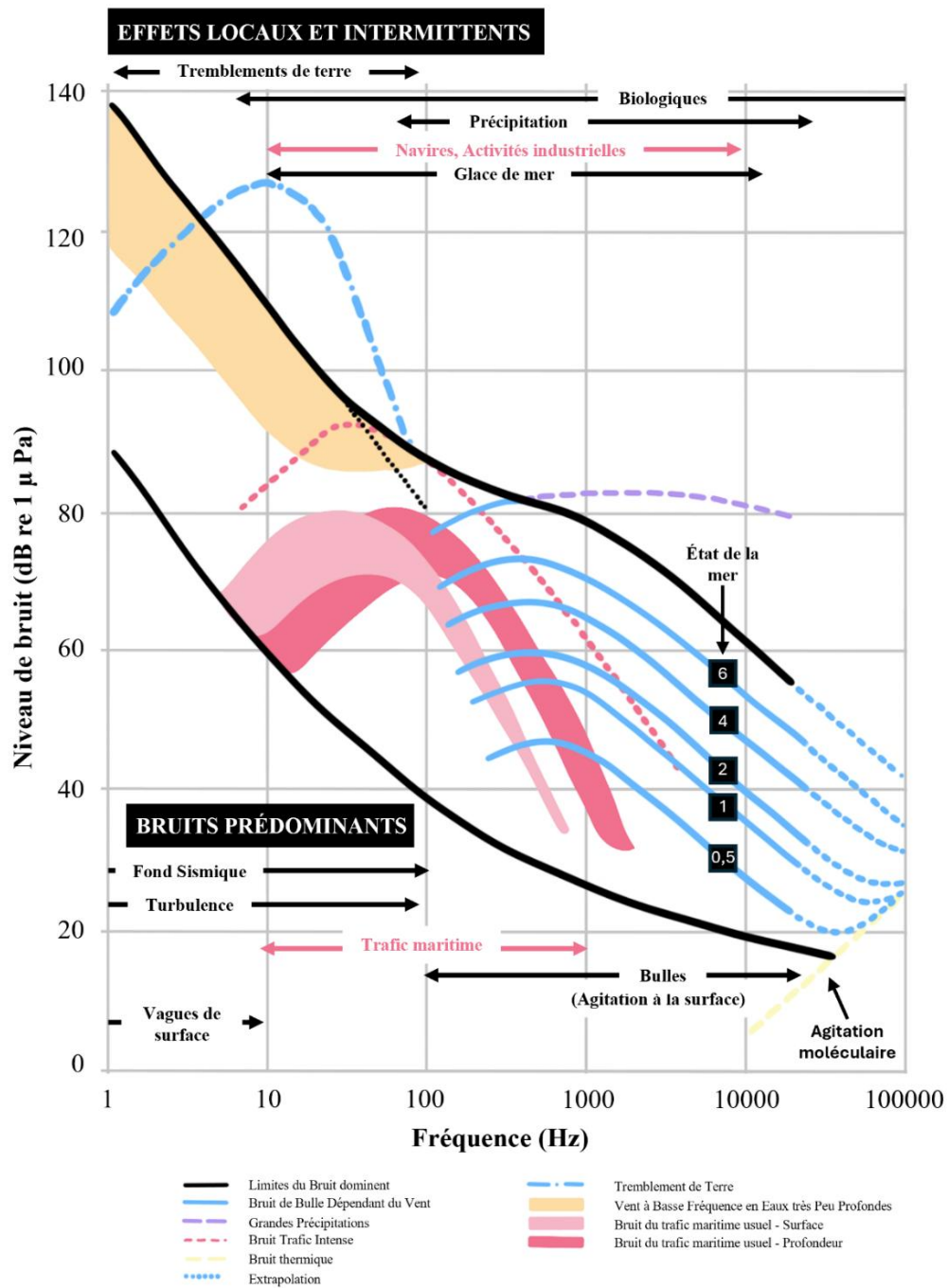


Figure 1. Modélisation du bruit ambiant selon Wenz : spectre et distribution des fréquences des différentes sources sonores sous-marines (reproduction de Miksis-Olds et al., 2013)

1.3 Le son, un élément omniprésent dans les océans

Le son est un élément omniprésent dans les océans. Les sons sont utilisés par la faune marine de manière active (produits) ou passive (reçus uniquement) pour diverses fonctions vitales.

1.3.1 Les mammifères marins

Les mammifères marins sont les principaux concernés notamment pour répondre à ces critères suivants : la recherche de nourriture (Cerchio & Dahlheim, 2001; Fournet et al., 2018), la migration (Dunlop et al., 2008; Oestreich et al., 2022), la communication en groupe (Dudzinski et al., 2009; Indeck et al., 2021), la détection des prédateurs et des proies (Bowers et al., 2018; Curé et al., 2015; Deecke et al., 2002; Morisaka & Connor, 2007; Remage-Healey et al., 2006) et la reproduction (Au et al., 2006; Kügler et al., 2021). Le son qui est produit couvre un large spectre de fréquence dépendant des espèces et de leurs besoins (Duarte et al., 2021). Il existe trois groupes de mammifères marins : les baleines à fanons (Mysticètes), les baleines à dents (Odontocètes) et les pinnipèdes. Les mysticètes produisent des sons dans les basses fréquences, en générale en dessous de 1000 Hz (Richardson et al., 1995). Certaines espèces peuvent en produire en dessous de 50 Hz comme le rorqual bleu (*Balaenoptera musculus*) (Mellinger & Clark, 2003) et le rorqual commun (*Balaenoptera physalus*) (Thompson et al., 1992). Les chants en très basse fréquence ont pour but de communiquer sur une très longue distance, ils servent à établir et à maintenir le contact avec d'autres baleines et à attirer un partenaire pour l'accouplement (Szesciorka et al., 2020). Les basses fréquences peuvent se propager sur de très grandes distances car l'absorption de l'onde à ces fréquences est faible (Francois & Garrison, 1982) et il peut y avoir un effet de guide d'onde dans la colonne d'eau autour du minimum de vitesse du son causé par la réfraction. Les odontocètes vocalisent sur une gamme de fréquences plus élevées, entre 400 et 15 000 Hz pour les bélugas (Madsen et al., 2023; Morisaka, 2012). Ces vocalisations comme les sifflements ont une fonction sociale de cohésion de groupe. Ils produisent également des clics

d'écholocation entre 10 et 120 kHz (Madsen et al., 2023). Enfin, les pinnipèdes peuvent produire des sons entre 100 et 10 000 Hz dépendant de l'espèce (Insley et al., 2003; Jones et al., 2014; Thomas & Stirling, 1983) à des fins de communications.

1.3.2 Les poissons et invertébrés

Les mammifères marins ne sont pas les seuls à produire du son sous l'eau. Plusieurs études montrent que les poissons et les invertébrés ont besoin de produire des sons pour la pérennité de leur espèce. Les poissons connaissent généralement deux phases importantes dans leur cycle de vie. Pendant leur phase larvaire, ils utilisent le son pour s'orienter et sélectionner leurs habitats (Montgomery et al., 2006; Radford et al., 2011). Pendant leur phase adulte, les individus peuvent avoir recours à l'émission de son lors de la reproduction (Forlano et al., 2017, Parmentier et al., 2010), lors d'interaction inter- ou intraspécifiques d'agression, telles que la compétition territoriale, (Parmentier et al., 2010) ou bien lors du maintien de cohésion des bancs (van Oosterom et al., 2016). Les poissons sont très sensibles aux très basses fréquences, dans certains cas, inférieures à 0,1 Hz. Ils arriveraient à percevoir les sons basse fréquence émis par un prédateur pour leur survie. Les invertébrés quant à eux perçoivent probablement uniquement la composante de mouvement des particules du son et ne sont pas sensibles à la pression acoustique (Solé et al., 2023). Les connaissances scientifiques sur la signification biologique de la perception et de la production sonore chez les invertébrés marins sont limitées. L'audition des invertébrés est généralement sensible aux sons de fréquences inférieures à 2000 Hz (Hu et al., 2009; Lovell et al., 2005). Les crustacés sont capables de communiquer entre eux grâce au son (Edmonds et al., 2016; Patek et al., 2009).

1.4 Le transport maritime

1.4.1 Sources de bruit des navires

Le transport maritime est le principal contributeur de bruit dans les océans (Erbe et al., 2014), et notamment dans les très basses fréquences (Hildebrand, 2009). Toutes les catégories de navires participent au bruit ambiant. Entre 20 et 200 Hz, il a été admis que les navires lointains contribuent fortement au bruit ambiant en océan profond (Ross, 1976). Les principales sources de bruit proviennent de l'hélice et de la machinerie (Abrahamsen, 2012; McCarthy, 2007). Le bruit d'un navire est composé principalement par une composante à large bande générée par la cavitation de l'hélice et par une composante à bande étroite créée par la machinerie. Le bruit des bulles générées par l'hélice lorsqu'elles implosent, phénomène connu sous le nom de « cavitation », représente 80 à 85% du bruit émis par les navires (Ross, 1976). Pour les navires de moyenne et grande envergure, le bruit de cavitation se situe à des bosses de fréquences de 50 – 150 Hz (McCarthy, 2007). La machinerie est la deuxième source de bruit significative (McCarthy, 2007). En effet, les bruits de machinerie sont issus des multiples machines installées à bord du navire (moteurs, groupes électrogènes et alternateurs, centrales hydrauliques, treuils) et se propagent vers la coque sous forme de vibrations ou par voie aérienne. (Lurton, 2002). D'autres sources de bruit existent tels que le bruit d'écoulement autour de la coque ou bien le bruit causé par certaines activités de navires en opération tels que chalutage ou dragage (McCarthy, 2007). Ces niveaux sonores varient dépendamment du type de navire, de sa vitesse, de la forme et de la qualité de l'entretien de l'hélice, ainsi que de la coque (Wittekind & Schuster, 2016). Si on s'intéresse aux types de navire, les principaux contributeurs d'émission du bruit dans l'océan global sont les porte-conteneurs. Les porte-conteneurs, gaziers et pétroliers représentent ensemble 856 entrées dans le top 1000 des navires les plus bruyants (Jalkanen et al., 2022). Concernant la vitesse, plus de 90 % des vraquiers, des méthaniers et des transporteurs de véhicules naviguent à des vitesses supérieures à leur vitesse de début de cavitation estimée, ce qui entraîne d'importantes émissions sonores sous-marines (Jalkanen et al., 2022).

1.4.2 Évolution du trafic maritime

Le transport maritime est le mode de transport le plus utilisé et le plus économique pour acheminer les marchandises du monde entier (Fratila et al., 2021; UNCTAD, 2022).

Près de 80% du volume des biens de consommations et 70% de la production mondiale de pétrole sont expédiés par voie maritime (UNCTAD, 2022). Le commerce maritime mondial a enregistré un volume de 12 292 millions de tonnes en 2023, marquant une hausse de 2,4% après un recul observé en 2022 (UNCTAD, 2024). En janvier 2023, le commerce maritime mondial comptait au total 105 493 navires de 100 tonnes brutes et plus, comprenant les pétroliers, vraquiers et les porte-conteneurs à 85% de la flotte totale (UNCTAD, 2023). En 2022, la capacité de charge a augmenté à un taux annuel de 3,2%, pour atteindre un tonnage global de 2,27 milliards de tonnes de port en lourd (TPL) (Figure 2).

Une croissance de 2% en 2024 a été estimée pour le volume total du trafic maritime. Cette croissance s'expliquerait par la forte demande en grands vracs, tels que le minerai de fer, le charbon, les céréales, le pétrole et les marchandises en conteneurs (UNCTAD, 2024). Une augmentation de 0,4 point de pourcentage par an du commerce maritime est prévue entre 2025 et 2029 (UNCTAD, 2024). Cette croissance est encouragée par les progrès technologiques, la transition vers des sources d'énergie plus propres et le développement des infrastructures.

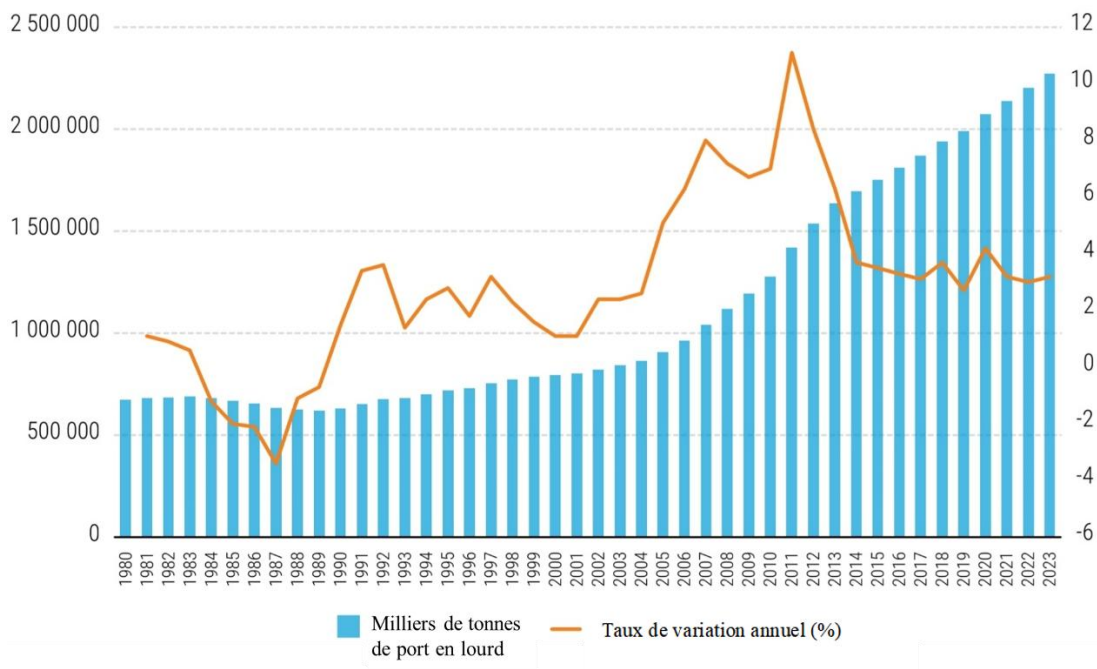


Figure 2. Croissance annuelle de la flotte mondiale de 1980 à 2023. L'histogramme présente le port en lourd de la flotte mondiale et la courbe exprime son taux de variation annuel en pourcentage (©UNCTAD, 2024).

1.4.3 Historique et tendance du niveau de bruit

Une augmentation du niveau de bruit de 10 dB a été constaté entre 1950 et 1975 (Ross 1987, 1993, 2002). Cette tendance est observable dans le Pacifique Est (Andrew et al., 2002; McDonald et al., 2006) et l'Atlantique Est et Ouest (Ross, 2005). Des analyses du niveau de bruit ambiant dans le Pacifique Nord-Est de 1978 à 1986 ont montré augmentation de 2 dB par décennie dans les basses fréquences (Chapman & Price, 2011). L'augmentation du bruit est causée tant par la croissance du nombre de navires que par celle du tonnage brut. D'après les observations du niveau de bruit actuel, entre 2014 et 2019, l'augmentation des émissions de bruit sous-marin est différente selon différentes régions (Figure 3). Trois grandes régions en ressortent. Une première grande région en bleu foncé où la tendance du niveau de bruit est soit à la baisse soit à un très long doublement du niveau de bruit (+ 3 dB) (> 20 ans). Une

deuxième grande région, en bleu clair, où le doublement surviendrait tous les 10-20 ans, en Europe ou Asie. Enfin un troisième groupe qui verrait le niveau de bruit doublé en moins de 10 ans telle que la zone du Pacifique, de la mer Rouge et de l'Arctique la région la plus touchée. En effet, l'augmentation du bruit en Arctique est supérieure à 3 dB par décennie. Cette zone vierge est de plus en plus exposée à la pollution sonore due à la fonte de la banquise qui rend la navigation et l'exploitation de la zone possible. Les résultats de la Figure 3 sont basés sur les données obtenues sur 5 ans. Les zones où la tendance sont à la baisse correspondent principalement aux zones où le trafic maritime est déjà très bien développé et où le bruit émis par les navires est par conséquent très élevé. L'Arctique est à l'inverse depuis peu une région de plus en plus exploitée et qui voit le nombre de navire se multiplier d'où une augmentation sans précédent.

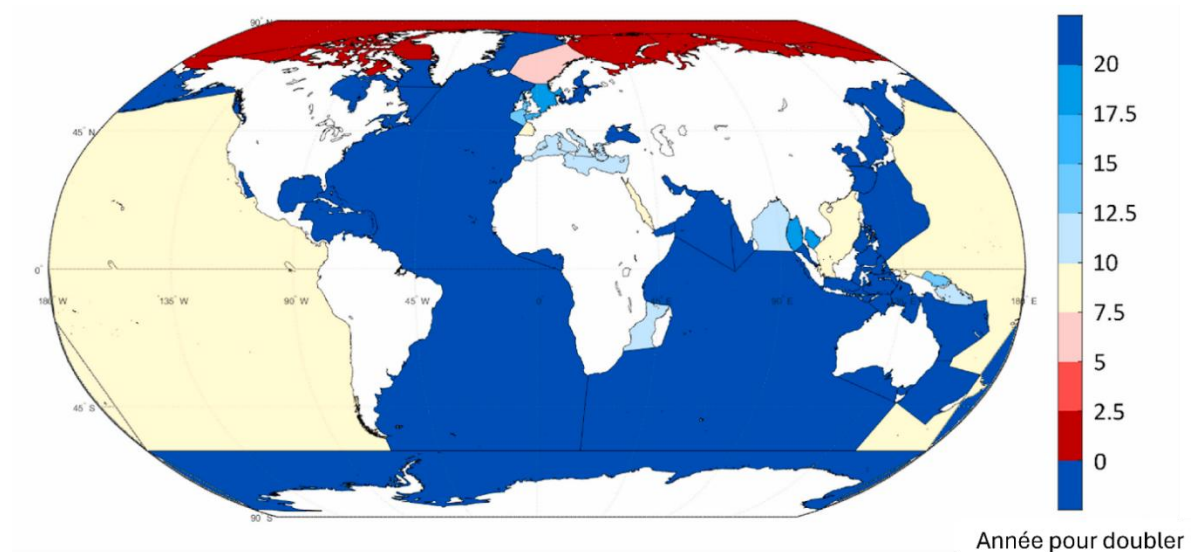


Figure 3. Tendances des émissions sonores sous-marines dans les zones marines : le bleu foncé indique un doublement du bruit des navires en plus de 10 ans ou une diminution au fil du temps ; le jaune clair indique un doublement dans un délai de 7,5 à 10 ans ; le rouge clair indique un doublement dans un délai de 5 à 7,5 ans ; enfin le rouge foncé représente un doublement dans un délai de moins de 3 ans (©Jalkanen et al., 2022).

Un modèle de prédiction prévoit une augmentation, d'ici 2050, du nombre de mouvements des navires de 240 à 1209% par rapport à 2014 dans le monde (Sardain et al.,

2019). Cette intensification du trafic maritime pourrait augmenter le niveau de bruit ambiant dans les océans (McCarthy, 2007) et continuerait d'impacter les espèces marines qui y vivent.

1.4.4 Impact sur la faune marine

Les effets du bruit sur les organismes marins peuvent être aigus ou chroniques. Les effets aigus peuvent causer par exemple des blessures corporelles provoquées par un son fort alors que les effets chroniques sont causés par une exposition prolongée à des niveaux sonores modérés. L'impact du bruit sous-marin émis par les navires de commerce sur la faune marine fait majoritairement partie des effets chroniques et cet impact peut aussi bien avoir un effet à court qu'à long terme.

L'impact du bruit sur les mammifères marins a déjà été beaucoup étudié. Il existe plusieurs effets :

- Par le masquage des signaux de communication (C. W. Clark et al., 2009; Erbe et al., 2016; F. H. Jensen et al., 2009). En effet, les bruits d'émission des navires peuvent masquer les niveaux de bruit aux fréquences de communication de certaines espèces de baleines. Des réponses différentes à ce masquage existent. Il a été constaté chez la baleine à bosse (*Megaptera novaeangliae*) une prolongation des vocalisations alors que pour les rorquals communs, il y a une diminution, voir un arrêt total (Chahouri et al., 2022).
- Par l'évitement des proies (Erbe et al., 2016). Le bruit rayonné par les navires peut perturber leur capacité à évaluer les risques et à éviter les prédateurs (McCormick et al., 2019; Simpson et al., 2016).
- Par induction de stress (Cox et al., 2005; Di Franco et al., 2020). Des échantillons fécaux de baleines franches de l'Atlantique Nord (*Eubalaena glacialis*) ont suggéré que l'exposition au bruit des navires à basse fréquence peut être associée à un stress chronique (Rolland et al., 2012).

L'étude de l'impact sur les mammifères marins du bruit des navires est toutefois complexe en raison des contraintes liées à la variabilité des espèces et des individus et du contexte des expérimentations. Une étude peut être biaisée par la présence des observateurs sur un navire dans la zone d'étude. Même lorsqu'il est confirmé que le bruit est la source de perturbation, les incohérences de mesure entre les études compliquent les comparaisons.

Les études sur l'impact du bruit des navires sur les poissons ont montré qu'il y avait des effets néfastes sur leur comportement (Simpson et al., 2016; Vazzana et al., 2017) et leur réponse physiologique (Celi et al., 2016; Filiciotto et al., 2016). Ces effets entraînent ainsi des changements dans leur capacité à se défendre contre les prédateurs et maintenir une bonne santé. Une étude démontre que le bruit de certains types de moteurs de navires affecte la capacité des poissons juvéniles des récifs coralliens à apprendre et à réagir face aux prédateurs (McCormick et al., 2019). Les chercheurs ont constaté que l'exposition au bruit des bateaux réduisait considérablement la capacité des poissons à reconnaître les menaces de prédation et à y répondre (Ferrari et al., 2018). Le bruit peut également masquer les communications entre eux (Hawkins & Popper, 2017).

1.5 L'estuaire du Saint-Laurent (ESL), une zone d'étude remarquable

Le fleuve du St-Laurent dans la province du Québec au Canada est l'une des plus longues voies maritimes intérieures en eau profonde du monde (Morandi, 2023). Chaque année, plus de 5000 navires marchands y transitent (Chion et al., 2007). La Figure 4 représente la densité par jour par km² pour tout type de navire. On constate une augmentation de 32% sur le tonnage de marchandise dans les différents ports du Québec par rapport à 2010. Le transport maritime est ainsi un maillon essentiel de la chaîne logistique et constitue un moteur économique majeur pour le développement du Québec (Morandi, 2023).

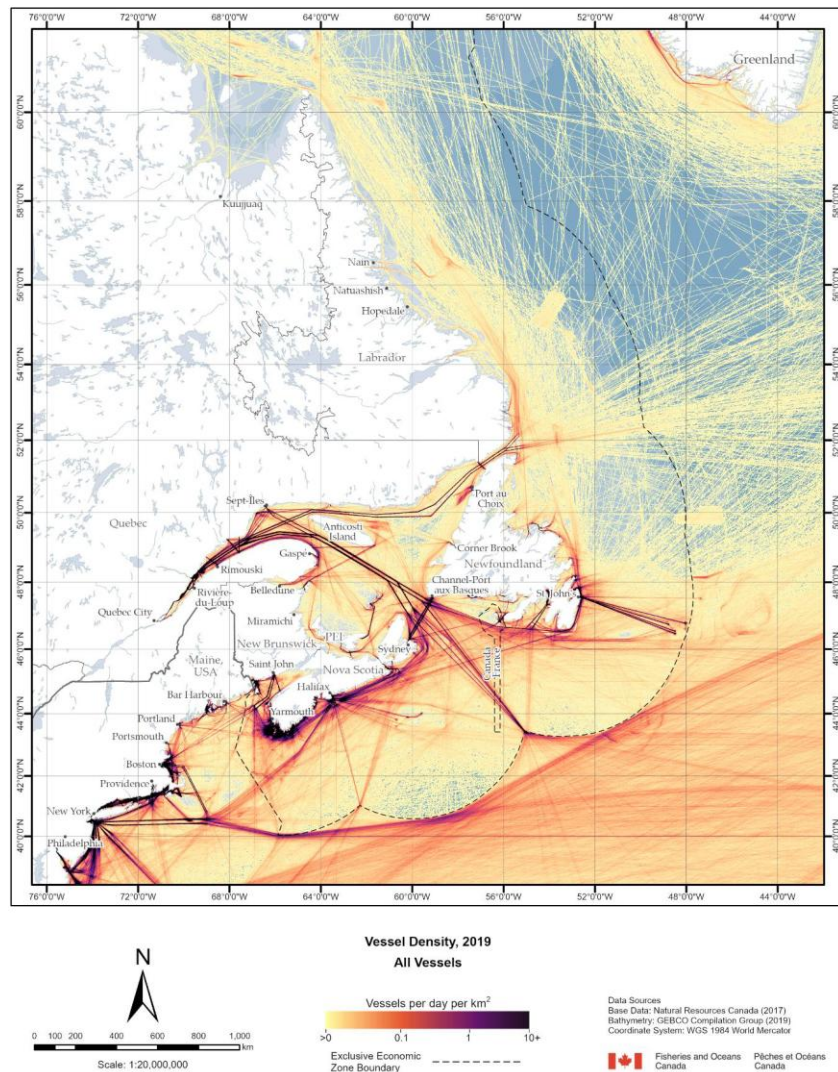


Figure 4. Carte de densité de trafic maritime par jour par km² dans l'ESL et le golfe du Saint-Laurent et toute la côte Est du Canada. © Pêche et Océans Canada., 2019.

L'ESL est également un habitat important pour les mammifères marins (Lesage et al., 2014). Les dynamiques hydrographiques favorisent la productivité locale et l'agrégation des proies. Pas moins de 10 espèces de mammifères marins se nourrissent de manière saisonnière dans cette région. Le béluga (*Delphinapterus leucas*) et le phoque commun (*Phoca vitulina*) y vivent toute l'année. Plusieurs espèces venant s'y nourrir sont listées sur la loi canadienne sur les espèces en péril (LEP) (législatifs, 2024).

Les populations qui sont mentionnées comme en voie de disparition sont : le béluga de l'estuaire du Saint-Laurant ; La baleine noire de l'Atlantique Nord (*Eubalaena glacialis*) ; le rorqual bleu (*Balaenoptera musculus*) de l'Atlantique. Aucune espèce classée comme menacée n'est présente dans la zone de l'ESL. Enfin, la population de rorqual commun (*Balaenoptera physalus*) de l'Atlantique est catégorisée comme étant préoccupante.

Pendant l'été, l'exposition aux navires est encore plus soutenue par la présence de navires d'observation des baleines, à but touristique (Chion et al., 2007). En effet, ces navires intensifient le trafic maritime dans les eaux profondes du chenal laurentien et à l'embouchure du Saguenay, zones de distribution principale des bélugas.

Certaines études ont montré des impacts importants du niveau de bruit émis par les navires sur les espèces de l'ESL tels que sur le rorqual bleu de l'Atlantique Nord (*Balaenoptera musculus*) (Beauchamp et al., 2009) et les bélugas (Pêches et Océans Canada, 2024a). La topographie dans certaines zones, telle que l'embouchure du Saguenay, rend également le fleuve comme étant parmi les plus bruyants en Amérique du Nord (F. B. Jensen et al., 2011; Urick, 1983).

1.6 Les réglementations

L'intérêt des scientifiques autour de la compréhension de ces impacts et la mise en place de réglementations sont grandissants. Au Canada, plusieurs initiatives ont été élaborées.

Au niveau fédéral l'initiative pour des navires silencieux (INS) de Transports Canada a été lancée en 2019 et relève du Plan de protection des océans (Pêches et Océans Canada, 2024b). Cette initiative vise à lutter contre le bruit sous-marin en rendant les navires plus silencieux par une amélioration de leur conception initiale.

A l'échelle provinciale, au Québec, une initiative pour la protection du béluga et des autres baleines contre le bruit sous-marin dans l'ESL est en cours. Parcs Canada a mis en place deux stations d'enregistrement acoustique pour une surveillance continue et pour

établir des données de référence pour réduire le bruit sous-marin (Pêches et Océans Canada, 2024a).

Enfin, un Plan d'action fédéral sur le bruit sous-marin devrait être publié en 2025 afin de mettre l'action sur des mesures efficaces pour lutter contre le bruit sous-marin au Canada.

À l'échelle internationale, du 30 septembre au 4 octobre 2024, le Comité de la protection du milieu marin, 82^{ème} session (MEPC 82) de l'Organisation Maritime Internationale (OMI) a approuvé le Plan d'action pour la réduction du bruit sous-marin produit par les navires de commerce. Le but de ce Plan d'action est de faire adopter les Directives révisées de 2014 afin de prévenir et réduire le bruit rayonné par les navires. Ces Directives mettent en avant plusieurs recommandations telles que sur l'amélioration de la conception des navires, sur la maintenance des hélices et des moteurs, sur l'utilisation de nouvelles technologies par l'intégration de propulseurs moins bruyants ou bien de revêtements absorbant le bruit et enfin sur l'évitement des habitats sensibles où vivent des espèces marines vulnérables (MEPC.1/Circ.906).

2. PROBLEMATIQUE

Il est admis que les grands navires peuvent avoir un impact significatif en contribuant de manière substantielle aux niveaux de bruit ambiant dans les basses fréquences. Pour mettre en place des dispositifs efficaces, il est nécessaire d'améliorer notre compréhension du bruit sous-marin émis par les navires. La mesure du bruit sous-marin rayonné par les navires est pourtant complexe et les conditions de mesures vont fortement influencer la mesure finale (Arveson & Vendittis, 2000; Simard et al., 2016). Plusieurs protocoles de méthodes de mesure et de calcul du bruit sous-marin rayonné par les navires ont été développés au cours des deux dernières décennies (J. A. Clark & Tarasek, 2006; Oudompheng et al., 2018; Tollefsen & Dosso, 2008).

Le protocole ANSI/ASA S12/64-2009 (Accredited Standards Committee S12, 2019) publié par l'Acoustical Society of America (ASA) en 2009 est devenu le protocole standard américain après l'accord de leurs comités de normalisation respectifs et par l'American National Standards Institute (ANSI). Ce protocole a établi des lignes directrices pour la mesure du bruit sous-marin émis par les navires en normalisant les procédures sous trois niveaux de mesures différents (Grade A, B et C). Chaque niveau a une méthodologie spécifique, pour des usages tels que la conformité contractuelle, l'évaluation périodique et la recherche. L'équipement, les conditions environnementales du site et d'opération du navire ainsi que les méthodes d'analyse de données vont alors être pris en compte différemment pour chaque niveau de mesure (Tableau 1).

La réalisation de toutes les conditions pour une mesure parfaite est très complexe. Il n'est souvent pas possible de respecter ces nombreuses contraintes.

Un des défis principaux à relever dans les mesures de bruit sous-marin est de connaître avec précision les pertes en propagation (PL). Le son perd de l'énergie en se propageant. La perte en propagation correspond à la différence entre le niveau de la source (SL) et le niveau reçu (RL) du son (Urick, 1983) :

$$PL = SL - RL, \quad (1)$$

Il existe plusieurs situations dans lesquelles le PL peut être calculé. Des cas simples existent tout comme des cas complexes qui peuvent conduire à des erreurs importantes. L'approximation de l'environnement est potentiellement source d'incertitude. Dans un environnement infini et homogène, la réflexion des ondes acoustiques à la surface et au fond, et à la réfraction causée par les variations de la vitesse de propagation du son dans la colonne d'eau, sont négligés. Le front d'onde acoustique prend alors la forme de la surface d'une sphère de rayon r . La puissance acoustique diminue comme $1/r^2$, selon la « loi de l'inverse du carré ». Les pertes en propagation, en dB, valent alors.

$$PL = 20 \log_{10} \left(\frac{r}{1m} \right) \quad (2)$$

Tableau 1. Les principales lignes directrices pour la mesure du bruit sous-marin selon trois Grades A, B et C.

Grade	A	B	C
Appellation du Grade	Méthode de précision	Méthode d'ingénierie	Méthode d'observation
Incertitude de mesure	1,5 dB	3,0 dB	4,0 dB
Répétabilité de la mesure	±1,0 dB	±2,0 dB	±3,0 dB
Gamme de fréquence (bande en 1/3 d'octave)	10 à 50000 Hz	25 à 25000 Hz	50 à 10000 Hz
Mesure à bande étroite	Requis	Requis	Selon les besoins
Nombre d'hydrophones	Trois	Trois	Un
Profondeur nominale des hydrophones (Angle)	15°, 30°, 45°		20° ± 5°
Profondeur minimum de l'eau	> 300 m ou 3x la longueur du navire	> 150 m ou 1,5x la longueur du navire	> 75 m ou 1x la longueur du navire
Distance minimale au point le plus proche (CPA)	> 100 m ou 1 fois la longueur du navire		
Incertitude sur la distance (au CPA)	2 %	2%	5%
Angle de la fenêtre d'acquisition	± 30°		
	Total : 6	Total : 4	Total : 4
Nombre minimum de passage pour le navire	Bâbord : 3 Tribord : 3	Bâbord : 2 Tribord : 2	Au moins un à tribord et un à bâbord
Condition météorologique	Vitesse du vent ≤ 20 nœuds		

Source : Protocole ANSI/ASA S12/64-2009, 2009. © ANSI/ASA S12/64-2009

Un autre défi peut aussi venir du bruit de fond. Ce bruit peut inclure la contribution de l'anthropophonie, la biophonie et la géophonie. Par ailleurs, les effets de bruit propre lié à l'écoulement de l'eau sur les hydrophones en suspension ne peuvent être sous-estimés. Les vibrations du câble et les chocs entre les parties mobiles sont les deux types de bruit propre. Les hydrophones fixés plus en profondeur sont moins affectés que ceux suspendus à la surface (Ainslie et al., 2022). D'autres paramètres, tels que les interférences destructives peuvent affecter le niveau de bruit d'un navire en mouvement. Les niveaux de bruit des navires ne sont pas omnidirectionnels, les bruits de certaines sources peuvent être masqués par certaines composantes du navire, comme le bruit de l'hélice qui peut être masqué par la coque ou bien la vitesse locale du son qui peut être diminuée à cause du sillage au niveau de la proue. Ces situations peuvent affecter le schéma d'interférence acoustique et augmenter la perte d'absorption sonore. Il est également important d'effectuer les relevés dans le champ lointain géométrique où les sources peuvent être considérées comme ponctuelles. En effet, le navire possède plusieurs sources de bruit, et ainsi être transmis à la coque de différentes manières. Tous ces paramètres peuvent affecter la directivité et la transmission du bruit dans les basses fréquences ce qui aura un impact pour la mesure et l'estimation du bruit sous-marin (Vendittis & Arveson, 2022; Wales & Heitmeyer, 2002). Finalement, la mesure précise du bruit sous-marin des navires relève beaucoup de défis. Il faut bien prendre en compte chaque paramètre pour diminuer les erreurs dans la prise de décision pour les réglementations futures.

3. OBJECTIFS DE RECHERCHE ET METHODE UTILISEE

Ce projet de recherche s'inscrit dans le cadre du projet MARS. Le projet MARS (www.projet-mars.ca) est un projet de recherche appliquée qui est dédié à la compréhension et à la mesure du bruit sous-marin rayonné par les navires. Quantifier le bruit rayonné des navires dans l'ESL permettrait de comprendre sa flotte et le bruit qu'elle rayonne. Il est possible à la suite de cela, de comparer les évolutions de chacun des navires, de comprendre les paramètres qui influencent le bruit et enfin de valider les effets des mesures d'atténuation. Une mesure correcte du bruit rayonné par un navire permettrait de concentrer les recherches

sur des zones spécifiques de réduction de bruit. La mesure de signature des navires est réalisée à travers diverses études et dans des zones où les conditions sont très différentes. Il est alors crucial d'être capable de comparer les mesures entre elles. La complexité de l'application de chaque critère du protocole et de l'application à grande échelle sur un grand nombre de navires de manière semi-autorisée est source de difficultés pour une appréciation universelle de la mesure du bruit des navires.

Le projet de maîtrise a ainsi pour objectifs de :

- Mettre en avant les incertitudes de mesure dans les situations de maintenance ou non des antennes conformes au protocole ANSI/ASA S12/64-2009 (ANSI/ASA). Cette incertitude se focalisera seulement sur un navire pour éliminer la variabilité qui existe entre eux.
- Réduire cette incertitude à partir de nouvelles méthodes d'acquisition des mesures.
- Comprendre les conséquences d'une simplification de la géométrie de l'antenne, c.à.d. un hydrophone au lieu de trois, sur la précision de la mesure finale.

Pour quantifier l'incertitude, la répétabilité de la mesure sera utilisée. Plus la mesure est répétable, moins l'incertitude globale associée à la mesure de la signature du navire sera grande. Pour comprendre cette répétabilité, nous avons analysé la signature du navire de recherche R/V Coriolis II à travers les 55 passages réalisés devant les antennes, déployées tout au long du projet.

La signature d'un navire ou les niveaux de source monopole (MSL) est une représentation idéale du niveau de bruit que rayonne le navire comme une source ponctuelle omnidirectionnelle et dont l'intensité sonore est normalisée à 1 m. Le modèle de propagation appliqué est le modèle d'intégration du nombre d'ondes SCOOTER (F. B. Jensen et al., 2011). Un spectre MSL a été automatiquement calculé pour chaque passage et pour chaque hydrophone selon la norme ANSI / ASA 2009 S12.6410 (Mercure-Boissonnault et al. 2023). Ce traitement automatique des signatures acoustiques est l'une des principales réalisations du

projet MARS. Dans cette étude la signature MSL correspond à la moyenne des spectres obtenus pour chaque hydrophone d'une antenne pour un passage du navire. Au total, nous avons 15 mesures devant deux antennes en 2022 et 40 mesures devant trois antennes en 2023.

Pour la réalisation du premier objectif, deux scénarios ont été élaborés. La différence entre les deux scénarios réside sur le nombre de passages pris en compte dans la mesure des signatures du navire prenant ainsi en compte les conditions de mesure correspondant au grade A et grade B du protocole ANSI/ASA S12/64-2009. Chaque scénario répond à deux cas d'étude. Le premier cas d'étude a pour but d'identifier les seuils observables en cas de changement de vitesse du navire ou de réglage du moteur avec une précision plus ou moins grande. Ce cas analyse la répétabilité individuelle de chaque antenne simulant ainsi l'état sur une saison de mesure, sans avoir besoin de faire une maintenance des appareils. Le deuxième cas d'étude quant à lui s'intéresse à l'effet qu'aurait une maintenance sur la mesure. En effet, la répétabilité calculée est issue de toutes les antennes indépendantes. Il inclut ainsi des modifications de l'infrastructure, re-déploiement des antennes et maintenance du navire. Ce cas vise à mesurer la flotte dans l'ESL et finalement comparer la mesure avec d'autres configurations de mesure.

Pour répondre au deuxième objectif qui vise à améliorer les répétabilités obtenues, un cas d'étude utilisant deux antennes successives a été conçu. Ces antennes successives rassemblent des mesures quasi-identiques, en faisant passer le navire devant deux antennes distantes de 600 m à la suite. Il garde ainsi les mêmes conditions d'opération tout le long du trajet. Une répétabilité sera calculée à partir des mesures de deux MSL des antennes successives.

Enfin, pour satisfaire le dernier objectif, une analyse est faite de manière individuelle pour les mesures de chaque hydrophone composant une antenne (bas, milieu ou haut).

Ces résultats permettront de confirmer la qualité de mesure de la station acoustique MARS pour une application de méthodes précises à la réduction du bruit des navires. Ils seront aussi pertinents pour valider les seuils de détection avec ou sans maintenance des

antennes de mesure. Ces deux scénarios mettent l'emphasis sur différents cas d'optimisation de la mesure du bruit rayonné par une flotte.

CHAPITRE 1

OPTIMISATION ET AMELIORATION DE LA MESURE DU BRUIT RAYONNE PAR UN NAVIRE

1.1 RESUME

L'intensification du trafic maritime entraîne une hausse du bruit sous-marin. Des protocoles normalisés ont été publiés pour faciliter une mesure précise de cette source de bruit. Ils sont cependant souvent complexes à être mise en place dans des conditions opérationnelles réelles. Cela exige des compromis, notamment pour une infrastructure de mesure permanente. Un exemple est la station de recherche en acoustique marine MARS (<https://www.projet-mars.ca>), conçue pour mesurer une flotte importante sur une longue période. Les performances de mesure de la station MARS ont été évaluées à l'aide d'un ensemble de données regroupant 55 passages du navire de recherche R/V Coriolis II collectées par six antennes d'hydrophones distinctes au cours des été/automne 2022 et 2023. Dans cette étude, nous avons quantifié les incertitudes de mesure dans le cadre de trois scénarios. Chaque scénario répond à des cas d'étude spécifiques, sur le déploiement et récupération des antennes et de la mesure du bruit rayonné par les navires. Ils couvrent plusieurs niveaux de qualités de mesure, allant du plus élevé défini par la norme pour des mesures sans maintenance mais également à une méthode simplifiée, adaptée aux mesures en subissant une pour une grande flotte. La répétabilité est alors un outil idéal pour quantifier la limite de sensibilité de chacun des scénarios. Les données recueillies montrent tout d'abord que la répétabilité permet de connaître la limite de modification de bruit rayonné pouvant être détectée avec certitude par nos mesures. Ensuite, concernant les mesures avec maintenance, une précision de 3,3 dB a été démontrée. Enfin, l'optimisation sur des mesures sans maintenance peut se faire de deux manières : doubler les passages pour réduire l'incertitude à 2,1 dB, ou utiliser deux antennes successives pour atteindre une répétabilité

de 0,8 dB. Cette dernière solution est idéale pour les grandes flottes malgré des coûts de déploiement plus élevés.

Cet article, intitulé « Optimizing and improving the measurement of radiated noise from vessels », sera publié dans la revue *The Journal of the Acoustical Society of America*. En tant que premier auteur, j'ai joué un rôle central dans l'élaboration de la problématique et des objectifs de recherche, les traitements et analyses des données acoustiques. Le deuxième auteur, Guillaume St-Onge a apporté sa contribution à la formation de la problématique et des objectifs de recherche, ainsi qu'à la révision de l'article. L'agent de recherche à l'ISMER, Pierre Mercure-Boissonnault, en tant que troisième auteur, a contribué au traitement des données brutes acoustiques et à la révision de l'article. Enfin, Pierre Cauchy, quatrième auteur, a participé à l'élaboration de la problématique et des objectifs de recherche, à la structuration de la méthodologie, ainsi qu'à la révision de l'article. Une version préliminaire de mes résultats a été présentée à deux congrès, pendant la semaine canadienne de l'acoustique en 2023 à Montréal et au 53rd *International Congress & Exposition on Noise Control Engineering – Internoise* à Nantes (FRANCE) à l'été 2024. Les résultats de ces deux présentations ont été publiés dans les revues associées.

1.2 OPTIMIZING AND IMPROVING THE MEASUREMENT OF RADIATED NOISE FROM VESSELS

Cécile Perrier de la Bathie,^{1,a} Guillaume St-Onge,¹ Pierre Mercure-Boissonault,¹ and Pierre Cauchy¹

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

1.3 INTRODUCTION

Maritime transport is the main anthropogenic source of background noise in the lower frequencies (i.e., 5-500 Hz) in the marine environment (Andrew et al., 2002; Duarte et al., 2021; Hildebrand, 2009; Mérindol et al., 2023; Miksis-Olds & Nichols, 2016; Weilgart, 2007). Vessels add to the ambient underwater noise levels across extensive geographic regions, and the sounds emitted by individual vessels are frequently indistinguishable in both space and time (Chahouri et al., 2022; Gassmann et al., 2017; Hildebrand, 2009). The expansion of marine industries has given rise to a new form of pollution known as “noise pollution.” This pollution is a significant environmental issue impacting marine fauna, particularly documented in marine mammals, by masking communication signals (C. W. Clark et al., 2009; Erbe et al., 2016; F. H. Jensen et al., 2009), hampering predator-prey interactions (McCormick et al., 2019) or inducing stress and disorientation (Cox et al., 2005; Di Franco et al., 2020). For conservation purposes, it is critical to improve our understanding of noise pollution and its impact on marine life to implement mitigation measures and regulation programs.

Measuring underwater noise radiated by vessels is a complex task that is strongly influenced by measurement conditions (Arveson & Vendittis, 2000; Simard et al., 2016). Variations in environmental conditions such as wave height and wind (Mérindol et al., 2023) and operational conditions such as propeller condition (Kesour et al., 2023) make it difficult to reproduce measurements. Acoustic effects, such as image interference due to surface and

bottom reflections, influence the measurements. In addition, variations in ambient background noise and hydrophone positioning due to water movements further complicate the task (Vendittis & Arveson, 2022). International standards have been issued for measuring underwater radiated noise (URN) in deep water (International standard - ISO, 2016, 2019) and these standards derive from ANSI/ASA S12.64-2009 (Accredited Standards Committee S12, 2019), developed by ASA working group S12/WG 47, Underwater Noise Measurement of Vessels (Bahtiarian, 2007; Blaeser & Struck, 2019). However, practical implementation of the standards led to each classification society recommending different procedures for measuring, analyzing, and reporting vessel radiated noise (Ainslie et al., 2022). Practical implementation is challenging, especially when aiming for a permanent infrastructure that could measure a large fleet, and any modification is likely to add uncertainty to the final measurement (Vendittis & Arveson, 2022).

The Marine Acoustic Research Station (MARS) project (<https://www.projet-mars.ca/en>) is dedicated to the measurement and the study of the underwater noise radiated by vessels and to propose appropriate mitigation measures. The MARS station, operating in the Laurentian Channel near Rimouski (Québec, Canada) in the Lower St. Lawrence Estuary (Figure 5), was designed to measure the acoustic signatures of the St. Lawrence fleet, following closely the recommendations from the American Standard ANSI/ASA S12/64-2009 (Accredited Standards Committee S12, 2019), with specific adaptation to enable measurement of a large fleet, and aiming for sustained operation over multi-year periods. It was operated during the ice-free season in 2021, 2022 and 2023. A series of experiments was specifically designed to collect multiple measurements from a single vessel under similar operating conditions. The R/V Coriolis II repeated 15 and 40 quasi-identical transits in front of the MARS station in 2022 and 2023 respectively, following identical sailing instructions (speed through water and distance to hydrophone array). This study quantifies the observed variability between repeated observations of the same vessel, in similar sailing conditions, collected by six independent hydrophone arrays.

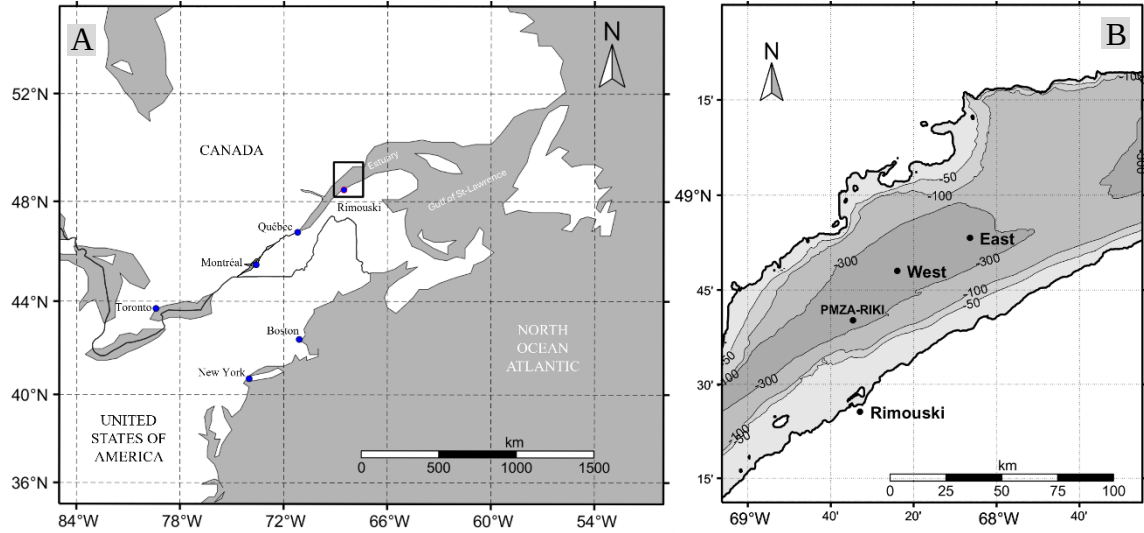


Figure 5. A. Localization of the Mars station in North America in the black square, and B. Zoom on the St. Lawrence Estuary with the black dot representing the west and east mooring locations. Instrumented buoy PMZA-RIKI collected environmental data (wind, currents, and hydrographic profiles). The source of the bathymetry data is from GEBCO Digital Atlas, <https://www.gebco.net/>

1.4 MATERIALS AND METHODS

1.4.1 Data collection

1.4.1.1 International standard

The MARS station complies with the specifications recommended by the standards (Accredited Standards Committee S12, 2019; International standard - ISO, 2016, 2019). In this section, we outline the key points to be considered when measuring underwater sound pressure levels from vessels at a prescribed operating condition. This standard offers three grades of measurement (Grade A, B and C) each with a stated applicability and test methodology. To measure vessel noise, three main instrumental components are essential: hydrophones, data acquisition systems and distance measurement systems, with specific requirements depending on the measurement grade. External factors influence measurement accuracy, such as the test site (bathymetry and background noise), surface conditions (wind

limited to 20 knots for vessels > 100 m) and hydrophone array configuration (vertical positioning at cable drift angle). The vessel must follow a straight course and constant sailing conditions during the test sequences, with the number of runs varying according to grade: six for A, four for B and C, distributed between port and starboard. Subsequent processing will be required to adjust sound pressure levels according to background noise conditions, correct sensitivity, and normalize data for distance variations (Accredited Standards Committee S12, 2019).

The main points to bear in mind are as follows:

Instrumentation: hydrophones must be omnidirectional over the required frequency band and calibrated in the laboratory before installation. Three hydrophones per array are required for grades A and B, one for grade C. The acquisition system must meet Nyquist sampling requirements and synchronize acoustic data with tracking data for grade A, covering frequency bands from 10 to 50,000 Hz (A), 20 to 25,000 Hz (B) and 50 to 10,000 Hz (C). The distance measurement system, accurate to 2% for grades A and B and 5% for C, must determine the horizontal separation between the vessel and the hydrophone array, either continuously for A or at the nearest point for B and C. The configuration of grades A and B arrays have 3 hydrophones positioned vertically along the water column forming angles of 15°, 30° and 45° from the sea surface (Figure 6) at the nominal distance of the Closest Point of Approach (CPA) and allow to measure the beam aspect of a vessel. The configuration of the grade C is much simpler with a single hydrophone at $20 \pm 5^\circ$.

Environmental measurement conditions: The minimum depth of the water column at the measurement site depends on the grade and the length of the vessel. For Grade A measurements, the minimum depth is 300 m or three times the vessel's length; for Grade B, 150 m or one-and-a-half times the length; and for Grade C, 75 m or one times the length. Background noise must be low enough to allow measurement of the vessel's underwater sound. A maximum wind speed of 20 knots is recommended for vessels over 100 m long.

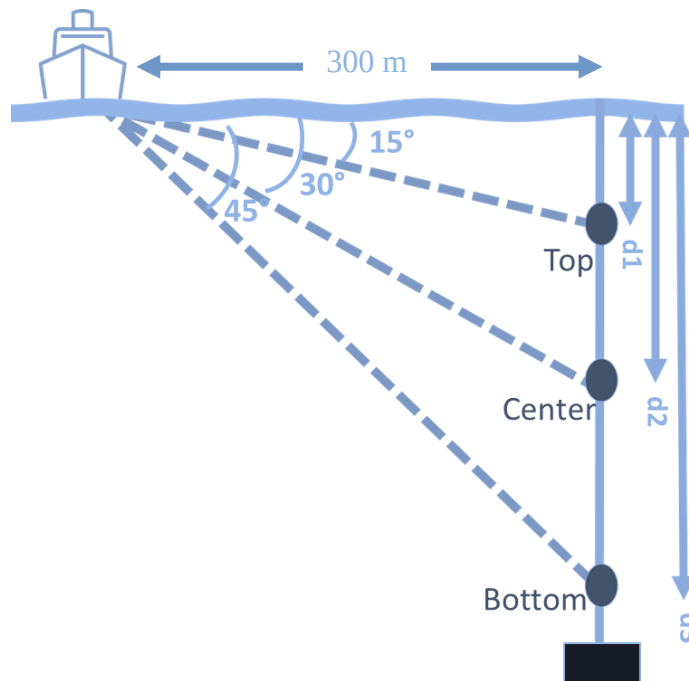


Figure 6. Hydrophone array configuration for grades A and B. The depths used in the MARS project, $d1 = 80$ m, $d2 = 173$ m and $d3 = 300$ m correspond to 15° , 30° and 45° angles from the sea surface for a distance at CPA of 300 m.

Vessel measurement protocol: Vessels are required to follow specific route and sailing conditions. The vessel needs to follow a straight-line course achieving the required distance at CPA. The starting point of the run is twice the Data Window Length (DWL) before the CPA. The ending point of the run is twice the DWL after the CPA. The vessel shall have achieved the required running conditions from the start. The vessel shall maintain constant speed, fixed machinery conditions and minimum use of helm to maintain course until the ending point of the run (Figure 7). The vessel must make a certain number of runs to obtain a noise measurement. For Grade A, six runs are required, three on each side of the vessel, alternating port and starboard sides. For Grade B, four runs are required, with two on each side, and for Grade C, four runs are required, with one at least on each side.

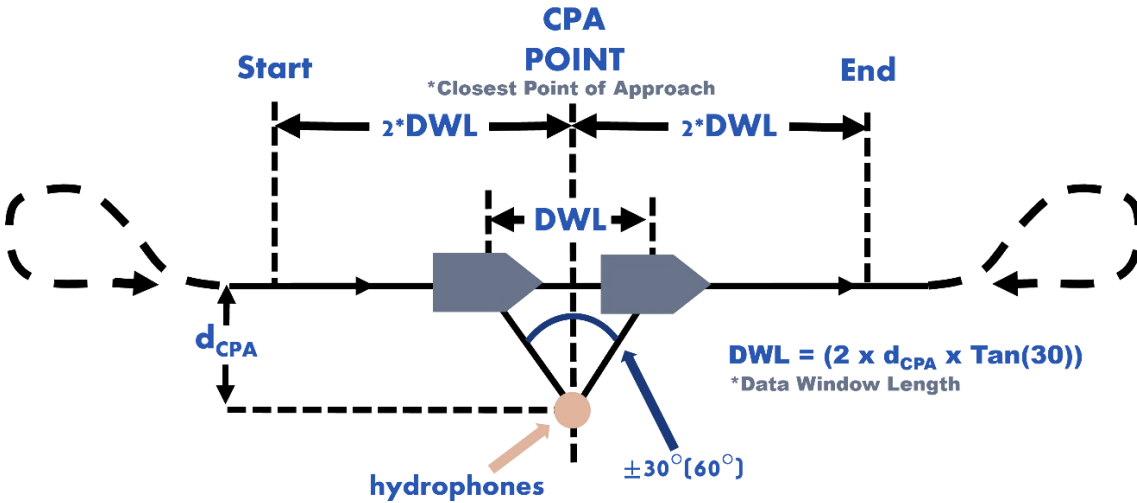


Figure 7. Run Standard's recommendation. The vessel follows a straight-line course, the starting point of the course being twice the Data Window Length before the CPA, same as the ending point.

1.4.1.2 Practical implementation, the MARS station

The MARS station was designed to operate over several years and collect underwater noise measurements from vessels without interfering with their commercial activity. The MARS station therefore had two specific features: 1) Several successive arrays, to collect several measurements in a single run, which limits operational constraints for vessels and 2) Multiple deployments and recoveries, for reasons of station shutdown in winter, and maintenance requirements.

In this section, we review the key points of the standard applied to the MARS station and the criteria that have been modified.

Instrumentation: The MARS station consists of multiple three-hydrophone arrays, deployed at depths of 80, 173 and 300 m to achieve the angle of measure of Grade A and B in the standard. All hydrophones are omni-directional. The acoustic data were recorded by AURAL M3 acoustic recorders, developed by Multiélectronique, using a gain of 18 dB and an acquisition scale $\pm 2,5$ V on 24 bits. Geospectrum GTI M36-100 hydrophones were used

which are omnidirectional over the 20 – 10 000 Hz band and have been factory calibrated prior to deployment (see appendix I, Table A I). The sampling frequency of the recordings was 16 kHz in 2022, and 32 kHz in 2023. The location of each hydrophone at the base of the array is estimated after deployment by triangulation of the acoustic release system, located at the bottom of the array, with an error of over 6 m after triangulation of array position (i.e., 2% of the distance to CPA). The displacement of the hydrophones due to the tilt of the array creates additional uncertainty. Since the average tilt measured by several arrays is 6°, the horizontal deviation of the Top hydrophone can be as much as 25-30 m.

Environmental measurement conditions: The MARS station is located in the Lower St. Lawrence Estuary off Rimouski at depths of 310 to 350 m (Figure 5 B). The wind speed at the time of measurement were checked with the data from PMZA-RIKI buoy to ensure that speed does not exceed 20 knots. It is an oceanographic buoy operated by Fisheries and Oceans Canada (Pêches et Océans Canada - Fisheries and Oceans Canada, 2023).

Vessel measurement protocol: The MARS station and the protocol provided to partner shipowners follow the recommended protocol (Figure 7). A Grade B vessel signature can be obtained from a movement along the upstream track in the St. Lawrence estuary, hence the interest in deploying four measurement arrays, two to the east for port measurement and two to the west for starboard measurement. Position data of the Automatic identification system (AIS) and the Global Positioning System (GPS) were used. GPS data collected on board the vessel were used for May and November 2023. For the rest, we use AIS data from the Canadian Coast Guard (CCG) and data from the AIS station operated by MTE.

1.4.1.3 Dedicated experiments

The R/V Coriolis II is a Canadian oceanographic research vessel built in 1990, measuring 49.95 meters in length, 11 meters in width, with a maximum draft of 5.5 meters. (Figure 8). The Table 2 provides a comprehensive overview of the vessel's propulsion, power supply, fuel and water capacities, as well as support equipment.

Table 2 : Description of the Coriolis II propulsion, power supply, fuel and water capacities, as well as support equipment.

Machinery	Descriptions
Main Engines	4 x Deutz SBV6M 628
Power	3,530 kW / 4,730 BHP
Auxiliary	3 x Caterpillar 3406C
Emergency Generator	1 x Mitsubishi 6D14T 80 kW 600V Self Starting unit
Bow Thruster	Ulstein Marine 500 TT — 298 kW
Propulsion	2 x Kamewa CPP 2.5 m in diam
Rudders	Twin
Fuel Capacity	145 m3 @ 95% capacity
Portable Water Tank	18.2 m3
Non-Portable Water Tank	1.5 m3
Water Maker	1 x Reverse Osmosis
Daily Production	10,000 litres/day
Hydraulic Units	3 power packs, 15 GPM, 3000 psi and 2 power packs Flow 60 GPM, 2000 psi

Several measurement campaigns were carried out for the deployment and recovery of hydrophone triplets. I took part in the recovery missions in October 2022 and November 2023, as well as in the deployment mission in May 2023. Six experiments was carried out, where repeated transits were made in front of the MARS station, following the trajectory described by the standard (ANSI/ASA S12/64 2009) (Figure 7), with instructions to sail at a speed through water (STW) of 10 knots and at a distance to the arrays of 300 m. The resulting complete dataset comprises 55 transits (15 in 2022 and 40 in 2023) (Table 3), each experiment consists of a series of transits in front of one array (2 for W subset 2022). Each

subset was collected by an independent array, having at least been recovered and re-deployed for maintenance purposes.



Figure 8. Photo of research vessel R/V Coriolis II © Guillaume St-Onge, and B. Photo of an acoustic measurement array of MARS station deployed during the R/V Coriolis II mission in May 2023.

Table 3. Description of R/V Coriolis II missions in front of the MARS station arrays. The name of the experiment, targeted arrays, number of transits, Speed Trough Water (STW) in knot, and distance (m) from the array are indicated.

Experiment name	Hydrophone array	Number of transits	STW (knot)	CPA (m)
W subset 2022	W1 and W2	5 and 5	9-11	300 m ($\pm$ 100 m)
W2 October 2022	W2	5	9-11	
E1 November 2023	E1	13	10-12	
W1 May 2023	W1	6	9.5-11.5	
W1 July 2023	W1	10	9-11	
W1 November 2023	W1	11	8-9	

1.4.2 Acoustic data processing

1.4.2.1 Quality check

We visually analyzed the spectrograms to assess the quality of the data and detect potential issues such as flow noise, mooring self-noise and noise from a nearby vessel. The spectrogram is a two-dimensional representation of the acoustic signal as a function of time and frequency. Spectrograms were made using Matlab's *spectrogram()* function (R2021b) with 2-second Kaiser windows, a Beta parameter of 18.8773 and an overlap of 50%. The frequency range is between 10 and 50,000 Hz (Figure 9). The W2-Bottom hydrophone in 2022, the top hydrophone of W1 in May and W1 in November arrays in 2023 showed significant noise contamination at low frequency (<100 Hz).

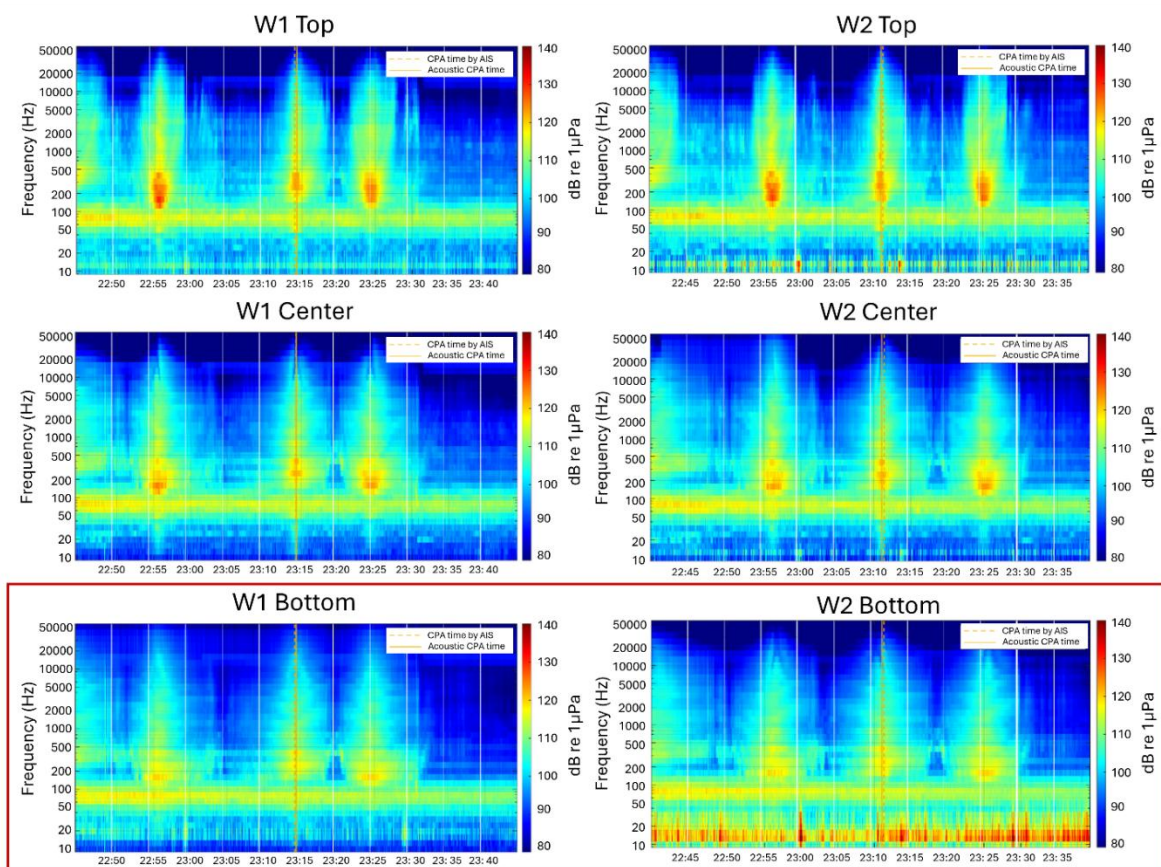


Figure 9. Spectrograms of three transits from the R/V Coriolis II measured by the W1 and W2 arrays in May 2022. The red box highlights the noticeably higher low-frequency noise measured by the Bottom W2 hydrophone.

Concerning the background noise, the standard discards measurements with signal-to-noise ratio below 3 dB and removes the noise contribution when between 3 and 10 dB. The MARS project can't usually do this, as vessels are very rarely stationary before passing arrays. The noise caused by the vessel at a distance from the array is indistinguishable from the background noise. It is therefore not possible to make the correction required by the standard.

We performed an Analysis of variance (ANOVA), after checking the conditions of use (independent data and normality of the residuals), to confirm that there was a significant difference between the noise levels of the different hydrophones (p -value < 0.05). Student's

t-tests then allowed pairwise comparisons of the means of each hydrophone, thus showing a significant difference in low frequency (between 20 and 100 Hz) for the bottom hydrophone. Low frequencies (10 – 100 Hz) from hydrophones mentioned above (W2-Bottom in 2022 and W1-top in May and November arrays in 2023) have therefore been removed from the following analyses.

1.4.2.2 Acoustic signature – Monopole Source Level (MSL)

We calculated source levels using the monopole source level (MSL) metric, representing the vessel as an omnidirectional punctual source and providing the sound level at 1 m on third-octave frequency bands. Frequency dependent propagation loss between the source and receiver are accounted for by applying the wavenumber integration propagation model SCOOTER (F. B. Jensen et al., 2011). A MSL spectrum was automatically calculated for each run and for each hydrophone following the grade A requirements of the ANSI / ASA 2009 S12.6410 standard (Mercure-Boissonnault et al., 2023). This automatic processing of the acoustic signatures was one of the main deliveries of the MARS project. The available frequency range was limited to 35 - 500 Hz.

Source levels are expressed in dB re 1µPa @ 1 m, on third-octave levels ranging from 35 to 500 Hz. For each run, the source level measured by a three-hydrophone array is calculated as the power average of the source levels measured by the three hydrophones (Accredited Standards Committee S12, 2019):

$$SL_{array} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 10^{\frac{SL_{hydrophone,i}}{10}} \right), \quad (1)$$

where SL_{array} are the source levels averaged on the hydrophone array, and $SL_{hydrophone}$ the source levels at each hydrophone of the array.

When building a source level measurement from multiple runs, the array-measured source levels are arithmetically averaged to determine the final source level value:

$$SL_n = \frac{1}{n} \sum_{run=1}^n SL_{run} , \quad (2)$$

where n is the number of array spectra considered.

1.4.3 Comparative analysis, measurement uncertainty

Using our dataset of 55 runs measured from R/V Coriolis II, we can quantify measurement uncertainties without inter-vessel variability and thus evaluate the performance of several measurement protocols (Accredited Standards Committee S12, 2019) and the influence of using several measurement arrays simultaneously. To quantify this uncertainty, we use the notion of repeatability.

1.4.3.1 Repeatability

Repeatability informs us of the dispersion of successive measurements made with the same measurement method and in the same conditions. Repeatability is characterized by the dispersion of measurement results and can be expressed, for example, by the variance or the standard deviation, or any other statistical parameter characterizing the dispersion of results (Gauchi, 2000).

In this study, the repeatability (R) within a set of measurements is the standard deviation (σ_{SL}) of all source level measured averaged on the frequency axis on the third octave spectrum (31.5-500 Hz) (MacGillivray et al., 2023):

$$\sigma_{SL}(f) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (SL_i(f) - \mu(f))^2} , \quad (3)$$

where σ_{SL} is the standard deviation of all runs SL_i measured by one array for a given frequency f and μ is the mean of all spectra. The repeatability R is obtained by:

$$R = \frac{\sum_f \sigma_{SL}(f)}{N_f}, \quad (4)$$

where N_f is the number of frequencies bands.

1.4.3.2 Measurement scenarios

We evaluated the measurement uncertainty for three scenarios, following grades A and B recommendations from the standard, and representative of the primary usage of the MARS station.

a) SCENARIO A – UNIQUE AND MULTIPLE INDEPENDENT ARRAYS, SINGLE TRANSIT

a.1) Unique arrays, single transit

Commercial vessels in operation cannot disrupt their route to repeat multiple transits in front of an array. This scenario evaluates the repeatability obtained when using a single measurement. We consider repeated measurements of R/V Coriolis II collected by each array as a separate dataset (Table 4).

a.2) Multiple arrays, single transit

Long-term presence of instruments at sea requires multiple recovery and deployment operations for maintenance purposes, including battery change and data access. Maintenance operations over the long-term result in modifications of the arrays. Each new deployment of an array introduces new uncertainties like the array positioning. We considered each array operation period, from deployment to recovery, as an independent array. We calculated repeatability over the global dataset (55 transits, six arrays), to understand the effects of array using multiple independent arrays on the measurement uncertainty (Table 4).

a.3) Successive array, single transit

MARS was designed using multiple successive arrays, to collect several measurements during a single transit. R/V Coriolis II transited n times in front of two arrays situated 600 m

away from each other (W 2022 subset, Table 4). We quantified the differences between W1 and W2 quasi-identical measurements (same vessel, quasi-simultaneous, similar CPA distance, same side). We compared the repeatability obtained for each W1 and W2 subsets, to quantify the repeatability gain of using 2 successive arrays instead of one.

b) *UNIQUE AND MULTIPLE INDEPENDENT ARRAYS, MULTIPLE TRANSITS*

To quantify the effects of the number of measurements on uncertainty, we assess repeatability of signatures obtained from 2, 4 (grade B) and 6 (grade A) transits, for each dataset with a sufficient number of available transits (Table 4). The grade A subset consists of three grade A signatures, one for each of the experiments W1 May 2023, W1 November 2023 and E1 November 2023. Unfortunately, we can obtain just one repeatability for the A grade for one array (E1 November 2023), as we only have one measurement of three starboard and three port transits for the rest of the arrays studied. The grade B subset consists of seven grade B signatures, three for array E1 November 2023, two for array W1 July 2023 and two for array W1 November 2023. Finally, we evaluate the repeatability of signatures arising from a starboard and a port transit. This is a degraded measure of grade B. With enough measurements, we can calculate repeatability for all arrays.

It is worth noting that our data set did not provide enough observations to assess the repeatability of grade A or B signatures collected with the same array.

c) *SINGLE HYDROPHONE*

We investigated the performance of a simplified measurement infrastructure by evaluating the repeatability using single-hydrophone arrays (Table 5). We calculated individually the repeatability of each run measured by one hydrophone. We assessed the repeatability for each hydrophone position - Center, Bottom and Top.

Table 4. Repeatabilities observed for each dataset and scenario. The number of measurements used to calculate repeatability is in brackets (n). Scenario a: One transit = one measurement. Scenario b: Several transits = one measurement.

Study cases		Scenario a	Scenario b		
			Grade A	Grade B	Under Grade
One array	W1 2022	2.5 dB (5)	N/A	N/A	2.6 dB (2)
	W2 2022	2.3 dB (5)	N/A	N/A	2.4 dB (2)
	W2 October 2022	2.0 dB (5)	N/A	N/A	2.1 dB (2)
	E1 November 2023	3.7 dB (13)	3.1 dB (2)	3.5 dB (3)	3.7 dB (6)
	W1 May 2023	0.9 dB (6)	N/A	N/A	0.9 dB (3)
	W1 July 2023	2.4 dB (10)	N/A	2.2 dB (2)	2.4 dB (5)
	W1 November 2023	2.6 dB (11)	N/A	2.2 dB (2)	2.5 dB (5)
Simultaneous measurements	W successive 2022	0.8 dB (5)	N/A	N/A	N/A
Independant measurements	All	3.3 dB (55)	2,7 dB (3)	2,9 dB (11)	3.2 dB (27)

1.5 RESULTS

In this section, we look at the effects of the 3 scenarios on the repeatability of the R/V Coriolis II vessel's radiated noise measurement. Each sub-section deals with a different scenario.

1.5.1 Scenario a: Unique and multiple arrays, single transit

1.5.1.1 Unique arrays, single transit

Repeatability was calculated for each of the seven subsets (Table 4 Scenario a). This result highlights the ability of an array to obtain the same spectrum for one vessel. The measurement repeatability varied from 0.9 dB to 3.7 dB between the seven arrays considered. (Table 4)

1.5.1.2 Multiple arrays, single transit

We can see the median spectrum of the six independent arrays (Figure 10). Putting together the 55 measurements taken in front of all the arrays, we obtain an overall repeatability of 3.3 dB. Here we have the total repeatability of a dataset with different equipment, which increases our uncertainties between arrays deployment and recovery.

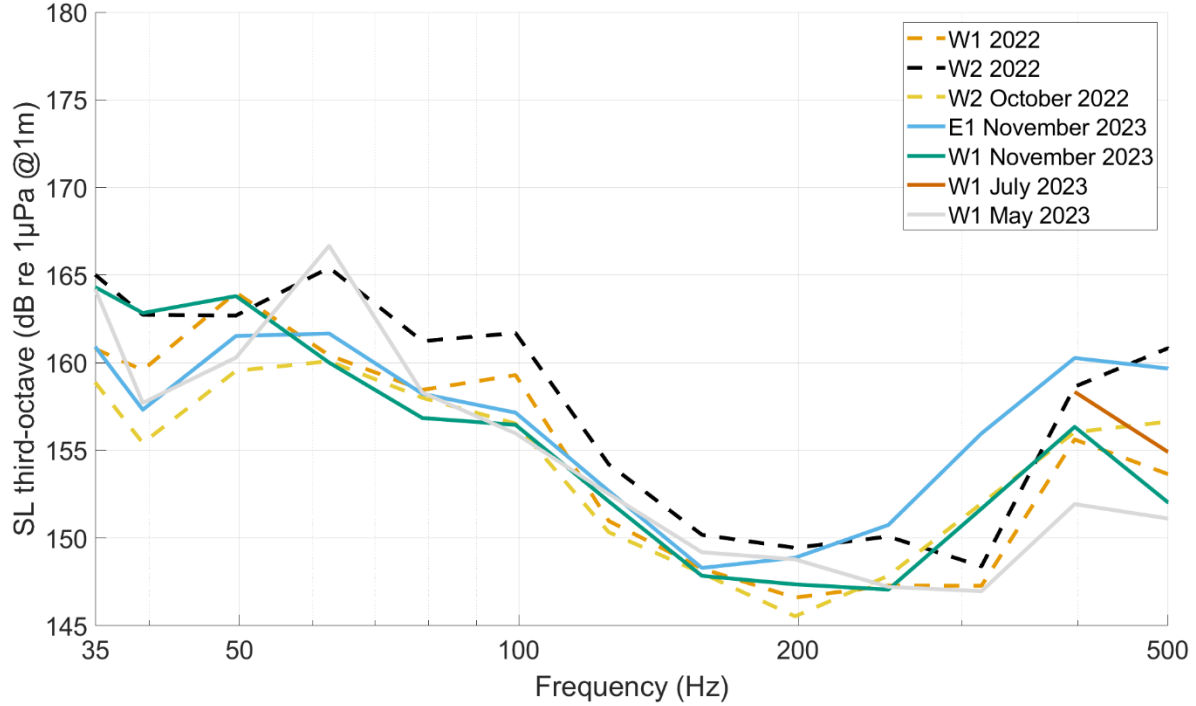


Figure 10. Median of all transits at 10 knots and between 200 and 400 m in front of the 7 independent arrays. Measures for 2022 are dotted lines, while those for 2023 are solid lines.

The analysis of subset W shows the difficulties associated with using several different arrays. The measurement uncertainty induced using several independent arrays could be due to a positioning error in our array of three hydrophones. This observation can be confirmed by comparing simultaneous measurements taken by two arrays (Figure 11). This difference is based on all the measurements taken simultaneously in front of W1 and W2 May, i.e. 10 runs. the W2 measurement was higher than the W1 measurement. The difference between simultaneous measurements from W1 and W2 arrays available in the W2022 dataset has a median value, averaged on the whole spectrum, of 1.1 dB.

There is also a noticeable difference between the independent measurements from W2 May and W2 October 2022. The W2 October 2022 measurement is much closer to the W1 May 2022 measurement. This suggests that the measurement in front of W2 May is indeed overestimated with the positioning error. Going back to the repeatability results for the seven arrays, if we disregard the spectrum, the dispersion between the median values of all other

arrays is noticeably smaller (<2 dB) in the 80 – 200 Hz band and reaches a maximum of 9 dB at 400 Hz.

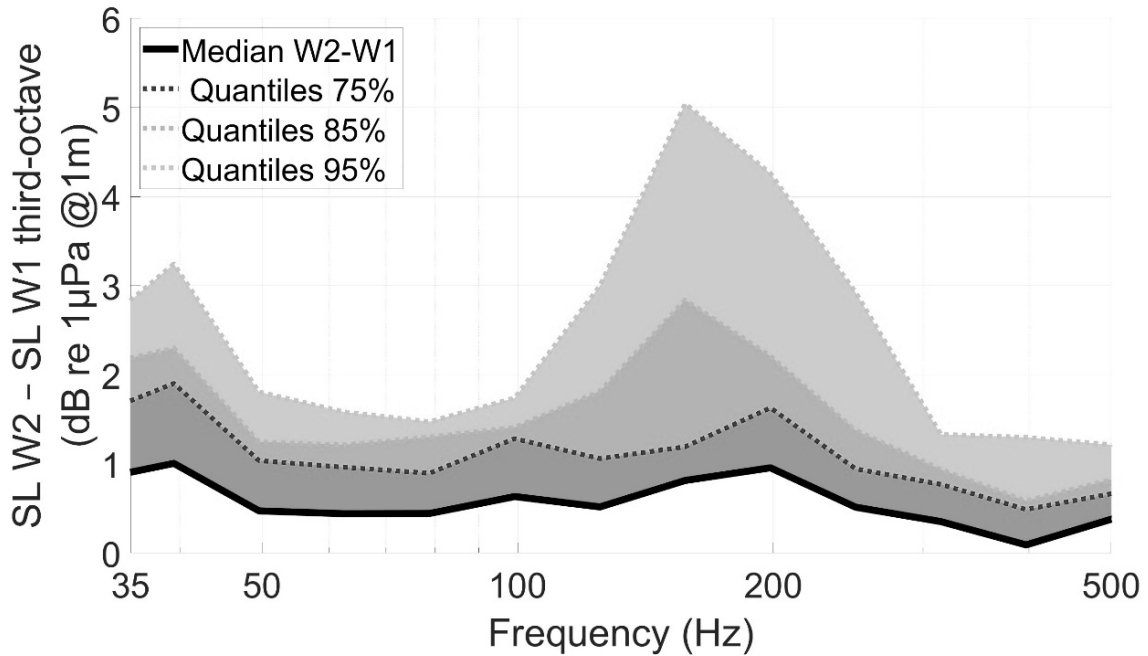


Figure 11. Distribution of the absolute difference between W2 and W1 MSL spectra over the 10 runs and above the median. 75th, 85th and the 95th percentiles are shown in dotted lines.

1.5.1.3 Successive arrays, single transit

During the Coriolis II deployment mission in 2022, the vessel made ten runs in front of two arrays. The W1 and W2 arrays were close together and each run transits in front of the two arrays almost simultaneously. The measurement conditions were identical. The observation's group called W subset 2022 consists of 10 runs, 5 by W1 2022 and 5 by W2 2022. The repeatability is equal to 2.1 dB. The successive arrays scenario is that a spectrum is the result of the two arrays, taking the average of 5 run (W1 and W2 2022). We improved the value from 2.1 dB to 0.8 dB (Figure 12). This highlights the performance gain associated with the use of two successive arrays in a single run, with a similar measurement time taken.

It should be noted that the overestimation of noise by W2, discussed in 1.5.1.2, influences the absolute values of each subset.

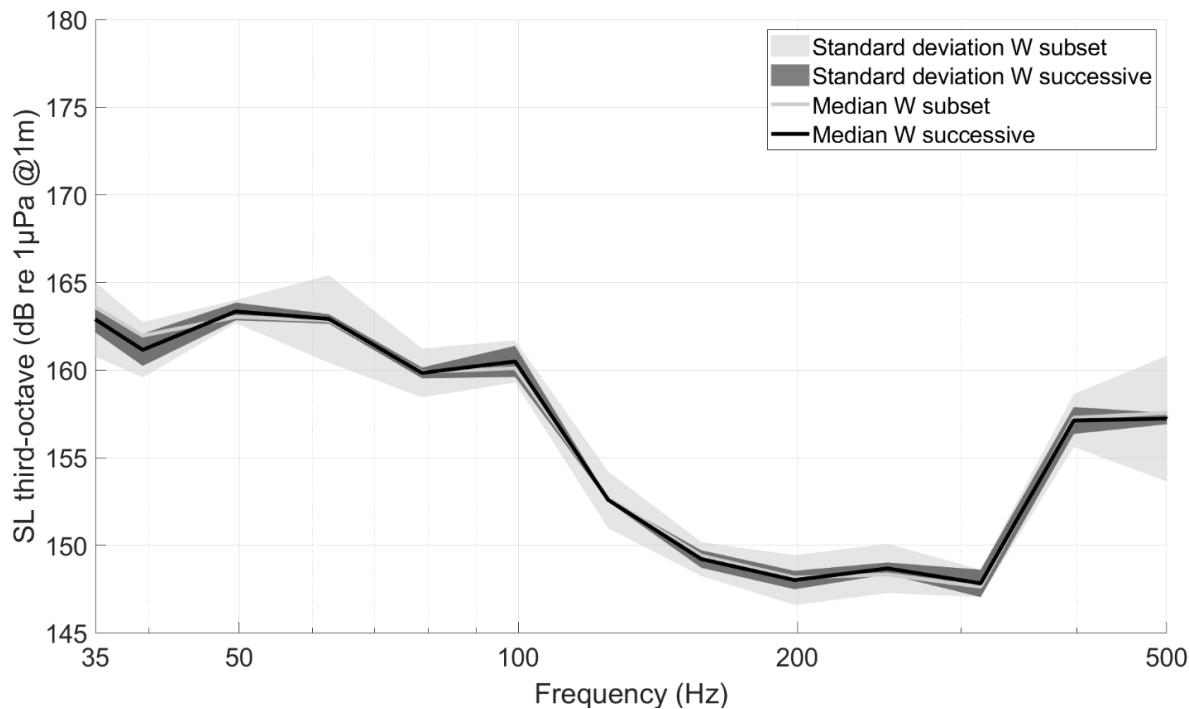


Figure 12. Median run of successive array in black and W subset in grey. The patches represents the repeatabilities of both subsets observed on each third-octave band.

1.5.2 Scenario b: Unique and multiple arrays, multiple transits

1.5.2.1 Unique arrays, multiple transits

For each array, when the number of transits was sufficiently high, it was possible to calculate a repeatability for a given array according to grade. The repeatability values for each array are shown in Table 4. A repeatability could thus be calculated according to grade A for E1 November, which has a total of 2 signatures, each with 3 starboard and 3 port transits. The same was done for grade B for certain arrays, for which at least 2 signatures could be calculated, each with 2 starboard and 2 port transits. Finally, for the under grade,

we were able to calculate the repeatability for each array, calculating signatures with 1 starboard and 1 port transits..

1.5.2.2 Multiple arrays, multiple transits

We measured MSL signatures for the R/V Coriolis II following Grade A protocol for each available subset (Table 4 Scenario b). The dispersion between the three MSL measurement is noticeably small (<2 dB) in the 80 – 200 Hz band and reaches a maximum of 8.2 dB at 400 Hz (Figure 13 A). The mean repeatability observed on the whole spectrum for the Grade A subset is 2.7 dB. Concerning Grade B protocol, the dispersion between the 11 MSL measurements (Table 4) is noticeably small (<2 dB) in the 80 – 200 Hz band (Figure 13 B). It reaches a maximum of 12 dB at 400 Hz. The mean repeatability observed on the whole spectrum for the Grade B subset is 2.9 dB. Concerning the under Grade we put in place, we obtain a repeatability of 3.2 dB.

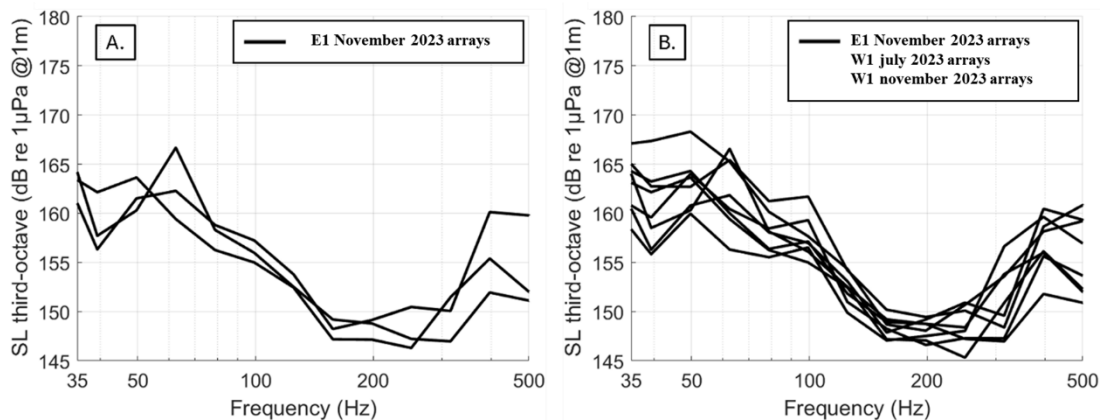


Figure 13. Spectra calculated from three arrays on the oceanographic vessel R/V Coriolis II using Grade A (A.) and Grade B (B.) protocols.

1.5.3 Scenario c: Single hydrophone

Repeatability of the run observed using only one hydrophone per array has been listed (Table 5). The total repeatability of the six independent arrays for each of the bottom, center

and top hydrophones is 5.8 dB, 4.3 dB and 7.7 dB respectively. It is important to specify that the repeatability observed is over a total of 55 measurements, by 6 independent arrays, bottom, center or top hydrophones only. When grouping the hydrophone measurements from each array together, the bottom hydrophone measurements of the six independent arrays are combined. This approach is used to calculate the repeatability of a general bottom hydrophone. However, such grouping introduces greater uncertainty to the repeatability of the specific hydrophone being studied. The large values obtained for each hydrophone show the importance of position and temporality, since measurements from each hydrophone independently of the array have better repeatability (Table 5).

Table 5. Repeatability (in dB) for each hydrophone Bottom, Center and Top for the scenario c. The overall repeatability of each array is also mentioned.

Experiment name	Bottom	Center	Top	Overall
W subset 2022	3.0	2.7	2.8	2.1
W2 October 2022	1.8	2.2	2.4	2.0
E1 November 2023	4	4	4.7	3.7
W1 May 2023	1.1	1.0	1.7	0.9
W1 July 2023	2.4	1.8	1.5	2.4
W1 November 2023	1.3	3.6	6.1	2.6
W successive 2022	2.5	2.4	3	0.8

1.6 DISCUSSION

1.6.1 Repeatability

Describing and quantifying uncertainties in acoustic signature measurements is of the highest importance in understanding the comparability of data collected over different locations and by various recording infrastructures. The variability inherent in these measurements must be controlled to provide reliable analyses (Vendittis & Arveson, 2022).

For the sake of consistency, we have used the same terms as those used by MacGillivray (MacGillivray et al., 2023) . In this study, we use repeatability as a quantified indicator of the variability expected within a series of measurements carried out according to a specific protocol and measurement setup. Repeatability is a key criterion for assessing the reliability of a measurement system.

We are interested in comparing measurements of the same vessel signature. The importance lies in the significance of the differences observed. Repeatability is a tool to answer this question. Good repeatability means low variations between measurements. Here, the closer the repeatability value is to 0 dB, the more confidence we can have in the quality of the measurements. On the other hand, the higher the repeatability value, the greater the uncertainty in the results, calling into question the instrument's ability to provide representative data. This increased uncertainty reduces confidence in the use of measurements for analysis or decision-making.

The two simulated scenarios highlight several real-life use cases and constraints. The first scenario deals with the situation where vessels would only transit once in front of one or several arrays. In the first case, where there is only one transit in front of an array, this simulates the constraint where merchant vessels in a real situation cannot interrupt their route to conduct several transits in a row, as required by the standard. The second case addresses the constraints associated with long-term monitoring, requiring arrays to be recovered and re-deployed for maintenance. Hence the interest in analyzing arrays independently. The second scenario focuses on the uncertainties inherent in each array, depending on the number of measurements available.

1.6.1.1 Ability to compare multiple measurements from one station.

The two scenarios each comprise two study cases (Table 4). In the cases where we are looking at repeatability for a given array (Table 4 study case one array), we can compare the vessels with each other during a season when there are no changes to the station.

The repeatability obtained for each array identifies the threshold that should be exceeded for a change in vessel speed or adjustment of engine, propeller or transmission were to be detected with confidence. The obtained repeatability gives us confidence thresholds in tests of operating conditions that perform measurements several times between two maintenance operations (Table 4 study case one array, scenario a).

The first case study in the second scenario looks independently at each measurement array and reveals the confidence for each of them (Table 4 study case one array, scenario b). This makes it possible to compare a vessel under varying navigation conditions. For example, by knowing the repeatability limits for each station, we can understand whether changes in the speed of the same vessel, when it makes several passes in succession, can have an impact on the noise level measured.

1.6.1.2 Ability to compare measurements from independent stations.

The second study case of each scenario looks at the measurement from independent stations. This case concerns more specifically the study of the long-term evolution of noise radiated by the fleet. Transport Canada is paying particular attention to the knowledge of noise emitted by its fleet and would like to observe long-term variations. For example, the application of new regulations or innovative technologies could be observed. The repeatability values obtained may also indicate a major modification to a vessel. Indeed, a hull modification such as the application of a new noise-reducing paintwork (Gaier et al., 2022) or the installation of new propeller technology (Guy et al., 2024; Hayman et al., 2000; Leaper et al., 2014) can take a long time. Arrays cannot remain deployed for very long, as hydrophones are battery-limited and therefore require maintenance. This would mean modifying the array.

We studied six independent arrays, each with different repeatability values. When we combined the data from all arrays, repeatability amounted to 3.3 dB, highlighting the challenges associated with integrating measurements from different conditions. Although we have restricted the range of speed and distance to the CPA, some uncertainty in the sound

level estimates remains due to experimental factors that are difficult to control. It is unlikely to achieve 1 dB repeatability for vessel sound level measurements, even under ideal conditions (Vendittis & Arveson, 2022). It is essential, for example, to consider the uncertainty associated with the positioning of the array and the distance between them, as this can influence the results. In addition, propagation loss plays a significant role in data analysis. In the acoustic propagation model we used, the distance between the noise source and the hydrophones is crucial in assessing the sound level received. Sound propagates through water with attenuation due to energy dissipation and propagation loss. A positioning error can therefore distort the estimated distance, affecting sound measurements. For example, a recorder too close to the source may overestimate the noise, while one too far away may underestimate it. In this way, distance uncertainty directly influences the reliability of propagation model results. Moreover, the acoustic properties of the seabed (geoacoustics) often vary with position, influencing the way sound propagates (MacGillivray et al., 2023).

As for the dispersion of the data obtained in this scenario, it seems comparable to that of Grade A and Grade B in the second scenario. This similarity is pointing out that similar variations in vessel noise levels are common across diverse types of measurements (Wales & Heitmeyer, 2002). Repeatability targets, according to established standards, is 1.5 dB for Grade A and 3.0 dB for Grade B (Accredited Standards Committee S12, 2019). The results obtained for Grade B are satisfactory, with repeatability measured at 2.9 dB (Table 4, study cases independent array, scenario b). By contrast, the results for Grade A are above the 1.5 dB target, with a value of 2.7 dB. It is important to note that these repeatability values come from only 3 spectra recorded from 2 different arrays, which may introduce some variability into the final result.

1.6.1.3 Low-cost measurement

According to the results obtained from the single-hydrophone analysis, the Center hydrophone has better repeatability than the others, especially the Top hydrophone. However, according to some articles, it is more efficient to conduct measurements close to

the bottom (Ainslie et al., 2022). This is because far-field results offer greater reliability, avoiding acoustic interference that can distort the data. That said, it should be noted that this method remains less reliable than the use of three combined hydrophones. Indeed, the use of hydrophones positioned at different depths helps to attenuate fluctuations caused by acoustic interference, resulting in more accurate estimates of source sound levels. The quantification of the degradation of the repeatability with simplification of the setup is a first step towards the definition of low-complexity guidelines, which would optimize the cost-effectiveness of limited precision measurements.

1.6.2 Recommendations for improved measurement quality and robustness

Hardware redundancy, i.e., deploying two identical arrays at the same site, allowed us to sustain high quality measurement. The successive array enabled us to identify measurement errors (Figure 11), but also to make the measurement more reliable (Figure 12). The repeatability achieved using the double array dataset, 0.8 dB (Table 4), demonstrates the gain of using multiple successive arrays. It averages the variability of self-noise, reducing the variability of measured noise levels. It improves the measurement repeatability significantly without adding any complexity for the vessel's measurement protocol. The addition of such an array incurs an operational cost that is offset by the reduced vessel time required for the measurements since measurement on an array suite is made more efficient than a single measurement from an independent array. The MARS station was designed with this efficiency in mind, employing two arrays on the starboard side and two on the port side. This configuration enables four measurements per transit, enhancing the robustness and reliability of the results.

Using successive arrays means greater robustness in the face of hardware failures. While checking the spectrograms and analyzing the spectrum of the R/V Coriolis II vessel, we identified an issue with the W2 array. In fact, it showed a significant low-frequency self-noise in the bottom hydrophone in the 2022 dataset, masking the noise received from the vessel up to 100 Hz. In addition, we found that the average spectrum at this array was

overestimated. The spectrum obtained has higher sound level values than the average spectra of the other arrays, for most and particularly at high frequencies (Figure 10).

1.7 CONCLUSIONS

Repeatability values can be used to assess the ability of the measurement from a setup (infrastructure and protocol) to quantify small variations in vessel underwater noise, and therefore assess the efficiency of noise reductions initiatives, such as optimized operation conditions, vessel maintenance operations (repairs to the hull, machinery, propellers, etc.) or modification.

Using 55 measurements of RV Coriolis from 6 independent arrays over 2022 and 2023 identified the potential use of multiple measurement setups, and their expected repeatability. Two scenarios could be realized. The two scenarios differ in the number of transits completed. In the most realistic situation, the vessel cannot pass several times consecutively in front of a measurement array. Consequently, the first scenario simulates a single transit in front of one or more arrays, while the second scenario simulates several transits in front of one or more arrays. This second scenario highlights the accuracy of each measurement under the various grades prescribed by the standard. Each scenario includes different case studies.

A case study in which there is no maintenance of the station and only the influence of sailing conditions on the vessel's signature. This study provides a basic quantification of a fleet over one season. Repeatability up to 2.1 dB with single transits, can be lowered down to 0.8 dB by using two successive arrays.

A second case study considers the maintenance of arrays or their multiple locations. This case looks at the global fleet, multi-year trends, results of major maintenance or modification. To reduce the effort required for an optimal acoustic signature measurement, following the protocols outlined in the standard (Grade A and Grade B), it is possible to ensure an accurate long-term measurement at 3.3 dB by minimizing certain conditions.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce projet de maîtrise a permis de quantifier la qualité de mesure de différentes configurations d'antennes et protocole de mesures et a mis en évidence une très bonne qualité de mesure des antennes acoustiques MARS. Ce projet a également mis en avant deux cas possible d'optimisation de la mesure des navires. Ces constats ont été possibles grâce aux missions du navire de recherche R/V Coriolis II, qui a réalisé un total de 55 passages à une distance autour de 300 m des antennes étudiées de la station MARS et à une vitesse de 10 ± 1 nœuds.

La qualité de mesure des antennes de la station MARS a été évaluée. Elle s'est faite à partir de deux simulations de scénarios différents. Le premier scénario simule un passage comme une mesure du bruit rayonné de navire devant une ou plusieurs antennes alors que le deuxième scénario prend en compte plusieurs passages comme une mesure devant une ou plusieurs antennes en répondant aux grades du standard (Accredited Standards Committee S12, 2019). L'analyse de la qualité de mesure est ensuite faite selon deux cas de figures issus de ces deux scénarios. Le premier cas de figure s'intéresse à la répétabilité d'une seule antenne. Ce cas cible le seuil d'altération du niveau de bruit causé par un changement de vitesse ou d'un réglage du moteur et de l'hélice, s'il n'y a pas de maintenance de l'appareil de mesure. Le deuxième cas de figure s'intéresse quant à lui à la répétabilité de plusieurs antennes indépendantes. Ce cas a pour but de mesurer de manière précise la flotte mondiale, d'évaluer l'impact des mesures d'atténuation et de constater une modification majeure du navire sur son niveau de bruit selon les bandes de fréquences.

Pour répondre à ces évaluations, les répétabilités du niveau de bruit rayonné sur les passages du navire ont été calculées. Ces répétabilités donnent des indications sur la fiabilité d'un système de mesure étant donné qu'elles correspondent à la variabilité d'une série de mesures selon un protocole fixe.

Tout d'abord, dans le cas où les antennes ne subissent pas de maintenance, et qu'il n'y a qu'une mesure du bruit rayonné par le R/V Coriolis II, les répétabilités de la mesure sont assez bonnes, allant de 0,9 dB à 3,7 dB.

Ensuite, les répétabilités ont été calculées, toujours dans le cas où il n'y a pas de maintenance des antennes mais où plusieurs passages correspondent à une mesure du bruit rayonné par le R/V Coriolis II, selon le Grade A, Grade B du protocole (Accredited Standards Committee S12, 2019) et un sous-grade simulé dans cette étude. Une seule répétabilité sous le grade A a pu être calculée pour une antenne. Cette répétabilité est de 3,1 dB. Pour le grade B, la répétabilité a été calculée pour trois antennes et varie entre 2,2 dB et 3,5 dB. Enfin, si on regarde la répétabilité pour le sous grade qui ne prend qu'un passage à tribord et un passage bâbord comme étant une signature du navire, on obtient des répétabilités allant de 0,9 à 3,7 dB. Ces valeurs de répétabilité ne diffèrent pas beaucoup des valeurs obtenues dans le premier scénario.

Puis, concernant les répétabilités en cas de maintenance des appareils de mesures, on observe une répétabilité de 3,3 dB dans le premier scénario et une répétabilité variant de 2,7 dB à 3,2 dB selon le grade de mesure dans le second scénario.

L'étude sur les antennes successives a permis de révéler deux cas d'optimisation de la mesure du bruit rayonné. Dans le premier cas, la mise en place d'antennes successives donne deux fois plus de mesures dans des conditions identiques. La répétabilité obtenue en doublant le nombre de passage pour une antenne améliore la fiabilité de la mesure et réduit l'incertitude de 0,4 dB. Dans le second cas, les antennes successives réduisent l'incertitude de 2,1 dB à 0,8 dB dans l'optique où une mesure sur la première antenne est similaire à la deuxième. La mise en place de deux antennes acoustiques est plus coûteuse sur le plan de la mise en œuvre et de l'installation mais ce coût peut être compensé par une réduction du nombre de passage à effectuer devant la station MARS pour les navires partenaires au projet.

Une idée de réduction de coût a été envisagée en diminuant le nombre d'hydrophones requis pour mesurer le bruit rayonné par les navires. En réponse à cette idée, la répétabilité a

été calculée pour chaque hydrophone individuellement. Finalement, les valeurs obtenues sont moins fiables lorsque la mesure est faite à partir d'un hydrophone qu'à partir de trois. Néanmoins, en regardant de manière individuelle, la mesure la plus fiable se ferait à partir de l'hydrophone du milieu.

Certaines limites subsistent dans les observations. En effet, plusieurs conditions n'ont pas pu être appliquées de manière similaire par rapport au standard (Accredited Standards Committee S12, 2019). Le bruit de fond et l'incertitude sur la distance à l'antenne peuvent modifier significativement la signature du navire (Urick, 1983). La distance est un paramètre important puisqu'elle est nécessaire dans le calcul du niveau de bruit reçu. Une erreur de positionnement peut donc fausser la distance estimée et influencer la mesure du bruit. Cette erreur sur la distance peut être causée par une incertitude sur le positionnement de l'antenne mais également sur le basculement des hydrophones causé par les courants et les vagues (Vendittis & Arveson, 2022). Quant au bruit de fond, ce dernier ajoute de l'incertitude sur la source exacte du bruit en masquant les niveaux reçus du navire. Dans notre étude, le rapport signal sur bruit (SNR) a été inspecté visuellement. La correction des niveaux de bruit entre 3 et 10 dB manque à l'étude pour une meilleure estimation du bruit du navire. Enfin, le calcul de répétabilité en cas de maintenance de l'appareil peut inclure des sources externes multiples pouvant causer une surestimation des niveaux de bruit à la source. Toutefois, il est peu probable d'obtenir une répétabilité meilleure que 1 dB pour les mesures du niveau sonore des navires même dans les meilleures conditions (Vendittis & Arveson, 2022).

Ces résultats sont finalement très encourageants et ont permis de mettre en évidence que la station MARS, par sa configuration, peut obtenir des mesures fiables sur la mesure des signatures de navires. En effet, d'après les résultats, le déploiement successif d'antennes apporterait une meilleure précision à la mesure finale. La station MARS théorique, dans sa conception, possède deux antennes successives pour chaque mesure tribord et bâbord du navire. Malheureusement, les quatre antennes n'ont jamais pu fonctionner simultanément, mais les résultats laissent à penser que cette conception est idéale pour des mesures plus précises dans l'avenir. Cependant, de nombreuses questions restent en suspens. Il serait

pertinent de mener d'autres études pour confirmer ces observations. La question de seuil de détection d'une amélioration technique sur le navire pour une réduction du niveau de bruit peut être étudiée ultérieurement. En effet, la cale sèche du navire de recherche R/V Coriolis II a revêtu une nouvelle couche de peinture innovante en 2024 qui a ainsi pour but de réduire la consommation de carburant mais aussi de réduire son bruit rayonné.

La mesure précise des signatures acoustiques de navires est essentielle dans la gestion et la protection des écosystèmes marins. En effet, l'évaluation des méthodes de réduction des bruits de navires en est dépendant. Plus les données sont fiables, plus facile est le ciblage de techniques comme l'isolation sonore ou la conception des navires à l'atténuation de l'impact du bruit émis. Il faut toutefois souligner que la précision de la mesure des signatures de navire, bien qu'elle soit recherchée, ne doit pas être considéré comme un objectif ultime. Des mesures moins exactes peuvent être suffisantes, tant qu'elles sont accessibles et applicables. Il faut trouver un équilibre entre précision et praticité dans l'analyse des signatures acoustiques.

ANNEXES

1.1 ANNEXE I

Table A I. Hydrophone sensitivity values at 100 Hz in 2022 and 2023. Values marked “None” correspond to arrays not studied in the present chapter.

	Sensitivity 100 Hz 2022	Sensitivity 100 Hz 2023
E2-Bottom	-174.4 dB re 1 V μPa^{-1}	None
E2-Center	-174,4 dB re 1 V μPa^{-1}	None
E2-Top	-174,5 dB re 1 V μPa^{-1}	None
E1-Bottom	None	-174,6 dB re 1 V μPa^{-1}
E1-Center	None	-174,5 dB re 1 V μPa^{-1}
E1-Top	None	-174,6 dB re 1 V μPa^{-1}
W1-Bottom	-174,3 dB re 1 V μPa^{-1}	-174,3 dB re 1 V μPa^{-1}
W1-Center	-174,4 dB re 1 V μPa^{-1}	-174,4 dB re 1 V μPa^{-1}
W1-Top	-174,4 dB re 1 V μPa^{-1}	-174,4 dB re 1 V μPa^{-1}
W2-Bottom	-174,6 dB re 1 V μPa^{-1}	None
W2-Center	-174,5 dB re 1 V μPa^{-1}	None
W2-Top	-174,6 dB re 1 V μPa^{-1}	None

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abrahamsen, K. (2012). The ship as an underwater noise source. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 17(1), 070058. <https://doi.org/10.1121/1.4772953>

Accredited Standards Committee S12. (2019). *ANSI/ASA S12.64-2009/Part 1 (R2019) : Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships—Part 1 : General requirements*.

Ainslie, M. A. (2010). Propagation of underwater sound. In *Principles of Sonar Performance Modelling* (p. 439-512). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-87662-5_9

Ainslie, M. A., Martin, S. B., Trounce, K. B., Hannay, D. E., Eickmeier, J. M., Deveau, T. J., Lucke, K., MacGillivray, A. O., Nolet, V., & Borys, P. (2022). International harmonization of procedures for measuring and analyzing of vessel underwater radiated noise. *Marine Pollution Bulletin*, 174, 113124. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.113124>

Andrew, R. K., Howe, B. M., Mercer, J. A., & Dzieciuch, M. A. (2002). Ocean ambient sound : Comparing the 1960s with the 1990s for a receiver off the California coast. *Acoustics Research Letters Online*, 3(2), 65-70. <https://doi.org/10.1121/1.1461915>

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

Au, W. W. L., Pack, A. A., Lammers, M. O., Herman, L. M., Deakos, M. H., & Andrews, K. (2006). Acoustic properties of humpback whale songs. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 120(2), 1103-1110. <https://doi.org/10.1121/1.2211547>

- Bahtiarian, M. (2007). Measurement of vessel underwater noise, standard development status. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 121(5_Supplement), 3113. <https://doi.org/10.1121/1.4782058>
- Beauchamp, J., Bouchard, H., de Margerie, P., Otis, N., & Savaria, J. (2009). Recovery strategy for the blue whale (*Balaenoptera musculus*), Northwest Atlantic population. *Canada [FINAL]. Species at Risk Act Recovery Strategy Series. Fisheries and Oceans Canada, Ottawa.*
- Blaeser, S., & Struck, C. J. (2019). A history of ASA standards. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 145(1), 77-109. <https://doi.org/10.1121/1.5080329>
- Bobber, R. J. (1970). *Underwater electroacoustic measurements*. Naval research laboratory.
- Bowers, M. T., Friedlaender, A. S., Janik, V. M., Nowacek, D. P., Quick, N. J., Southall, B. L., & Read, A. J. (2018). Selective reactions to different killer whale call categories in two delphinid species. *Journal of Experimental Biology*, 221(11), jeb162479. <https://doi.org/10.1242/jeb.162479>
- Celi, M., Filiciotto, F., Maricchiolo, G., Genovese, L., Quinci, E. M., Maccarrone, V., Mazzola, S., Vazzana, M., & Buscaino, G. (2016). Vessel noise pollution as a human threat to fish : Assessment of the stress response in gilthead sea bream (*Sparus aurata*, Linnaeus 1758). *Fish Physiology and Biochemistry*, 42(2), 631-641. <https://doi.org/10.1007/s10695-015-0165-3>
- Cerchio, S., & Dahlheim, M. (2001). Variation in feeding vocalizations of humpback whales *megaptera novaeangliae* from southeast alaska. *Bioacoustics*, 11(4), 277-295. <https://doi.org/10.1080/09524622.2001.9753468>
- Chahouri, A., Elouahmani, N., & Ouchene, H. (2022). Recent progress in marine noise pollution : A thorough review. *Chemosphere*, 291, 132983. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132983>

Chapman, N. R., & Price, A. (2011). Low frequency deep ocean ambient noise trend in the Northeast Pacific Ocean. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 129(5), EL161-EL165. <https://doi.org/10.1121/1.3567084>

Chion, C., Turgeon, S., Michaud, R., Landry, J.-A., & Parrott, L. (2007). Portrait de la navigation dans le parc marin du Saguenay–Saint-Laurent. *Caractérisation des activités sans prélèvement de ressources entre le 1er mai et le, 31*, 86.

Clark, C. W., Ellison, W. T., Southall, B. L., Hatch, L., Van Parijs, S. M., Frankel, A., & Ponirakis, D. (2009). Acoustic masking in marine ecosystems : Intuitions, analysis, and implication. *Marine Ecology Progress Series*, 395, 201-222. <https://doi.org/10.3354/meps08402>

Clark, J. A., & Tarasek, G. (2006). Localization of Radiating Sources along the Hull of a Submarine Using a Vector Sensor Array. *OCEANS 2006*, 1-3. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2006.307049>

Cox, T. M., Ragen, T. J., Read, A. J., Vos, E., Baird, R. W., Balcomb, K., Barlow, J., Caldwell, J., Cranford, T., Crum, L., D’Amico, A., D’Spain, G., Fernandez, A., Finneran, J., Gentry, R., Gerth, W., Gulland, F., Hildebrand, J., Houser, D., ... Benner, L. (2005). Understanding the impacts of anthropogenic sound on beaked whales. *J. Cetacean Res. Manage.*, 7(3), Article 3. <https://doi.org/10.47536/jcrm.v7i3.729>

Curé, C., Sivle, L. D., Visser, F., Wensveen, P. J., Isojunno, S., Harris, C. M., Kvadsheim, P. H., Lam, F.-P. A., & Miller, P. J. O. (2015). Predator sound playbacks reveal strong avoidance responses in a fight strategist baleen whale. *Marine Ecology Progress Series*, 526, 267-282. <https://doi.org/10.3354/meps11231>

Deecke, V. B., Slater, P. J. B., & Ford, J. K. B. (2002). Selective habituation shapes acoustic predator recognition in harbour seals. *Nature*, 420(6912), 171-173. <https://doi.org/10.1038/nature01030>

Di Franco, E., Pierson, P., Di Iorio, L., Calò, A., Cottalorda, J. M., Derijard, B., Di Franco, A., Galvé, A., Guibbolini, M., Lebrun, J., Micheli, F., Priouzeau, F., Risso-de Faverney, C., Rossi, F., Sabourault, C., Spennato, G., Verrando, P., & Guidetti, P. (2020). Effects of marine noise pollution on Mediterranean fishes and invertebrates : A review. *Marine Pollution Bulletin*, 159, 111450. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111450>

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), eaba4658. <https://doi.org/10.1126/science.aba4658>

Dudzinski, K. M., Thomas, J. A., & Gregg, J. D. (2009). Communication in Marine Mammals. In W. F. Perrin, B. Würsig, & J. G. M. Thewissen (Éds.), *Encyclopedia of Marine Mammals (Second Edition)* (Second Edition, p. 260-269). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-373553-9.00064-X>

Dunlop, R. A., Cato, D. H., & 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>

Edmonds, N. J., Firmin, C. J., Goldsmith, D., Faulkner, R. C., & Wood, D. T. (2016). A review of crustacean sensitivity to high amplitude underwater noise : Data needs for effective risk assessment in relation to UK commercial species. *Marine Pollution Bulletin*, 108(1), 5-11. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.05.006>

Eggleston, D. B., Lillis, A., & Bohnenstiehl, D. R. (2016). Soundscapes and Larval Settlement : Larval Bivalve Responses to Habitat-Associated Underwater Sounds. In A. N. Popper & A. Hawkins (Éds.), *The Effects of Noise on Aquatic Life II* (p. 255-263). Springer New York.

- Erbe, C., Duncan, A., & Vigness-Raposa, K. J. (2022). Introduction to Sound Propagation Under Water. In C. Erbe & J. A. Thomas (Éds.), *Exploring Animal Behavior Through Sound : Volume 1 : Methods* (p. 185-216). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-97540-1_6
- Erbe, C., Reichmuth, C., Cunningham, K., Lucke, K., & Dooling, R. (2016). Communication masking in marine mammals : A review and research strategy. *Marine Pollution Bulletin*, 103(1), 15-38. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.12.007>
- Erbe, C., Williams, R., Sandilands, D., & Ashe, E. (2014). Identifying Modeled Ship Noise Hotspots for Marine Mammals of Canada's Pacific Region. *PLOS ONE*, 9(3), e89820. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0089820>
- Ferrari, M. C. O., McCormick, M. I., Meekan, M. G., Simpson, S. D., Nedelec, S. L., & Chivers, D. P. (2018). School is out on noisy reefs : The effect of boat noise on predator learning and survival of juvenile coral reef fishes. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 285(1871), 20180033. <https://doi.org/10.1098/rspb.2018.0033>
- Filiciotto, F., Vazzana, M., Celi, M., Maccarrone, V., Ceraulo, M., Buffa, G., Arizza, V., de Vincenzi, G., Grammauta, R., Mazzola, S., & Buscaino, G. (2016). Underwater noise from boats : Measurement of its influence on the behaviour and biochemistry of the common prawn (*Palaemon serratus*, Pennant 1777). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 478, 24-33. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2016.01.014>
- Fournet, M. E. H., Matthews, L. P., Gabriele, C. M., Mellinger, D. K., & Klinck, H. (2018). Source levels of foraging humpback whale calls. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 143(2), EL105-EL111. <https://doi.org/10.1121/1.5023599>
- Francois, R. E., & Garrison, G. R. (1982). Sound absorption based on ocean measurements. Part II : Boric acid contribution and equation for total absorption. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 72(6), 1879-1890. <https://doi.org/10.1121/1.388673>

- Fratila, A., Gavril, I. A., Nita, S. C., & Hrebenciuc, A. (2021). The Importance of Maritime Transport for Economic Growth in the European Union : A Panel Data Analysis. *Sustainability*, 13(14), Article 14. <https://doi.org/10.3390/su13147961>
- Gaier, M., AlGermozzi, M., Ingham, R., & Rodionov, I. (2022). Using Paint to Reduce Underwater Noise for the Shipping Industry. *Paint & Coatings Industry* (February 7, 2022).
- Gassmann, M., Wiggins, S. M., & Hildebrand, J. A. (2017). Deep-water measurements of container ship radiated noise signatures and directionality. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 142(3), 1563-1574. <https://doi.org/10.1121/1.5001063>
- Gauchi, J.-P. (2000). *Estimation de la répétabilité et de la reproductibilité des mesures expérimentales. Utilisation des procédures VARCOMP et NESTED du logiciel SAS/STAT (version 6.12)* (p. 44) [Rapport technique]. auto-saisine.
- Guy, M.-A., Kesour, K., Robin, O., Gagnon, S., St-Jacques, J., Vulliez, M., Tremblay, R., & Marquis, J.-C. G. (2024). Effectiveness of standard mitigation technologies at reducing ships' machinery noise using a small-scale ship-like structure. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 54(1), 070001. <https://doi.org/10.1121/2.0001912>
- Hampton, L. D. (1967). Acoustic Properties of Sediments. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 42(4), 882-890. <https://doi.org/10.1121/1.1910662>
- Hawkins, A. D., & 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>
- Hayman, B., Dogliani, M., Kvale, I., & Fet, A. M. (2000). Technologies for reduced environmental impact from ships-Ship building, maintenance and dismantling aspects. *ENSUS-2000, Newcastle upon Tyne, UK*.
- 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>

Hu, M. Y., Yan, H. Y., Chung, W.-S., Shiao, J.-C., & Hwang, P.-P. (2009). Acoustically evoked potentials in two cephalopods inferred using the auditory brainstem response (ABR) approach. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 153(3), 278-283. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2009.02.040>

Indeck, K. L., Noad, M. J., & Dunlop, R. A. (2021). The conspecific avoidance strategies of adult female-calf humpback whales. *Behavioral Ecology*, 32(5), 845-855. <https://doi.org/10.1093/beheco/arab031>

Insley, S., Phillips, A. V., & Charrier, I. (2003). A review of social recognition in pinnipeds. *Aquatic Mammals*, 29(2), 181-201.

International standard - ISO. (2016). *ISO 17208-1:2016*. <https://www.iso.org/standard/62408.html>

International standard - ISO. (2019). *ISO 17208-2:2019*. <https://www.iso.org/standard/62409.html>

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

Jensen, F. B., Kuperman, W. A., Porter, M. B., & Schmidt, H. (2011). Wavenumber Integration Techniques. In F. B. Jensen, W. A. Kuperman, M. B. Porter, & H. Schmidt (Éds.), *Computational Ocean Acoustics* (p. 233-335). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8678-8_4

Jensen, F. H., Bejder, L., Wahlberg, M., Soto, N. A., Johnson, M., & Madsen, P. T. (2009). Vessel noise effects on delphinid communication. *Marine Ecology Progress Series*, 395, 161-175. <https://doi.org/10.3354/meps08204>

- Johnson, M., Madsen, P. T., Zimmer, W. M. X., Aguilar de Soto, N., & Tyack, P. L. (2004). Beaked whales echolocate on prey. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 271(suppl_6), S383-S386. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2004.0208>
- Jones, J. M., Thayre, B. J., Roth, E. H., Mahoney, M., Sia, I., Merculief, K., Jackson, C., Zeller, C., Clare, M., Bacon, A., Weaver, S., Gentes, Z., Small, R. J., Stirling, I., Wiggins, S. M., & Hildebrand, J. A. (2014). Ringed, Bearded, and Ribbon Seal Vocalizations North of Barrow, Alaska : Seasonal Presence and Relationship with Sea Ice. *Arctic*, 67(2), 203-222.
- Kesour, K., Camerin, P., Marquis, J.-C. G., & Gervaise, C. (2023). Assessment of Propeller Cavitation Inception Speed Based on Onboard Vibration and Underwater Acoustic Data. *Canadian Acoustics*, 51(3), Article 3.
- Kügler, A., Lammers, M. O., Zang, E. J., & Pack, A. A. (2021). Male Humpback Whale Chorus in Hawai‘i and Its Relationship With Whale Abundance and Density. *Frontiers in Marine Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.735664>
- Leeper, R., Renilson, M., & Ryan, C. (2014). Reducing underwater noise from large commercial ships : Current status and future directions. *Journal of Ocean Technology*, 9(1).
- législatifs, D. des services. (2024, juin 17). *Lois codifiées, Loi sur les espèces en péril*. <https://laws-lois.justice.gc.ca/fra/lois/s-15.3/index.html#hist>
- Lesage, V., McQuinn, I., Carrier, D., Gosselin, J.-F., & Mosnier, A. (2014). *Canadian Science Advisory Secretariat (CSAS) Exposure of the beluga (Delphinapterus leucas) to marine traffic under various scenarios of transit route diversion in the St. Lawrence Estuary*.
- Lin, T.-H., & Kawagucci, S. (2024). Acoustic twilight : A year-long seafloor monitoring unveils phenological patterns in the abyssal soundscape. *Limnology and Oceanography Letters*, 9(1), 23-32. <https://doi.org/10.1002/lol2.10358>

- Lovell, J. M., Findlay, M. M., Moate, R. M., & Yan, H. Y. (2005). The hearing abilities of the prawn *Palaemon serratus*. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 140(1), 89-100. <https://doi.org/10.1016/j.cbpb.2004.11.003>
- Lurton, X. (2002). *An Introduction to Underwater Acoustics : Principles and Applications*. Praxis Publishing Ltd. <https://books.google.com/books?id=VTNRh3pyCyMC>
- MacGillivray, A. O., Martin, S. B., Ainslie, M. A., Dolman, J. N., Li, Z., & Warner, G. A. (2023). Measuring vessel underwater radiated noise in shallow water. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 153(3), 1506-1524. <https://doi.org/10.1121/10.0017433>
- Madsen, P. T., Siebert, U., & Elemans, C. P. H. (2023). Toothed whales use distinct vocal registers for echolocation and communication. *Science*, 379(6635), 928-933. <https://doi.org/10.1126/science.adc9570>
- McCarthy, E. (2007). *International regulation of underwater sound : Establishing rules and standards to address ocean noise pollution*. Springer Science & Business Media.
- McCormick, M. I., Fakan, E. P., Nedelec, S. L., & Allan, B. J. M. (2019). Effects of boat noise on fish fast-start escape response depend on engine type. *Scientific Reports*, 9(1), 6554. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43099-5>
- McDonald, M. A., Hildebrand, J. A., & Wiggins, S. M. (2006). Increases in deep ocean ambient noise in the Northeast Pacific west of San Nicolas Island, California. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 120(2), 711-718. <https://doi.org/10.1121/1.2216565>
- Mellinger, D. K., & Clark, C. W. (2003). Blue whale (*Balaenoptera musculus*) sounds from the North Atlantic. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 114(2), 1108-1119. <https://doi.org/10.1121/1.1593066>
- Merchant, N. D., Pirotta, E., Barton, T. R., & Thompson, P. M. (2014). Monitoring ship noise to assess the impact of coastal developments on marine mammals. *Marine Pollution Bulletin*, 78(1), 85-95. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.10.058>

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

Mérindol, J., Cauchy, P., St-Onge, G., & Gervaise, C. (2023). Assessment of the St. Lawrence Estuary Soundscape. In A. N. Popper, J. Sisneros, A. D. Hawkins, & F. Thomsen (Éds.), *The Effects of Noise on Aquatic Life: Principles and Practical Considerations* (p. 1-15). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-10417-6_110-1

Miksis-Olds, J. L., Bradley, D. L., & Maggie Niu, X. (2013). Decadal trends in Indian Ocean ambient sound. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 134(5), 3464-3475. <https://doi.org/10.1121/1.4821537>

Miksis-Olds, J. L., & 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>

Montgomery, J. C., Jeffs, A., Simpson, S. D., Meekan, M., & Tindle, C. (2006). Sound as an Orientation Cue for the Pelagic Larvae of Reef Fishes and Decapod Crustaceans. In *Advances in Marine Biology* (Vol. 51, p. 143-196). Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0065-2881\(06\)51003-X](https://doi.org/10.1016/S0065-2881(06)51003-X)

Morandi, D. (2023). *État du transport maritime au Québec 2023*. Innovation Maritime. <https://www.innovationmaritime.ca>

Morisaka, T. (2012). Evolution of Communication Sounds in Odontocetes: A Review. *International Journal of Comparative Psychology*, 25(1). <https://doi.org/10.46867/ijcp.2012.25.01.04>

Morisaka, T., & Connor, R. C. (2007). Predation by killer whales (*Orcinus orca*) and the evolution of whistle loss and narrow-band high frequency clicks in odontocetes. *Journal of Evolutionary Biology*, 20(4), 1439-1458. <https://doi.org/10.1111/j.1420-9101.2007.01336.x>

Oestreich, W. K., Abrahms, B., McKenna, M. F., Goldbogen, J. A., Crowder, L. B., & Ryan, J. P. (2022). Acoustic signature reveals blue whales tune life-history transitions to oceanographic conditions. *Functional Ecology*, 36(4), 882-895. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.14013>

Oudompheng, B., Nicolas, B., & Lamotte, L. (2018). Localization and Contribution of Underwater Acoustical Sources of a Moving Surface Ship. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 43(2), 536-546. <https://doi.org/10.1109/JOE.2017.2699260>

Parmentier, E., Kéver, L., Casadevall, M., & Lecchini, D. (2010). Diversity and complexity in the acoustic behaviour of *Dacyllus flavicaudus* (Pomacentridae). *Marine Biology*, 157(10), 2317-2327. <https://doi.org/10.1007/s00227-010-1498-1>

Patek, S. N., Shipp, L. E., & Staaterman, E. R. (2009). The acoustics and acoustic behavior of the California spiny lobster (*Panulirus interruptus*). *The Journal of the Acoustical Society of America*, 125(5), 3434-3443. <https://doi.org/10.1121/1.3097760>

Pêches et Océans Canada. (2024a). *Étude de cas : Protection du béluga et des autres baleines contre le bruit sous-marin dans l'estuaire du Saint-Laurent* (Sa Majesté le Roi du chef du Canada, représenté par le ministre du ministère des Pêches et des Océans).

Pêches et Océans Canada. (2024b). *Étude de cas : Réduire les effets du bruit sous-marins produit par les navires—Soutien du gouvernement du Canada à l'innovation dans le secteur du transport maritime* (Sa Majesté le Roi du chef du Canada, représenté par le ministre du ministère des Pêches et des Océans).

Pêches et Océans Canada - Fisheries and Oceans Canada. (2023). *Données de surface en temps réel provenant des bouées VIKING dans le cadre du Programme de monitoring de la zone Atlantique (PMZA)* [Jeu de données]. <https://doi.org/10.26071/ogsl-06f7045a-51a5>

Radford, C. A., Stanley, J. A., Simpson, S. D., & Jeffs, A. G. (2011). Juvenile coral reef fish use sound to locate habitats. *Coral Reefs*, 30(2), 295-305. <https://doi.org/10.1007/s00338-010-0710-6>

- Remage-Healey, L., Nowacek, D. P., & Bass, A. H. (2006). Dolphin foraging sounds suppress calling and elevate stress hormone levels in a prey species, the Gulf toadfish. *Journal of Experimental Biology*, 209(22), 4444-4451. <https://doi.org/10.1242/jeb.02525>
- Richardson, W. J., Greene Jr, C. R., Malme, C. I., & Thomson, D. H. (1995). *Marine mammals and noise*. Academic press.
- Rolland, R. M., Parks, S. E., Hunt, K. E., Castellote, M., Corkeron, P. J., Nowacek, D. P., Wasser, S. K., & Kraus, S. D. (2012). Evidence that ship noise increases stress in 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*. Elsevier.
- Ross, D. (2005). Ship sources of ambient noise. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 30(2), 257-261. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. <https://doi.org/10.1109/JOE.2005.850879>
- Sardain, A., Sardain, E., & 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., & 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. <https://doi.org/10.1121/1.4962557>
- Simpson, S. D., Radford, A. N., Nedelec, S. L., Ferrari, M. C. O., Chivers, D. P., McCormick, M. I., & Meekan, M. G. (2016). Anthropogenic noise increases fish mortality by predation. *Nature Communications*, 7(1), 10544. <https://doi.org/10.1038/ncomms10544>
- Solé, M., Kaifu, K., Mooney, T. A., Nedelec, S. L., Olivier, F., Radford, A. N., Vazzana, M., Wale, M. A., Semmens, J. M., Simpson, S. D., Buscaino, G., Hawkins, A., Aguilar de Soto, N., Akamatsu, T., Chauvaud, L., Day, R. D., Fitzgibbon, Q., McCauley, R. D., & André, M.

(2023). Marine invertebrates and noise. *Frontiers in Marine Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1129057>

Southall, B. L. (2005). *Shipping noise and marine mammals: A forum for science, management, and technology*. Final Report of the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) International Symposium.

Szesciorka, A. R., Ballance, L. T., Širović, A., Rice, A., Ohman, M. D., Hildebrand, J. A., & Franks, P. J. S. (2020). Timing is everything : Drivers of interannual variability in blue whale migration. *Scientific Reports*, 10(1), 7710. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64855-y>

Thomas, J. A., & Stirling, I. (1983). Geographic variation in the underwater vocalizations of Weddell seals (*Leptonychotes weddelli*) from Palmer Peninsula and McMurdo Sound, Antarctica. *Canadian Journal of Zoology*, 61(10), 2203-2212. <https://doi.org/10.1139/z83-291>

Thompson, P. O., Findley, L. T., & Vidal, O. (1992). 20-Hz pulses and other vocalizations of fin whales, *Balaenoptera physalus*, in the Gulf of California, Mexico. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 92(6), 3051-3057. <https://doi.org/10.1121/1.404201>

Tollefsen, D., & Dosso, S. E. (2008). Bayesian geoacoustic inversion of ship noise on a horizontal array. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 124(2), 788-795. <https://doi.org/10.1121/1.2940581>

UNCTAD. (2022). *Review of maritime transport 2022*. United Nations Publications.

UNCTAD. (2023). *Review of maritime transport 2023*. United Nations Publications.

UNCTAD. (2024). *Review of maritime transport 2024*. United Nations Publications.

UNESCO. (2017). *Les sons dans la biosphère: Importance et impacts*. UNESCO. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000247952_fre

Urick, R. J. (1983). *Principles of Underwater Sound* (3^e éd.). Peninsula Publishing.
<https://books.google.com/books?id=MBBgQgAACAAJ>

van Oosterom, L., Montgomery, J. C., Jeffs, A. G., & Radford, C. A. (2016). Evidence for contact calls in fish : Conspecific vocalisations and ambient soundscape influence group cohesion in a nocturnal species. *Scientific Reports*, 6(1), 19098.
<https://doi.org/10.1038/srep19098>

Vazzana, M., Celi, M., Arizza, V., Calandra, G., Buscaino, G., Ferrantelli, V., Bracciali, C., & Sarà, G. (2017). Noise elicits hematological stress parameters in Mediterranean damselfish (*Chromis chromis*, perciformes) : A mesocosm study. *Fish & Shellfish Immunology*, 62, 147-152. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2017.01.022>

Vendittis, D. J., & Arveson, P. T. (2022). Ten challenges in measuring and reporting ship noise levels. *JASA Express Letters*, 2(3), 036801. <https://doi.org/10.1121/10.0009726>

Visser, F., Oudejans, M. G., Keller, O. A., Madsen, P. T., & Johnson, M. (2022). Sowerby's beaked whale biosonar and movement strategy indicate deep-sea foraging niche differentiation in mesoplodont whales. *Journal of Experimental Biology*, 225(9), jeb243728. <https://doi.org/10.1242/jeb.243728>

Wales, S. C., & 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>

Weilgart, L. S. (2007). The impacts of anthropogenic ocean noise on cetaceans and implications for management. *Canadian Journal of Zoology*, 85(11), 1091-1116. <https://doi.org/10.1139/Z07-101>

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>

Wenz, G. M. (1972). Review of Underwater Acoustics Research : Noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 51(3B), 1010-1024. <https://doi.org/10.1121/1.1912921>

Wittekind, D., & Schuster, M. (2016). Propeller cavitation noise and background noise in the sea. *Ocean Engineering*, 120, 116-121. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.12.060>

Référence Matlab :

Ocean Acoustic Library, Acoustic Toolbox, SCOOTER, <https://oalib-acoustics.org/models-and-software/acoustics-toolbox/> (Last viewed December 12, 2024)

