

Estimation des niveaux de bruit de bateaux d'écotourisme opérant dans le parc marin du Saguenay-Saint-Laurent au moyen d'un observatoire acoustique

Yvan Simard, Camille Claing, Cédric Gervaise, Nathalie Roy,
Line Bourdages, Florian Aulanier et Manuela Conversano

Direction régionale des Sciences
Pêches et Océans Canada
Institut Maurice-Lamontagne
850, route de la Mer, C.P. 1000
Mont-Joli, Québec
Canada G5H 3Z4

2022

**Rapport technique canadien des
sciences halieutiques et aquatiques 3480**

Rapport technique canadien des sciences halieutiques et aquatiques

Les rapports techniques contiennent des renseignements scientifiques et techniques qui constituent une contribution aux connaissances actuelles, mais qui ne sont pas normalement appropriés pour la publication dans un journal scientifique. Les rapports techniques sont destinés essentiellement à un public international et ils sont distribués à cet échelon. Il n'y a aucune restriction quant au sujet; de fait, la série reflète la vaste gamme des intérêts et des politiques de Pêches et Océans Canada, c'est-à-dire les sciences halieutiques et aquatiques.

Les rapports techniques peuvent être cités comme des publications à part entière. Le titre exact figure au-dessus du résumé de chaque rapport. Les rapports techniques sont résumés dans la base de données *Résumés des sciences aquatiques et halieutiques*.

Les rapports techniques sont produits à l'échelon régional, mais numérotés à l'échelon national. Les demandes de rapports seront satisfaites par l'établissement auteur dont le nom figure sur la couverture et la page du titre.

Les numéros 1 à 456 de cette série ont été publiés à titre de Rapports techniques de l'Office des recherches sur les pêcheries du Canada. Les numéros 457 à 714 sont parus à titre de Rapports techniques de la Direction générale de la recherche et du développement, Service des pêches et de la mer, ministère de l'Environnement. Les numéros 715 à 924 ont été publiés à titre de Rapports techniques du Service des pêches et de la mer, ministère des Pêches et de l'Environnement. Le nom actuel de la série a été établi lors de la parution du numéro 925.

Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences

Technical reports contain scientific and technical information that contributes to existing knowledge but which is not normally appropriate for primary literature. Technical reports are directed primarily toward a worldwide audience and have an international distribution. No restriction is placed on subject matter and the series reflects the broad interests and policies of Fisheries and Oceans Canada, namely, fisheries and aquatic sciences.

Technical reports may be cited as full publications. The correct citation appears above the abstract of each report. Each report is abstracted in the data base *Aquatic Sciences and Fisheries Abstracts*.

Technical reports are produced regionally but are numbered nationally. Requests for individual reports will be filled by the issuing establishment listed on the front cover and title page.

Numbers 1-456 in this series were issued as Technical Reports of the Fisheries Research Board of Canada. Numbers 457-714 were issued as Department of the Environment, Fisheries and Marine Service, Research and Development Directorate Technical Reports. Numbers 715-924 were issued as Department of Fisheries and Environment, Fisheries and Marine Service Technical Reports. The current series name was changed with report number 925.

Rapport technique canadien des
sciences halieutiques et aquatiques 3480

2022

Estimation des niveaux de bruit de bateaux d'écotourisme opérant dans le
parc marin du Saguenay–Saint-Laurent au moyen d'un observatoire acoustique

par

Yvan Simard¹, Camille Claing¹, Cédric Gervaise², Nathalie Roy¹,
Line Bourdages¹, Florian Aulanier¹ et Manuela Conversano³

¹ Direction régionale des sciences
Institut Maurice-Lamontagne
Pêches et Océans Canada
850 route de la Mer, C.P. 1000
Mont-Joli, Québec
Canada G5H 3Z4

² Institut de recherche CHORUS
5 Rue Gallice
38000 Grenoble
France

³ Parc marin du Saguenay–Saint-Laurent
Parcs Canada
182, rue de l'Église
Tadoussac, Québec
Canada G0T 2A0

© Sa Majesté la Reine du Chef du Canada, 2022

N° de cat. Fs97-6/3480F-PDF ISBN 978-0-660-43619-7 ISSN 1488-545X

On doit citer la publication comme suit:

Simard, Y., Claing, C., Gervaise, C., Roy, N., Bourdages, L., Aulanier, F. et Conversano, M. 2022. Estimation des niveaux de bruit de bateaux d'écotourisme opérant dans le parc marin du Saguenay–Saint-Laurent au moyen d'un observatoire acoustique. Rapp. tech. can. sci. halieut. aquat. 3480: viii + 49 p.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
LISTE DES TABLEAUX.....	iv
LISTE DES FIGURES.....	iv
RÉSUMÉ.....	vii
ABSTRACT.....	vii
ACRONYMES.....	viii
1. INTRODUCTION.....	1
1.1. CONTEXTE.....	1
1.2. OBJECTIFS SPÉCIFIQUES.....	2
1.3. CONTENU DU RAPPORT.....	2
2. MATÉRIEL ET MÉTHODES.....	3
2.1. OBSERVATOIRE ACOUSTIQUE.....	3
2.2. PROTOCOLE DE NAVIGATION.....	5
2.2.1. <i>Trajet</i>	5
2.2.2. <i>Parcours</i>	6
2.3. CARACTÉRISTIQUES DES BATEAUX ET NAVIRES MESURÉS.....	9
2.3.1. <i>Bateaux de la flottille d'écotourisme d'observation des baleines et autres</i>	9
2.3.2. <i>Traversiers de Tadoussac</i>	9
2.3.3. <i>Groupes de bateaux</i>	9
2.4. EXTRACTION ET TRAITEMENT DES DONNÉES.....	9
2.4.1. <i>Extraction des segments d'enregistrement des hydrophones</i>	10
2.4.2. <i>Contrôle de qualité des enregistrements et niveau de bruit ambiant</i>	10
2.4.3. <i>Élimination des bruits de cognements et de vibrations</i>	11
2.4.4. <i>Calcul des niveaux reçus par bande de tiers d'octave</i>	12
2.4.5. <i>Calcul des pertes de propagation par bande de tiers d'octave</i>	12
2.4.6. <i>Calcul des niveaux SSLs par bande de tiers d'octave</i>	13
2.4.7. <i>Calcul des niveaux SL large bande</i>	13
2.4.8. <i>Calcul des statistiques des niveaux SLs et SSLs par groupe de bateaux</i>	14
2.5. EXEMPLE POUR UN BATEAU.....	14
3. RÉSULTATS.....	20
3.1. NIVEAUX SSLs PAR TIERS D'OCTAVE PAR GROUPE DE BATEAUX.....	20
3.1.1. <i>Groupe 1, 13 bateaux de moins de 10 m</i>	25
3.1.2. <i>Groupe 2, 6 bateaux de 10 à 12 m</i>	27
3.1.3. <i>Groupe 3, 4 bateaux de 14 à 22 m</i>	29
3.1.4. <i>Groupe 4, 3 bateaux de 24 à 34 m</i>	31
3.1.5. <i>Groupe 5, 2 traversiers de 79 et 87 m</i>	33
3.2. NIVEAUX SSLs MÉDIANS COMPARÉS PAR GROUPE DE BATEAUX POUR CHAQUE VITESSE.....	34
3.3. MODÉLISATION DE L'EFFET DE LA VITESSE SUR LES SLs PAR GROUPE DE BATEAUX.....	36
4. DISCUSSION.....	38
4.1. COMPARAISONS AVEC LES SSLs ESTIMÉS PUBLIÉS DANS LA LITTÉRATURE.....	39
4.2. EFFETS DE LA VITESSE SUR LES SLs.....	42
REMERCIEMENTS.....	43
REFERENCES.....	43
ANNEXE 1: PHOTOS DES BATEAUX.....	45
GROUPE 1.....	45

GROUPE 2.....	47
GROUPE 3.....	48
GROUPE 4.....	49
GROUPE 5.....	49

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Caractéristiques de l'observatoire acoustique.....	4
Tableau 2. Coordonnées des points du trajet de mesures.....	6
Tableau 3. Caractéristiques des bateaux et navires testés.	8
Tableau 4. Niveaux <i>SSLs</i> médians (tiers d'octave, dB re 1 μ Pa @ 1 m) par groupe de bateaux, moteurs au neutre.	21
Tableau 5. Niveaux <i>SSLs</i> médians (tiers d'octave, dB re 1 μ Pa @ 1 m) par groupe de bateaux, vitesse 10 kn.	22
Tableau 6. Niveaux <i>SSLs</i> médians (tiers d'octave, dB re 1 μ Pa @ 1 m) par groupe de bateaux, vitesse 15 kn.	23
Tableau 7. Niveaux <i>SSLs</i> médians (tiers d'octave, dB re 1 μ Pa @ 1 m) par groupe de bateaux, vitesse 25 kn.	24
Tableau 8. Niveaux <i>SLs</i> large-bande [89 -449 Hz] médians (dB re 1 μ Pa @ 1 m) par groupe de bateaux en fonction de la vitesse.....	36
Tableau 9. Niveaux <i>SLs</i> large-bande [445-28062 Hz] médians (dB re 1 μ Pa @ 1 m) par groupe de bateaux en fonction de la vitesse.	37

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Localisation de l'observatoire acoustique utilisé pour mesurer les niveaux de bruit des bateaux d'écotourisme à la tête du Chenal Laurentien, dans l'Estuaire Maritime du Saint-Laurent, à la station nommée PP3.	1
Figure 2. Schéma du dispositif de mesure des <i>SLs</i> des bateaux sur le plan vertical suivant le protocole ANSI/ISO.	3
Figure 3. Sensibilité de réception (RS) des hydrophones en fonction de la fréquence acoustique.	5
Figure 4. Trajet de navigation pour la mesure des <i>SL</i> à l'observatoire acoustique (PP3)	7
Figure 5. Cartes d'un trajet de navigation d'un bateau typique pour sa mesure de <i>SL</i> à l'observatoire acoustique (PP3) (A) et géométrie du passage (B) pour un transit à vitesse nominale constante de 25 kn entre les points E1 et E2 (Figure 4). Énergie du bruit large bande [0.3-16 kHz] reçu à un hydrophone le long du trajet (C).	16
Figure 6. Spectrogrammes [0-16 kHz] (dB re 1 μ Pa ² /Hz) des niveaux de bruit reçus aux hydrophones lors du trajet de navigation d'un bateau typique pour sa mesure de <i>SL</i> à l'observatoire acoustique (PP3) pour un transit à vitesse nominale constante de 25 kn entre les points E1 et E2 (Figure 4).	17
Figure 7. Spectrogrammes [0-2 kHz] (dB re 1 μ Pa ² /Hz) des niveaux de bruit reçus aux hydrophones lors du trajet de navigation d'un bateau typique pour sa mesure de <i>SL</i> à l'observatoire acoustique (PP3) pour un transit à vitesse nominale constante de 25 kn entre les points E1 et E2 (Figure 4).	18
Figure 8. Spectrogrammes [0-16 kHz] (A) (dB re 1 μ Pa ² /Hz) et zoom [0-2 kHz] (B) des niveaux de bruit reçus aux hydrophones lors du trajet de navigation d'un bateau	

typique pour sa mesure de SL sur le segment de $\pm 30^\circ$ centré sur le cpa à l'observatoire acoustique (PP3) pour un transit à vitesse nominale constante de 25 kn.	19
Figure 9. Niveaux <i>SSLs</i> en tiers d'octave des bateaux du groupe 1, moteur au neutre.	25
Figure 10. Niveaux <i>SSLs</i> en tiers d'octave des bateaux du groupe 1, vitesse 10 kn.	25
Figure 11. Niveaux <i>SSLs</i> en tiers d'octave des bateaux du groupe 1, vitesse 15 kn.	25
Figure 12. Niveaux <i>SSLs</i> en tiers d'octave des bateaux du groupe 1, vitesse 25 kn.	26
Figure 13. Niveaux <i>SSLs</i> médians en tiers d'octave des bateaux du groupe 1 en fonction des vitesses 0, 10, 15 et 25 kn.	26
Figure 14. Niveaux <i>SSLs</i> en tiers d'octave des bateaux du groupe 2, moteur au neutre.	27
Figure 15. Niveaux <i>SSLs</i> en tiers d'octave des bateaux du groupe 2, vitesse 10 kn.	27
Figure 16. Niveaux <i>SSLs</i> en tiers d'octave des bateaux du groupe 2, vitesse 15 kn.	28
Figure 17. Niveaux <i>SSLs</i> en tiers d'octave des bateaux du groupe 2, vitesse 25 kn.	28
Figure 18. Niveaux <i>SSLs</i> médians en tiers d'octave des bateaux du groupe 2 en fonction des vitesses 0, 10, 15 et 25 kn.	28
Figure 19. Niveaux <i>SSLs</i> en tiers d'octave des bateaux du groupe 3, moteur au neutre.	29
Figure 20. Niveaux <i>SSLs</i> en tiers d'octave des bateaux du groupe 3, vitesse 10 kn.	29
Figure 21. Niveaux <i>SSLs</i> en tiers d'octave des bateaux du groupe 3, vitesse 15 kn.	30
Figure 22. Niveaux <i>SSLs</i> en tiers d'octave des bateaux du groupe 3, vitesse 25 kn.	30
Figure 23. Niveaux <i>SSLs</i> médians en tiers d'octave des bateaux du groupe 3 en fonction des vitesses 0, 10, 15 et 25 kn.	30
Figure 24. Niveaux <i>SSLs</i> en tiers d'octave des bateaux du groupe 4, moteur au neutre.	31
Figure 25. Niveaux <i>SSLs</i> en tiers d'octave des bateaux du groupe 4, vitesse 10 kn.	31
Figure 26. Niveaux <i>SSLs</i> en tiers d'octave d'un bateau du groupe 4, vitesse 15 kn.	32
Figure 27. Niveaux <i>SSLs</i> médians en tiers d'octave des bateaux du groupe 4 en fonction des vitesses 0, 10, et 15 kn.	32
Figure 28. Niveaux <i>SSLs</i> en tiers d'octave des bateaux du groupe 5, vitesse 10 kn.	33
Figure 29. Niveaux <i>SSLs</i> en tiers d'octave comparés entre les 2 traversiers du groupe 5, vitesse 10 kn.	33
Figure 30. Niveaux <i>SSLs</i> médians en tiers d'octave, moteur au neutre, par groupe de bateaux. ...	34
Figure 31. Niveaux <i>SSLs</i> médians en tiers d'octave à 10 kn, par groupe de bateaux.	34
Figure 32. Niveaux <i>SSLs</i> médians en tiers d'octave à 15 kn, par groupe de bateaux.	35
Figure 33. Niveaux <i>SSLs</i> médians en tiers d'octave à 25 kn, par groupe de bateaux.	35
Figure 34. Niveaux <i>SLs</i> large-bande [89 - 449 Hz] médians par groupe de bateaux en fonction de la vitesse.	36
Figure 35. Niveaux <i>SLs</i> large-bande [445-28062 Hz] médians par groupe de bateaux en fonction de la vitesse.	37
Figure 36. Comparaisons des niveaux <i>SSLs</i> médians en tiers d'octave à 15 kn par groupe de bateaux à l'enveloppe des <i>SSLs</i> de la navigation marchande dans la Voie Maritime du Saint-Laurent (Simard et al. 2016).	40
Figure 37. Comparaisons des niveaux <i>SSLs</i> médians en tiers d'octave à 25 kn par groupe de bateaux à ceux effectués en 2009 à Pointe-Noire dans le Saguenay avec un observatoire côtier (cercles à 100 Hz, 1 kHz et 10 kHz).	40
Figure 38. Comparaisons des niveaux <i>SSLs</i> médians en tiers d'octave à 25 kn par groupe de bateaux aux normes pour les navires commerciaux en transit de Bureau Véritas (BV), de la Lloyds et du American Bureau of Shipping (ABS).	41

Figure 39. Comparaisons des niveaux <i>SSLs</i> médians en tiers d’octave à 10 kn des traversiers Jos-Deschênes et Armand-Imbeau II à l’enveloppe des <i>SSLs</i> de la navigation marchande dans la Voie Maritime du Saint-Laurent (Simard et al. 2016).	41
Figure 40. Comparaisons des niveaux <i>SSLs</i> médians en tiers d’octave à 10 kn des traversiers Jos-Deschênes et Armand-Imbeau II aux normes pour les navires commerciaux en transit de Bureau Véritas (BV), de la Lloyds et du American Bureau of Shipping (ABS).	42

RÉSUMÉ

Simard, Y., Claing, C., Gervaise, C., Roy, N., Bourdages, L., Aulanier, F. et Conversano, M. 2022. Estimation des niveaux de bruit de bateaux d'écotourisme opérant dans le parc marin du Saguenay–Saint-Laurent au moyen d'un observatoire acoustique. Rapp. tech. can. sci. halieut. aquat. 3480: viii + 49 p.

Ce rapport présente les résultats d'une campagne de mesures des niveaux de bruit à la source (*SL*) de bateaux de la flottille d'écotourisme d'observation des baleines dans le parc marin du Saguenay–Saint-Laurent et d'autres bateaux et traversiers opérant dans la région. Ces mesures ont été réalisées aux étés 2018 et 2019 dans le Chenal Laurentien près de Tadoussac à 4 vitesses, 0 kn (au neutre), 10 kn, 15 kn et 25 kn suivant le protocole standard ANSI/ISO (ANSI 2009; ISO 2016).

Les niveaux spectraux (*SSLs*) médians se situent en général dans la gamme correspondant à la moitié faible des niveaux estimés pour la flotte marchande de la Voie Maritime du Saint-Laurent (Simard et al. 2016). Ils augmentent en relation avec la taille du bateau. L'écart entre les niveaux médians au neutre par rapport à ceux en transit entre 10 à 25 kn croît avec la fréquence. Pour la bande [445 - 28062 Hz], il est de l'ordre de 10 dB à 10 kn et de 20 dB à 25 kn. L'effet de la vitesse sur les niveaux *SLs* et *SSLs* médians est variable et de l'ordre de 0.5 à 1.0 dB/kn.

ABSTRACT

Simard, Y., Claing, C., Gervaise, C., Roy, N., Bourdages, L., Aulanier, F. et Conversano, M. 2022. Estimation des niveaux de bruit de bateaux d'écotourisme opérant dans le parc marin du Saguenay–Saint-Laurent au moyen d'un observatoire acoustique. Rapp. tech. can. sci. halieut. aquat. 3480: viii + 49 p.

This report presents the results of a campaign to measure the noise source levels (*SL*) of boats of the whale-watching ecotourism fleet in the Saguenay–St. Lawrence Marine Park and other boats and ferries operating in the region. These measures were carried out in the summers of 2018 and 2019 in the Laurentian Channel near Tadoussac at 4 speeds, 0 kn (idle), 10 kn, 15 kn and 25 kn according to the ANSI/ISO standard protocol (ANSI 2009; ISO 2016).

Median spectral source levels (*SSLs*) are generally in the range corresponding to the lower half of the estimated levels distribution for the St. Lawrence Seaway merchant fleet (Simard et al. 2016). They increase in relation with the size of the boat. The difference between the median levels at idle compared to those in transit between 10 and 25 kn increases with frequency. For the band 445 Hz to 28 kHz, it is of the order of 10 dB at 10 kn and 20 dB at 25 kn. The effect of speed on the median *SLs* and *SSLs* levels is variable and of the order of 0.5 to 1.0 dB/kn.

ACRONYMES

AIS:	Automatic Identification System
CTD:	Conductivity Temperature Depth
cpa:	Closest point of approach
dcpa:	Horizontal distance to cpa
FFT:	Fast Fourier Transform
GPS:	Global Positioning System
GSL:	Golfe du Saint-Laurent
MPO:	Ministère des Pêches et des Océans
PAM:	Passive Acoustic Monitoring
<i>RL</i> :	Received Level
<i>RS</i> :	Response sensitivity
RSB:	Rapport signal à bruit
<i>SL</i> :	Source Level
SOG:	Speed Over Ground
<i>SSL</i> :	Spectral Source Level
STW:	Speed Through Water
STFT:	Short-Time Fourier Transform
<i>TL</i> :	Transmission Loss
WI :	Wavenumber Integration

1. INTRODUCTION

1.1. Contexte

Dans le cadre du projet de recherche du Ministère des Pêches et des Océans (MPO) sur l'impact du bruit de la navigation sur le béluga de l'estuaire du Saint-Laurent, un observatoire acoustique a été installé à la tête du Chenal Laurentien dans l'Estuaire Maritime du Saint-Laurent, à environ 23 km de navigation de Tadoussac (Figure 1). Ce projet de recherche fait partie du Programme de Protection des Océans (PPO) du MPO initié en 2017. Cet observatoire a été en opération pendant 16 mois de la fin juin 2018 jusqu'à la mi-octobre 2019. Son objectif principal

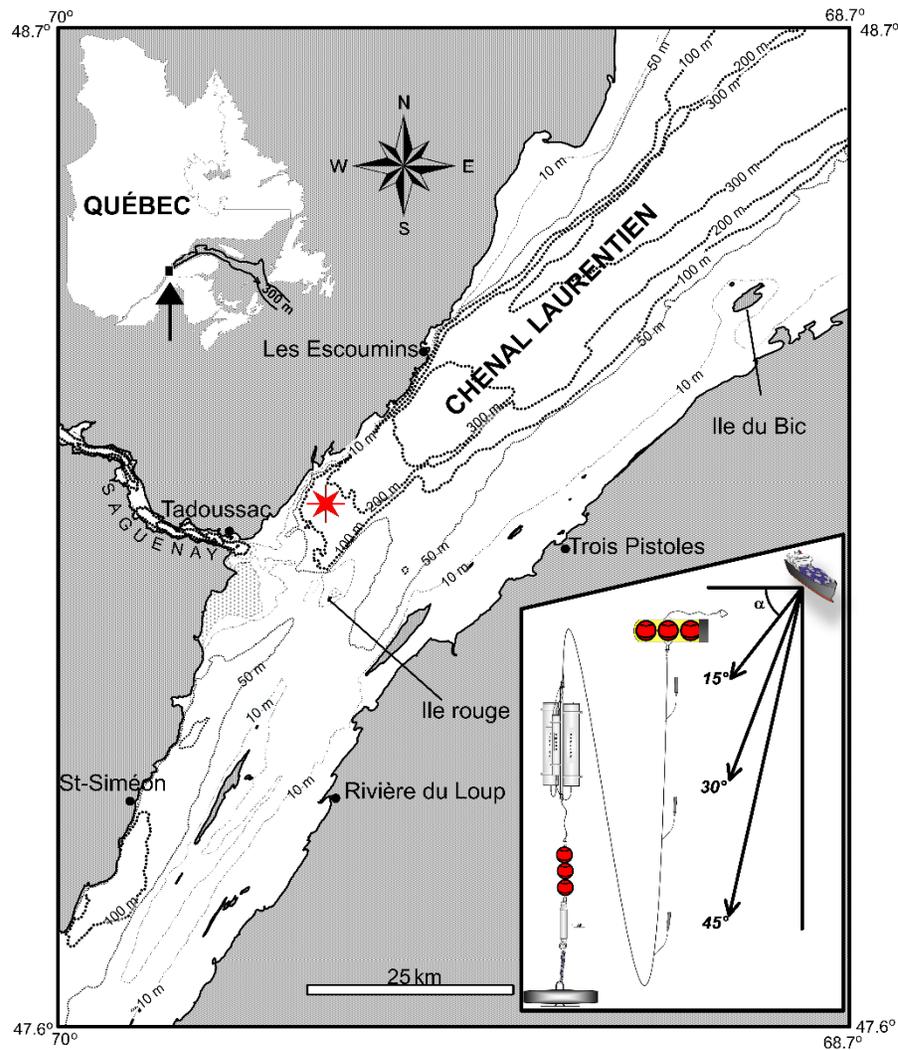


Figure 1. Localisation de l'observatoire acoustique utilisé pour mesurer les niveaux de bruit des bateaux d'écotourisme à la tête du Chenal Laurentien, dans l'Estuaire Maritime du Saint-Laurent, à la station nommée PP3.

Isobathes en mètres. Cartouche: schéma du dispositif de l'observatoire acoustique composé de 3 hydrophones superposés reliés à un enregistreur autonome multivoies.

était de suivre la présence des bélugas par les sons de communication et d'écholocation qu'ils émettent ainsi que de mesurer les niveaux de bruit anthropiques (e.g. navigation) et naturels (e.g. vagues, pluie, glace), en continu pendant un cycle annuel complet. Un objectif secondaire était de mesurer le niveau de bruit des petites embarcations et bateaux opérant dans cette zone, en particulier ceux de la flottille d'écotourisme d'observation des baleines. Quatre vitesses étaient ciblées : ralenti, 10 kn, 15 kn et 25 kn. Elles furent réalisées lorsque la capacité d'opération du bateau le permettait. Les vitesses utilisées dans ce rapport sont les vitesses par rapport au fond (SOG : speed over ground).

1.2. Objectifs spécifiques

Les objectifs spécifiques du présent rapport sont de présenter les éléments principaux de cette étude; d'abord (1) les méthodes utilisées pour l'estimation des niveaux de bruit des bateaux d'écotourisme et des autres bateaux et navires opérant régulièrement dans la région du parc marin du Saguenay–Saint-Laurent ayant participé à cette étude, ensuite (2) les résultats obtenus, incluant leurs limitations, et finalement (3) leur interprétation et les conclusions.

1.3. Contenu du rapport

Le rapport suit la présentation usuelle en trois sections principales, incluant des annexes où des renseignements techniques sont colligés. Les caractéristiques de l'observatoire acoustique et de la méthodologie sont d'abord présentées. Cette dernière suit le protocole ANSI/ISO (ANSI 2009; ISO 2016), rectifié pour tenir compte de la propagation acoustique adaptée à la région des travaux (cf. Simard et al. 2016).

Les niveaux de bruit spectraux à la source (*SSLs*) fournissent les niveaux par bande de fréquences intégrée sur les intervalles de tiers d'octave entre 100 Hz et 25,000 Hz (parfois entre 20 Hz et 25,000 Hz). Ils sont présentés par groupe de bateaux partageant des caractéristiques semblables, pour chaque gamme de vitesse. Les effets de la vitesse sur les niveaux de bruit à la source (*SL*) intégrés sur 2 larges bandes de fréquences ([89 – 449 Hz] et [445 - 28062 Hz]) sont également présentés et analysés par catégorie de bateaux.

Ces résultats sont ensuite discutés et les conclusions qui en sont tirées sont énoncées.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. Observatoire acoustique

Les mesures des *SLs* des bateaux de la flottille d'écotourisme et des autres bateaux et navires opérant régulièrement dans la région du parc marin du Saguenay–Saint-Laurent se sont déroulées pendant la première session d'enregistrement de l'observatoire acoustique, qui opéra en continu du 20 juin 2018 au 18 octobre 2018. Des mesures des *SLs* des traversiers de Tadoussac se sont déroulées lors de la troisième session d'enregistrement, qui couvrait la période du 8 avril 2019 au 11 octobre 2019, où la séquence des enregistrements était discontinue et incluait une période de sommeil de 2.45 min à chaque 2 min. L'observatoire acoustique était situé à une station nommée PP3 et consistait en un mouillage océanographique en « I », composé d'une ancre (roue de train de 360 kg), de bouées sous-marines de flottaison assurant la verticalité du mouillage, d'un largueur acoustique IXblue, d'un système d'enregistrement autonome AMAR G4 et son bloc d'alimentation par piles, d'hydrophones GeoSpectrum M36-C35-100 accompagnés de senseurs de température et de profondeur (Figure 1, Tableau 1).

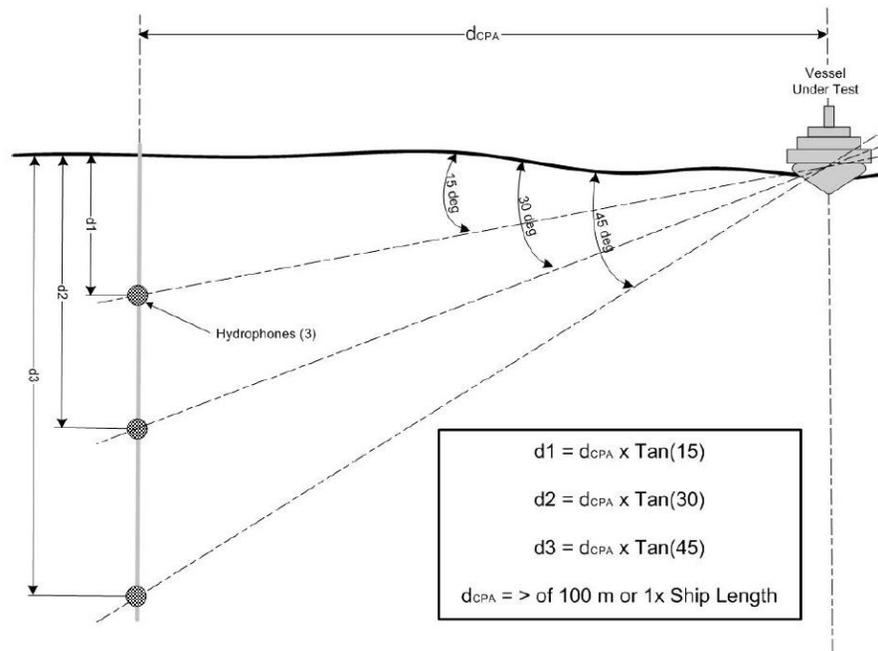


Figure 2. Schéma du dispositif de mesure des *SLs* des bateaux sur le plan vertical suivant le protocole ANSI/ISO.
Extrait de (ANSI 2009).

La profondeur des hydrophones (Tableau 1) a été choisie pour respecter les angles de mesure des *SLs* des bateaux dans le plan vertical (15°, 30° et 45°) recommandés par le protocole ANSI/ISO (ANSI 2009; ISO 2016), lorsqu'ils croisent l'observatoire à une distance (d_{cpa}) de 150 m au point le plus près (cpa, closest point of approach) (Figure 2). Le marnage de marée dans la région peut atteindre 5.4 m (<https://www.qc.dfo-mpo.gc.ca/tides/fr/stations/03424>). La profondeur

exacte des hydrophones était enregistrée à chaque 4 minutes par des senseurs de pression et de température (Tableau 1), localisés à ~ 30 cm des hydrophones.

Tableau 1. Caractéristiques de l'observatoire acoustique.

	Description	Hydrophone		
		15°	30°	45°
Position Longitude O. Latitude N. Profondeur (m)	69° 33.680' 48° 10.415' 161	44	88	151
Système d'enregistrement	AMAR G4 ¹ Gain amplification: 16 dB Filtre passe haut, fréquence de coupure à 17 Hz en 2018 et 10 Hz en 2019	X	X	X
Alimentation Juin-oct. 2018 Avril-oct. 2019	Cylindres de 96 piles alcalines D	2 1	2 1	2 1
Hydrophone	Hydrophone GeoSpectrum M36-C35-100 avec préamplification de 35 dB ² Sensibilité nominale [10 Hz – 125 kHz]: -165 dB re 1V/μPa incluant la préamplification	X	X	X
Profondimètre et thermistor Juin-oct. 2018 Avril-oct. 2019	Star Oddi DST-centi-TD ³ SO ou SD	SO SO	SO SO	SO SD
Échantillonnage Juin-oct. 2018 Avril-oct. 2019	24 bits [52 min @ 64000 éch. / s, 8 min @ 256000 éch. / s] [2 min @ 256000 éch. / s, 2.45 min d'arrêt, 2 min @ 32000 éch. / s, 2.45 min d'arrêt, 2 min @ 32000 éch. / s, 2.45 min d'arrêt,]	X X	X X	X X
Largueur acoustique	IXblue Oceano 2500S ⁴			
Bouées subsurface	Bouée profilée Open Seas Instrumentations SUBS B3 Bouées Viny 13 po.			

¹ Jasco Applied Sciences, Autonomous Multichannel Acoustic Recorder Generation 4 <https://www.jasco.com/amar-g4>

² GeoSpectrum Technologies Inc., hydrophones (<https://geospectrum.ca/commercial-products/transducers/hydrophones/>)

³ Star Oddi Logging Life Science, Data Storage Tag with Temperature and Depth (<https://www.star-oddi.com/products/data-loggers/data-storage-tag-temperature-depth-sensors>)

⁴ IXblue, Oceano-acoustic releases (<https://www.ixblue.com/products/oceano-acoustic-releases#specifications>)

La calibration des hydrophones utilisée est celle fournie par le manufacturier (Figure 3). Le système d'enregistrement AMAR G4 amplifiait les signaux des hydrophones par 16 dB avant de les numériser sur 24 bits via un convertisseur A/N de plage de ± 4.5 volts.

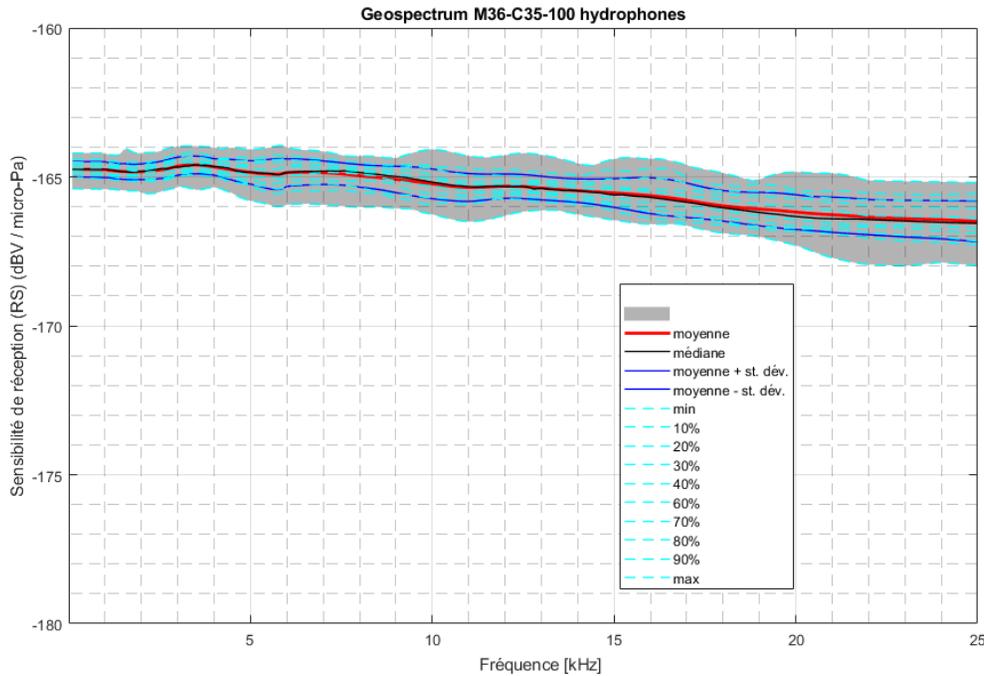


Figure 3. Sensibilité de réception (RS) des hydrophones en fonction de la fréquence acoustique. Nombre d'hydrophones = 23. Zone grisée = l'enveloppe du min au max. Lignes pointillées = percentiles de la distribution des valeurs. Lignes continues = statistiques de la distribution telles qu'indiquées dans la légende.

2.2. Protocole de navigation

Le protocole pour effectuer la mesure des *SLs* des bateaux suit la procédure standard recommandée (ANSI 2009; ISO 2016). Les conditions additionnelles étaient de réaliser les mesures en absence de pluie, par des conditions de vents faibles et de vagues inférieures à 60 cm d'amplitude et, autant que possible, lorsqu'aucun autre bateau n'était présent dans un rayon d'un mille marin (1.9 km) et aucun navire marchand dans un rayon de 3 milles marins (5.6 km) autour de l'observatoire acoustique. Lors des mesures, la position du bateau mesuré était réalisée à l'aide d'un GPS dédié, embarqué à bord.

2.2.1. Trajet

La trajectoire de navigation des bateaux lors des mesures était une ligne droite de 1 mille marin à vitesse uniforme, centrée au cpa, passant à une distance de 150 m (dcpa) de l'observatoire acoustique, situé au point PP3 (Figure 4). La mesure du *SL* latéral ANSI/ISO du bateau se fait alors qu'il passe devant l'observatoire, dans un faisceau angulaire de $\pm 30^\circ$ centré sur le cpa. Ce segment représente une trajectoire de 173 m.

2.2.2. Parcours

Le protocole de navigation visait à prendre les mesures en course à différentes vitesses, ainsi que le niveau de bruit ambiant. La séquence des étapes était :

- a) se positionner au début de la ligne, au point WC1 (Figure 4, Tableau 2). arrêter les moteurs, attendre 1 min;
- b) démarrer, accélérer pour atteindre la vitesse désirée au point E1 (Figure 4, Tableau 2);
- c) maintenir cette vitesse entre les points E1 et E2 (Figure 4, Tableau 2);
- d) ralentir pour ensuite faire demi-tour au point WC2 (Figure 4, Tableau 2);
- e) revenir vers le point WC1 en maintenant la même vitesse entre les points E2 et E1.

Tableau 2. Coordonnées des points du trajet de mesures.

Point	Longitude O.	Latitude N.
WC1	69° 34.130'	48° 10.007'
E1	69° 33.808'	48° 10.217'
Cpa	69° 33.595'	48° 10.358'
E2	69° 33.384'	48° 10.498'
WC2	69° 33.063'	48° 10.710'
PP3	69° 33.680'	48° 10.415'

Ce protocole était répété pour chaque vitesse de navigation ciblée (10, 15, et 25 kn), dépendant de la capacité du bateau à rencontrer cette vitesse.

Ensuite, pour mesurer les niveaux de bruit émis par les bateaux représentatifs de ceux qu'ils émettent lorsqu'ils réalisent au quotidien des observations de mammifères marins ou d'autres activités de service (p. ex. patrouille, recherche scientifique, chargement de passagers), des mesures additionnelles ont été réalisées. Le bateau devait se positionner au point central de la ligne de trajectoire (cpa) et rester à ce point pendant 3 minutes, en maintenant sa position (le moteur intervenant au besoin). Ce cas a été nommé « au neutre ».

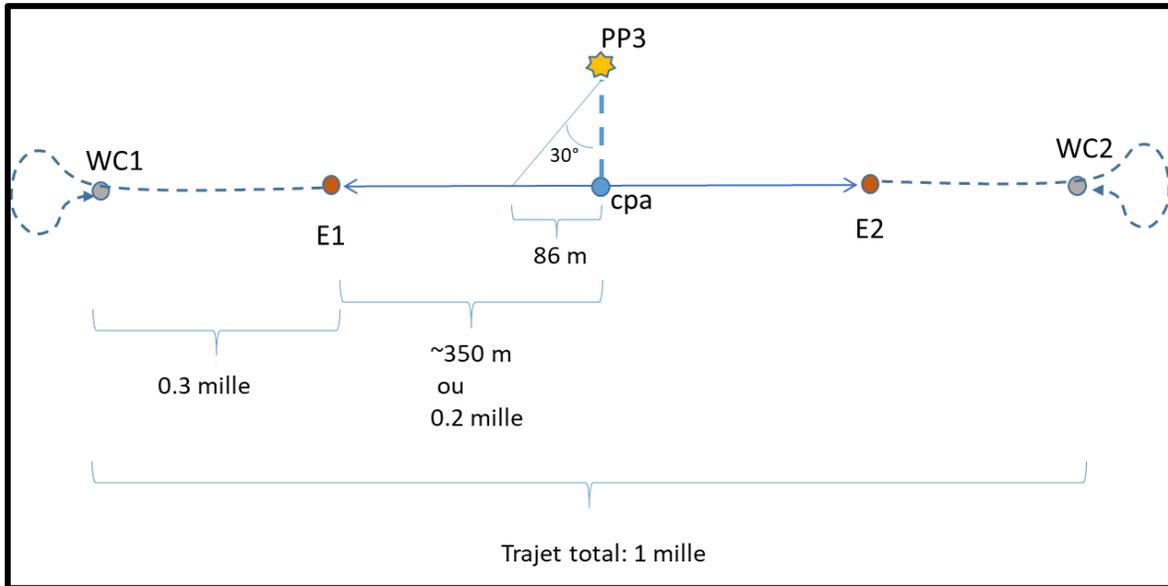
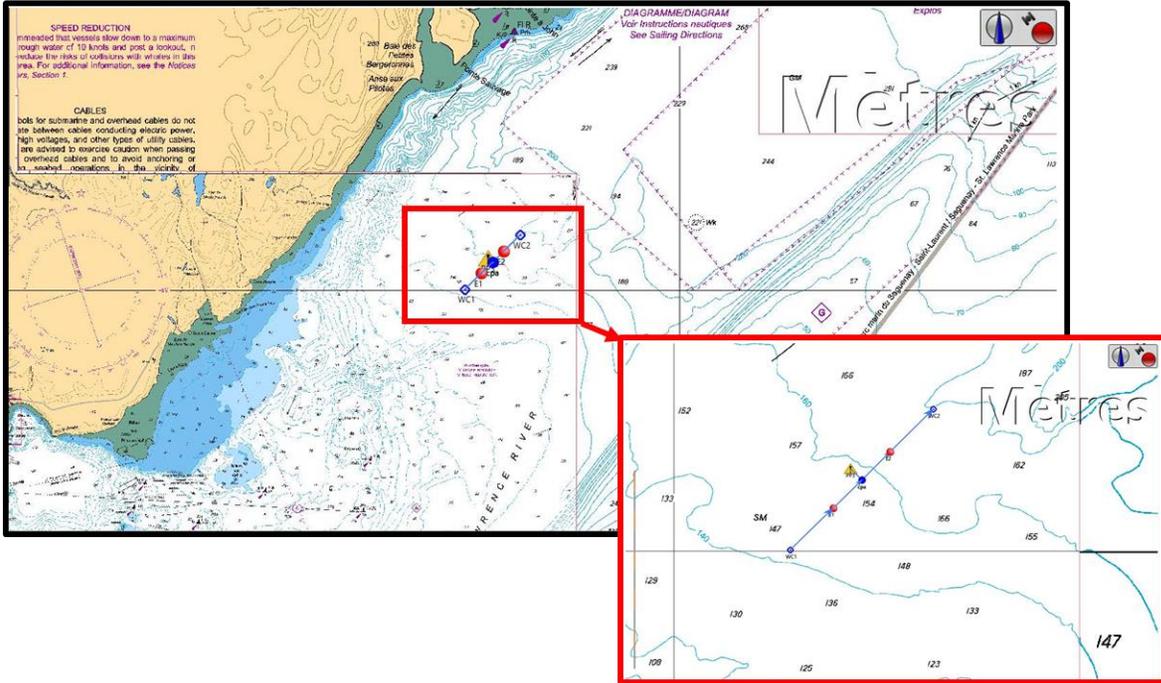


Figure 4. Trajet de navigation pour la mesure des SL à l'observatoire acoustique (PP3)
 Cpa: point le plus rapproché; E1 à E2: trajet à vitesse constante.
 Trajet de mesure du SL ANSI/ISO: $\pm 30^\circ$ centré sur le cpa.

Tableau 3. Caractéristiques des bateaux et navires testés.

Nom	Numéro		Année constr.	Type	Port d'enregistrement	Port d'attache	Propriétaire	Tonnage (tonneau)		Long. (m)	Larg. (m)	Creu (m)	Tirant d'eau (m)	Vitesse cr. (kn)	Moteurs			Puissance		Hélice		Capacité (pers.)		Groupe			
	Matricule	OMI						Mmsi	Brut						Net	Carb.	No.	Marque	Model	(kW)	(HP)	No.	Prof. (m)		Equip.	Passagers	
Harfang des mers III	C10905QC		316043416	2010	Passagers	Les Escoumins	Les Escoumins	Les Écumeurs du Saint-Laurent (9320-1416 Québec Inc.)		5	4.3	1.5	0.5	0.8	23	Essence	2	Honda	150 HP	1342	300	2	0.8	1	12	1	
Gremlin	C06433QC			2002	Recherche	Tadoussac	Tadoussac	GREMM		5	5.8	2.5	0.6	0.6	20	Essence	1	Yamaha	100 HP	738	100	1	0.5		4	1	
L'Estran	C03480QC		316020396	2002	Patrouille	Tadoussac	Tadoussac	Parcs Canada		5	7.2	2.7	0.5	0.8	25	Essence	2	Evinrude	150 HP	298	300	2	0.8		16 ¹	1	
Bleuvet	823678		316020434	1994	Recherche	Québec	Québec	GREMM		5	2	7.6	3.0	1.0	20	Diesel	1		200 HP	492	200	1	0.6		6	1	
CCG 753	C25443QC		316032763	2017	Rech. et sauvetage	Ottawa	Ottawa	Pêches et Océans Canada		3	8.1	2.8	0.8	0.8	32	Essence	2	Evinrude	175 HP	261	350	2	0.8	2	8	1	
Harfang des mers	818523		316043419	1997	Passagers	Québec	Les Escoumins	Les Écumeurs du Saint-Laurent (9320-1416 Québec Inc.)		4	3	8.4	2.8	1.5	1.0	16	Diesel	1	Volvo	200 HP	1416	200	1	0.8	1	12	1
Aventure 2	C03095QC		316014056	2002	Passagers	Les Bergeronnes	Les Bergeronnes	Les Croisières Essipit Inc.		5	8.5	3.2	1.2	0.6	25	Essence	2	Yamaha	225 HP	5280	450	2	0.3	1	12	1	
Aventure 3	C03096QC		316014057	2002	Passagers	Les Bergeronnes	Les Bergeronnes	Les Croisières Essipit Inc.		5	8.5	3.2	1.2	0.6	25	Essence	2	Yamaha	225 HP	373	450	2	0.3	1	12	1	
Aventure 6	C03097QC		316014059	2002	Passagers	Les Bergeronnes	Les Bergeronnes	Les Croisières Essipit Inc.		5	8.5	3.2	1.2	0.6	25	Essence	2	Yamaha	225 HP	149	450	2	0.3	1	12	1	
Aventure 7	C03761QC		316014061	2002	Passagers	Les Bergeronnes	Les Bergeronnes	Les Croisières Essipit Inc.		5	8.5	3.2	1.2	0.6	25	Essence	2	Yamaha	225 HP	149	450	2	0.3	1	12	1	
Aventure 8	C03762QC		316014062	2002	Passagers	Les Bergeronnes	Les Bergeronnes	Les Croisières Essipit Inc.		5	8.5	3.2	1.2	0.6	25	Essence	2	Yamaha	225 HP	224	450	2	0.3	1	12	1	
Harfang des mers II	C19621QC		316043419	1999	Passagers	Les Escoumins	Les Escoumins	Les Écumeurs du Saint-Laurent (9320-1416 Québec Inc.)		5	8.5	2.8	1.2	1.0	20	Diesel	1	Volvo	200 HP	149	200	1	0.8	1	12	1	
Falco	(834749) ²				Patrouille	Montréal	Rivière-Éternité	SEPAQ						0.6	22	Essence	1	Yamaha	115 HP	0	115	1	0.6		8	1	
P-28B³	834111		316045984	2009	Passagers	Québec	L'Anse-Saint-Jean	Organisation (3891721 Canada Inc.)		4	3	9.9	3.2	0.8	0.6		Essence	1	Suzuki	300 HP	168	300	1	0.6	1	24	2
AML Saguenay II	818476		316037158	1995	Passagers	Québec	Tadoussac-Baie-Sainte-Catherine	AML Croisières Inc.		8	6	10.0	4.0	1.5	0.7	25	Diesel	2	Volvo	Volvo	336	400	2	0.7	1	24	2
Frank Slim	833870			2009	Passagers	Québec	Tadoussac	Tadoussac Autrement (9364-2486 Québec Inc.)		4	3	10.3	3.7	0.9	0.4	21	Essence	2	Suzuki	225 HP	224	450	2	0.4		12	2
L'Alliance	C06810QC		316013618	2004	Rech./Patrouille	Tadoussac	Tadoussac	Parcs Canada		11		11.0	3.3	1.6	0.9	20	Diesel	2	Volvo	D6 330	336	512	2	0.9		16 ⁴	2
P41	838120		316042776	2013	Passagers	Québec	Les Escoumins	Croisières Escoumins (7793375 Canada Inc.)		5	4	11.5	3.4	0.8	0.5	20	Essence	2	Suzuki	250 HP	448	500	2	0.5	2	47	2
Aventure 9	839963		316033914	2016	Passagers	Les Bergeronnes	Les Bergeronnes	Les Croisières Essipit Inc.		5	4	11.5	3.4	0.8	1.5	20	Essence	2	Yamaha	250 HP	336	500	2	0.6	2	36	2
Cap de Rabast	825012		316005758	2002	Rech. et sauvetage	Ottawa	Tadoussac	Pêches et Océans Canada		34	25	13.9	4.3	2.2	1.4	18	Diesel	2	Caterpillar	Twin 3196	671	350	2	1.4	4	4	3
AML Marsouin	818506		316037152	1996	Passagers	Québec	Tadoussac-Baie-Sainte-Catherine	AML Croisières Inc.		18	14	15.0	5.0	1.7	0.7	24	Diesel	3	Volvo	D16	699	990	3	0.7	2	60	3
Grandes Eaux	833907		316015848	2008	Bateau pilote	Montréal	Les Escoumins	Administration de Pilotage des Laurentides		63	47	19.0	5.0	2.9	1.5	24	Diesel	2	Caterpillar	C-32	1416	1889	2	1.0		10	3
Taukamaim	837052		316021195	2012	Bateau pilote	Montréal	Les Escoumins	Administration de Pilotage des Laurentides		82	62	22.0	6.0	3.2	1.4	13	Diesel	2	Caterpillar	C-32	1416	1889	2	1.0		10	3
AML Zéphyr	813018		316027637	1992	Passagers	Québec	Tadoussac-Baie-Sainte-Catherine	AML Croisières Inc.		171	132	24.0	8.0	2.7	1.5	11	Diesel	2	Volvo	D11-510	224	660	2	1.5		250	4
AML Grand Fleuve	811523	8772647	316020429	1989	Passagers	Québec	Tadoussac-Baie-Sainte-Catherine	AML Croisières Inc.		483	212	32.0	9.0	3.1	2.0	11	Diesel	2	Volvo	D16	1120	1000	2	1.5	15	690	4
AML Levant	813932	9056404	316020432	1991	Passagers	Québec	Tadoussac-Baie-Sainte-Catherine	AML Croisières Inc.		380	161	34.0	9.0	3.1	1.5	11	Diesel	2	Caterpillar	3412	224	1800	2	1.1	9	495	4
Jos-Deschênes	391571	7902271	316007862	1980	Traversier	Québec	Tadoussac-Baie-Sainte-Catherine	Société des Traversiers du Québec		1702	510	79.2	21.9	5.6		13	Diesel	2			1784	2392	2			367 (75 véh.)	5
Armand-Imbeau II	841731	9703215	316030213	2018	Traversier	Québec	Tadoussac-Baie-Sainte-Catherine	Société des Traversiers du Québec		2867	860	87.3	26.0	7.0		14	Diesel	2			3650	7081	2			432 (110 véh.)	5

¹ rarement plus de 6² fin 2019³ Machine pneumatique depuis 2021⁴ 8 depuis 2021

2.3. Caractéristiques des bateaux et navires mesurés

2.3.1. Bateaux de la flottille d'écotourisme d'observation des baleines et autres

À l'exception des deux traversiers de Tadoussac, tous les bateaux ont été mesurés entre le 17 août et le 15 octobre 2018 alors que le dispositif de mesure enregistrait en continu.

Les bateaux ont été classés en 5 groupes selon leur longueur et leur tonnage.

2.3.2. Traversiers de Tadoussac

Les traversiers de la traverse Baie Sainte-Catherine / Tadoussac, le Armand-Imbeau II et le Jos-Deschênes ont été mesurés seulement en 2019, alors que le dispositif de mesure n'enregistrait pas en continu, mais incluait des plages de temps sans enregistrement (cf.

Tableau 1. Caractéristiques de l'observatoire acoustique.

Tableau 1.)

2.3.3. Groupes de bateaux

Pour l'estimation de la distribution des niveaux *SSLs*, les bateaux ont été classés en 5 groupes selon leur longueur, leur tonnage, leur puissance de moteur et le nombre de passagers qu'ils pouvaient transporter (

Tableau 1Tableau 3).

- Le groupe 1 est constitué de 13 bateaux de moins de 10 m pouvant transporter 12 passagers ou moins.
- Le groupe 2 comprend 6 bateaux légèrement plus longs, de 10 à 12 m, pouvant transporter un plus grand nombre de passagers, ne dépassant pas 50 personnes.
- Le groupe 3 réunit 4 bateaux de plus fort tonnage (18 à 82 tonnes) et plus longs (14 à 22 m) que ceux des groupes 1 et 2.
- Le groupe 4 inclut 3 bateaux de croisière de plus de 24 m, de 171 à 483 tonnes, pouvant transporter plus de 250 passagers.
- Le groupe 5 est représenté par deux traversiers, de 79 et 87 m, de la traverse Baie-Sainte-Catherine —Tadoussac.

2.4. Extraction et traitement des données

Le protocole pour calculer les *SSLs* des bateaux à partir de mesures suit les recommandations du standard ANSI/ISO (ANSI 2009; ISO 2016).

Les fichiers .wav de données brutes des hydrophones furent extraits pour les périodes de mesures à partir des métadonnées des passages des bateaux à l'observatoire acoustique. Ceux enregistrés à un taux de 256 000 éch./s ont été rééchantillonnés à 64 000 éch./s. Pour

toutes les étapes de traitements qui précèdent l'obtention des niveaux reçus par tiers d'octave ($RL_{1/3}$), une sensibilité de réception (RS) homogène en fréquence de -165 dB re V/ μ Pa est utilisée (cf. Figure 3). Sur la plage de fréquences mesurée, les sensibilités des hydrophones individuels en fonction de la fréquence varient de -164.4 à -167.4 dB re V/ μ Pa; une correction par tiers d'octave est appliquée ultérieurement pour tenir compte de ces variations (Section 2.4.4).

2.4.1. Extraction des segments d'enregistrement des hydrophones

Le point d'approche le plus près (cpa)

La portion du trajet de mesure des SLs de $\pm 30^\circ$ de part et d'autre du cpa (Figure 4, bas) est centrée sur le maximum de puissance sonore du transit à l'hydrophone du bas du dispositif de mesure. Cette référence centrée sur la source acoustique est préférable à une mesure du cpa en fonction de la position du bateau fournie par le GPS, notamment pour les bateaux de grande taille, où la position GPS ne correspond pas nécessairement à la localisation de la source principale de bruit (hélice ou motorisation). Comme le protocole demande un passage à une distance relativement faible du dispositif de mesure (150 m, cf. Figure 2), un décalage de quelques dizaines de mètres peut entraîner des erreurs notables sur les SLs estimés.

De forts bruits occasionnels de basse fréquence dus à des cognements du dispositif de mesure avec le courant peuvent fausser l'estimation de ce niveau maximum. Pour éviter cette éventuelle interférence lors de la détermination du cpa, un filtre Butterworth passe-haut de troisième ordre et de fréquence de coupure à 300 Hz est d'abord appliqué sur le signal acoustique. L'énergie médiane du signal est ensuite estimée sur une fenêtre glissante de 20 s. Le cpa est le point maximal de cette série temporelle d'énergie. Il faut noter que le filtre passe-haut est appliqué uniquement pour déterminer le cpa.

La période correspondant au passage dans un pinceau de $\pm 30^\circ$ par rapport au temps de passage au cpa est obtenue à partir des positions GPS du bateau de part et d'autre du maximum acoustique. Un spectrogramme du bruit rayonné par le bateau lors du passage (plus long que ce segment de $\pm 30^\circ$) est généré pour une confirmation visuelle de la bonne localisation du cpa à partir des figures d'interférences de Lloyds que présente le spectrogramme (p. ex. Simard et al. 2016, Fig. 2).

Pour les mesures alors que les bateaux ne sont pas en déplacement, vitesse dite « au neutre », une fenêtre de 30 s est sélectionnée manuellement dans la période spécifiée par les métadonnées.

2.4.2. Contrôle de qualité des enregistrements et niveau de bruit ambiant

Le bruit ambiant lors des enregistrements

Lorsque les conditions l'ont permis, un segment de 30 s fut enregistré alors que les moteurs du bateau étaient éteints avant son passage à l'observatoire pour sa mesure de SL . Ce segment de données est utilisé pour obtenir le spectre du bruit ambiant au moment des mesures. Si pour quelques raisons les moteurs ne pouvaient être éteints (ainsi que la ou les

génératrices à bord), le segment servant à décrire le bruit ambiant fut enregistré alors que les hélices n'étaient pas embrayées et que le bateau était à plus de 1000 m de l'observatoire. Le niveau sonore ambiant reçu ($RL_{ambiant}$), estimé pour chaque hydrophone du dispositif de mesure, est la moyenne temporelle, par tiers d'octave, des niveaux sonores de ce segment de 30 s (Section 2.4.4).

2.4.3. Élimination des bruits de cognements et de vibrations

Le bruit intermittent masqué

Certains segments d'enregistrement présentent des cognements intermittents formant des bruits transitoires large bande qui sont bien visibles sur les spectrogrammes. Lorsque l'enregistrement n'est pas trop pollué, ces bruits transitoires sont exclus des analyses pour les bandes de fréquences problématiques. La déviation instantanée, pour une bande de fréquences donnée, est mesurée par rapport à une fenêtre de voisinage glissante. Les cases temps-fréquence, (t, f) , du spectrogramme où la densité spectrale, $PSD(t, f)$, dévie trop du niveau du voisinage immédiat, $moy(PSD_{fenêtre})$, sont annotées et masquées (retirées) pour le calcul des RLs . Ces cases correspondent aux zones de fortes déviations où les cognements existent. Ainsi sont masqués les points $PSD(t, f)$ tels que

$$PSD(t, f)^2 - moy(PSD_{fenêtre})^2 > \gamma \cdot variance(PSD_{fenêtre}), \quad (1)$$

où PSD dénote la densité spectrale, $PSD_{fenêtre} = PSD([t - \frac{\Delta t}{2}, t + \frac{\Delta t}{2}], f)$ est l'ensemble des valeurs de densité spectrale dans une certaine période Δt et γ est un facteur ajusté manuellement entre 0.5 et 2 à partir de la visualisation du spectrogramme masqué.

Le pseudobruit de basses fréquences

Le dispositif de mesure sur la colonne d'eau de 161 m, composé de 3 hydrophones à trois profondeurs et maintenus sur une ligne de mouillage avec ses équipements de flottaison sous-marines, représente un obstacle soumis aux mouvements des masses d'eaux. L'effet de trainée (drag) du dispositif est élevé lors des forts courants de marée. Ceci engendre des vibrations du mouillage (strum) et de la turbulence près des hydrophones souvent appelée bruit d'écoulement (flow noise) (Haddle and Skudrzyk 1969; Skudrzyk 1988). Les hydrophones enregistrent les variations de pression que génèrent ces processus, en plus du bruit sous-marin qu'on veut estimer. On nomme *pseudobruit* ces variations de pression non désirées. Ce pseudobruit est généralement plus élevé dans les basses fréquences. Lorsqu'il est présent, les données mesurées sont considérées invalides.

Lors des mesures à l'observatoire acoustique, les effets de pseudobruit étaient parfois présents dans les données, mais cette présence était détectable et les mesures bruitées ont pu être éliminées. L'examen de l'inclinaison du mouillage (par les changements de la profondeur des hydrophones) témoignait alors de l'important effet des courants de marée. Ainsi, les mesures de $SSLs$ présentées dans ce rapport sont limitées aux fréquences où le pseudobruit était absent, lesquelles étaient parfois supérieures à 100 Hz.

2.4.4. Calcul des niveaux reçus par bande de tiers d'octave

Des filtres passe-bandes Butterworth d'ordre 3 sont utilisés pour la séparation du signal en tiers d'octave ($s_{1/3}$) standards (ANSI/ASA 2014). Le niveau sonore reçu en tiers d'octave ($RL_{1/3}$) pour une bande donnée est la racine de la moyenne quadratique (*rms*) du signal associé. Les temps masqués (cf. 2.4.3) sont alors considérés comme données manquantes dans le calcul. Une fois ces niveaux sonores en tiers d'octave obtenus, la calibration initiale constante à toutes les fréquences mentionnées plus haut (cf. 2.4 1^{er} par.,

Tableau 1) est rectifiée pour prendre en compte la variation de RS en fonction de la fréquence sur la bande de tiers d'octave ($C_{1/3}dB$). Ainsi,

$$RL_{1/3} = 20 \log_{10} \left(rms(s_{1/3}) \right) + C_{1/3}dB \quad (2)$$

Pour alléger le texte qui suit, il est implicite que les RL , SL et TL sont des niveaux par tiers d'octave, à moins d'indications contraires.

Soustraction du bruit ambiant & rapport signal à bruit

Le rapport signal sur bruit (RSB) est pris en soustrayant le $RL_{ambiant}$ (dB) aux RL (dB) mesurés dans la fenêtre de $\pm 30^\circ$ autour du cpa, pour chaque tiers d'octave. En concordance avec les recommandations du protocole standard ANSI/ISO (ANSI 2009; ISO 2016), les paires hydrophone-octave ayant un RSB < 3 dB sont notées.

Pour les tiers d'octaves le permettant (i.e. ceux ayant un RSB > 3 dB), le bruit ambiant $RL_{ambiant}$ (2.4.2) est soustrait (en pression), des niveaux sonores reçus. Ainsi,

$$RL = 10 \log_{10} \left(10^{\left(\frac{RL}{10}\right)} - 10^{\left(\frac{RL_{ambiant}}{10}\right)} \right). \quad (3)$$

2.4.5. Calcul des pertes de propagation par bande de tiers d'octave

Les pertes par propagation dans le milieu (TL) sont obtenues d'une modélisation par intégration du nombre d'onde (WI, cf. (Simard et al. 2016)) utilisant un profil de célérité sur la colonne d'eau issu de mesures CTD (Conductivity Temperature Depth) effectuées dans la région et les caractéristiques du fond estimées par (Simard et al. 2016) et la profondeur de la source d'émission (i.e. profondeur de l'hélice des bateaux). Cette méthode intègre les composantes de la propagation affectant le signal reçu ($RL(f)$) aux hydrophones, notamment les réflexions à la surface (engendrant la propriété « dipôle » de la source) et sur le fond.

Le niveau de source obtenu en corrigeant le niveau ($RL(f)$) mesuré aux hydrophones par ces pertes de transmission selon le modèle WI de propagation d'intégration du nombre d'onde, qui prend en compte les réflexions en surface et sur le fond, est le niveau de source dit *monopôle*. Il diffère du niveau de source dit *dipôle* ou URN « Underwater Radiated Noise » qui est obtenu lorsque les mesures ($RL(f)$) sont corrigées par de simples pertes sphériques (ISO 2019).

Les pertes de transmissions $TL(f, r)$ estimées le long des trajets source-hydrophone sont moyennées sur la fenêtre du passage ($\pm 30^\circ$) de mesure du RL . Les TLs par tiers d'octave pour chaque hydrophone sont obtenus en prenant la moyenne linéaire des $TL(f)$ pour chaque fréquence modélisée sur le tiers d'octave.

$$TL = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{n_f} \sum_{i=1}^{n_f} 10^{TL(f_i)/10} \right) \quad (4)$$

où n_f est le nombre de fréquences modélisées sur le tiers d'octave.

2.4.6. Calcul des niveaux $SSLs$ par bande de tiers d'octave

Pour chaque hydrophone, les pertes par propagation estimées (TL_h) sont additionnées aux niveaux mesurés (RL_h) pour obtenir le niveau à la source (SL_h):

$$SL_h = RL_h + TL_h. \quad (5)$$

Le niveau à la source SL_{tr} pour un même transit du bateau à l'observatoire est obtenu en prenant la moyenne des (SL_h) aux trois hydrophones,

$$SL_{tr} = 10 \log_{10} ([10^{SL_{h1}/10} + 10^{SL_{h2}/10} + 10^{SL_{h3}/10}] / 3), \quad (6)$$

où SL_{hi} réfère aux (SL_h) obtenus pour l'hydrophone du bas, du milieu et du haut de l'observatoire.

Les SLs d'un groupe de n transits (p. ex. pour une même vitesse de passage) sont obtenus en prenant la moyenne des (SL_{tr}) (ANSI 2009, eq. 8):

$$SL = \frac{\sum_{k=1}^n SL_k}{n}. \quad (7)$$

Le niveau spectral à la source (SSL) (dB re 1 μ Pa @ 1 m par tiers d'octave) est l'ensemble des SLs par intervalle de tiers d'octave sur la plage fréquentielle mesurée.

2.4.7. Calcul des niveaux SL large bande

Le niveau SL large-bande (dB re 1 μ Pa @ 1 m) est le niveau SSL intégré sur des bandes de fréquences mesurées. Dans ce travail, les niveaux large-bande médians par groupe de bateaux ont été calculés sur deux bandes de fréquences : bande 1, [89 Hz à 449 Hz] et bande 2, [445 Hz à 28062 Hz]. Ils correspondent à la somme des niveaux $SSLs$ médians intégrés sur les bandes de tiers d'octave centrées sur les fréquences [100, 125, 160, 200, 250, 315 et 400 Hz] pour la bande 1, et sur les fréquences [500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150, 4000, 5000, 6350, 8000, 10000, 12500, 16000, 20000 et 25000 Hz] pour

la bande 2. La première bande a pour objet de décrire les niveaux sonores qui s'imposent principalement aux mysticètes alors que la seconde bande correspond plus aux fréquences privilégiées par les communications des bélugas et d'autres odontocètes.

2.4.8. Calcul des statistiques des niveaux SL s et SSL s par groupe de bateaux

Les barres d'incertitudes

Deux types d'incertitudes sont prises en compte indépendamment pour les barres d'erreurs affichées : l'incertitude relative au niveau reçu (RL) et celle relative aux pertes par propagation (TL).

Pour la première, un analogue au protocole ANSI S12.64 (ANSI 2009) pour déterminer l'incertitude sur les RL est appliquée. Ainsi,

$$\sigma_{transit}^2 = var(SL) \text{ et } \sigma_{vitesse}^2 = moyenne(\sigma_{transit}^2) \quad (8)$$

pour les transits à la même vitesse.

L'incertitude sur les TL est divisée en une partie associée à la profondeur de la source, s_z , – qui est ni une source ponctuelle, ni toujours bien connue – et une autre partie associée à l'incertitude de position relative source-hydrophone.

L'impact de cette première incertitude est estimé en calculant la déviation standard σ_{s_z} d'un ensemble de $TL(s_z)$ (sur les valeurs en dB) dans un voisinage Δz du s_z utilisé dans les calculs.

La seconde incertitude dépend de la position de l'observatoire et de sa disposition (inclinaison-orientation) qui se reflète dans la distance radiale hydrophone-source (r). De manière similaire, la déviation standard σ_r est prise sur un ensemble de $TL(r)$ associé à un voisinage de r plausibles, défini à partir des données de profondeur des hydrophones (=proxy de leur inclinaison). Ces deux composantes sont considérées comme indépendantes.

L'incertitude finale σ (de part et d'autre des $SL_{vitesse}$) est obtenue par la norme euclidienne de ces composantes indépendantes (RL et TL).

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{RL}^2 + \sigma_{TL}^2} = \sqrt{\sigma_{vitesse}^2 + \sigma_{TL_{rayon}}^2 + \sigma_{TL_{zs}}^2} \quad (9)$$

2.5. Exemple pour un bateau

Un exemple d'acquisition et de traitement des données lors d'un transit type d'un bateau à l'observatoire acoustique est présenté ci-dessous. Ce processus est répété pour chacun des transits du bateau à l'observatoire. Lors de ce trajet, la vitesse nominale du bateau était 25 kn. L'état de la marée était à la première heure du flot. Les séries temporelles de température mesurées aux profondeurs des hydrophones à intervalles de 15 min indiquaient que l'upwelling tidal des masses d'eau, connu pour cette région à la tête du Chenal

Laurentien (Saucier and Chassé 2000), commençait à se faire sentir sur toute la colonne d'eau. Les profondeurs mesurées des 3 hydrophones de l'observatoire (Figure 2, d1, d2, d3) étaient 43 m, 88 m et 150 m. L'angle d'inclinaison général du mouillage par rapport à la verticale était d'environ 24°. La distance d_{cpa} du bateau à l'observatoire lors du passage au cpa a été estimée à 204 m. Les trois angles de mesure du champ de bruit rayonné par le bateau par rapport à l'horizontale (Figure 1, Figure 2, α_1 , α_2 , α_3) étaient alors de 12°, 23° et 36°.

Le transit du bateau à vitesse constante représentant 700 m (Figure 4, entre les points E1 et E2) a duré 50 s, ce qui donne une vitesse SOG de transit de 26.6 kn (Figure 5). Le cpa acoustique est déterminé par le temps du maximum d'énergie reçu à l'hydrophone le plus profond de l'observatoire, sur la bande de fréquences > 300 Hz (Figure 5, C). La bande de fréquences inférieure à 300 Hz étant souvent affectée par le pseudobruit des vibrations et cognements, elle est ignorée ici dans la recherche du maximum d'énergie afin focaliser sur le bruit propre du bateau. Un segment de temps correspondant à $\pm 30^\circ$ autour du cpa (Figure 5, B) est ensuite déterminé et utilisé pour l'estimation du SL, en accord avec le protocole ANSI/ISO.

Les spectrogrammes des enregistrements acoustiques reçus aux trois hydrophones de l'observatoire sur toute la bande de fréquences mesurée, entre les points E1 et E2 du trajet à vitesse constante, indiquent des niveaux de bruit qui diffèrent entre les 3 hydrophones, de façon non uniforme sur tout le spectre de fréquences (Figure 6). Ces différences sont attendues étant donné que les distances obliques entre les hydrophones et le bateau augmentent avec la profondeur de ces derniers (Figure 2) et que la propagation du son ne suit pas un modèle monotone de dispersion sphérique, mais un modèle plus complexe (cf. Simard et al. 2016).

Aux plus basses fréquences, où le bruit rayonné par les bateaux est le plus fort, on remarque aussi des différences dans le patron spectral général des niveaux de bruit reçus aux 3 profondeurs (Figure 7). Les enregistrements de l'hydrophone le plus profond de l'observatoire se démarquent par des bandes récurrentes de fort bruit de courte durée entre 0 et 1 kHz, qui correspondent à des cognements provenant du dispositif de mouillage. Quand les spectrogrammes sont examinés plus en détail, on retrouve aussi des traces de ces cognements sur les enregistrements des hydrophones supérieurs (Figure 8, B). Ces parties d'enregistrements affectées par ce pseudobruit transitoire sont éliminées (Figure 8, B zones blanches) et considérées comme données manquantes pour les traitements subséquents. Dans certains enregistrements, les forts bruits en basse fréquence n'étaient plus transitoires, mais forts et continus. Dans ces cas les enregistrements de la bande de fréquences affectée sont tous déclarés manquants.

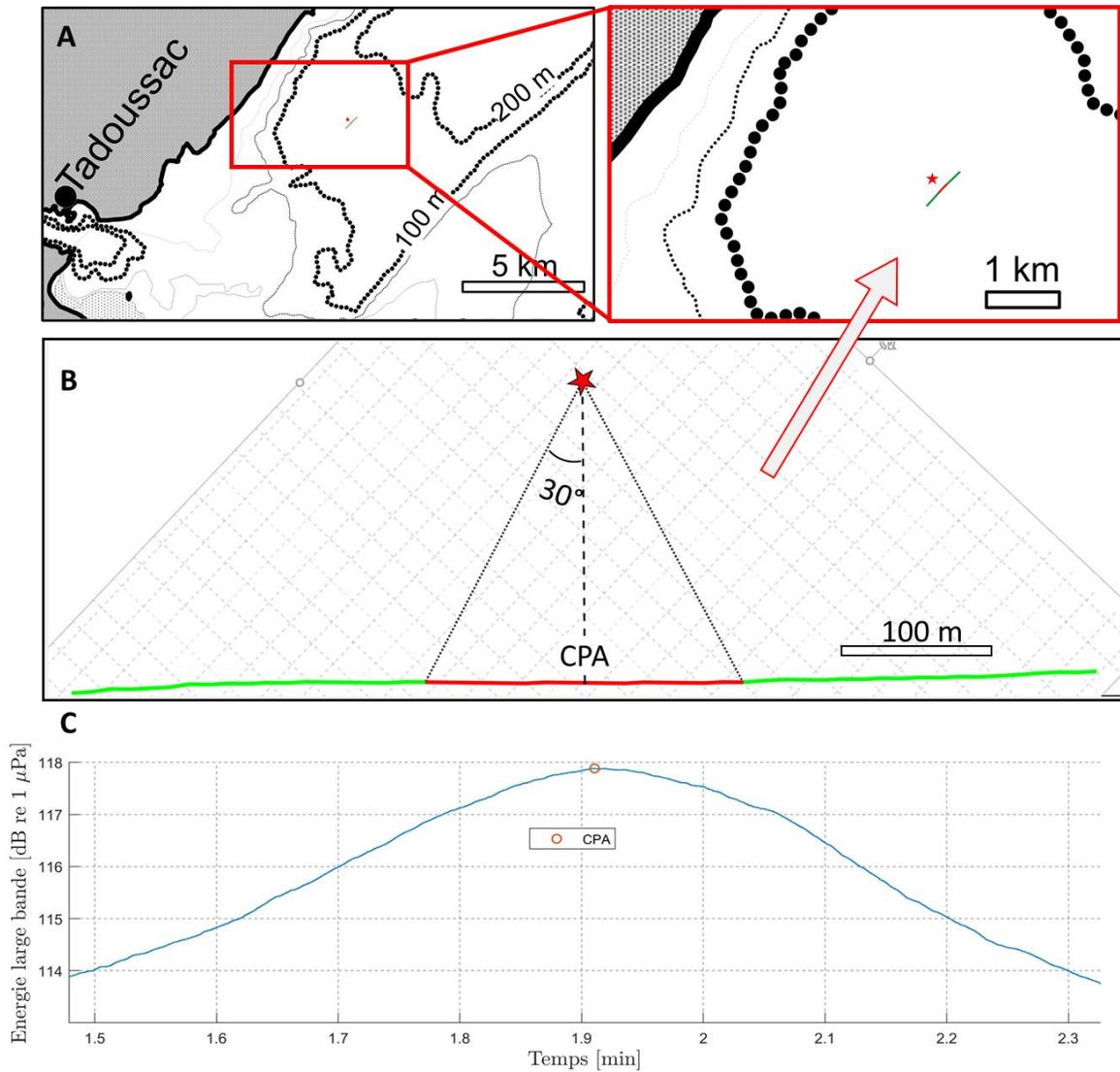


Figure 5. Cartes d'un trajet de navigation d'un bateau typique pour sa mesure de SL à l'observatoire acoustique (PP3) (A) et géométrie du passage (B) pour un transit à vitesse nominale constante de 25 kn entre les points E1 et E2 (Figure 4). Énergie du bruit large bande [0.3-16 kHz] reçu à un hydrophone le long du trajet (C). CPA: point le plus rapproché. Trajet (en rouge) de mesure du SL ANSI/ISO: $\pm 30^\circ$ centré sur le cpa.

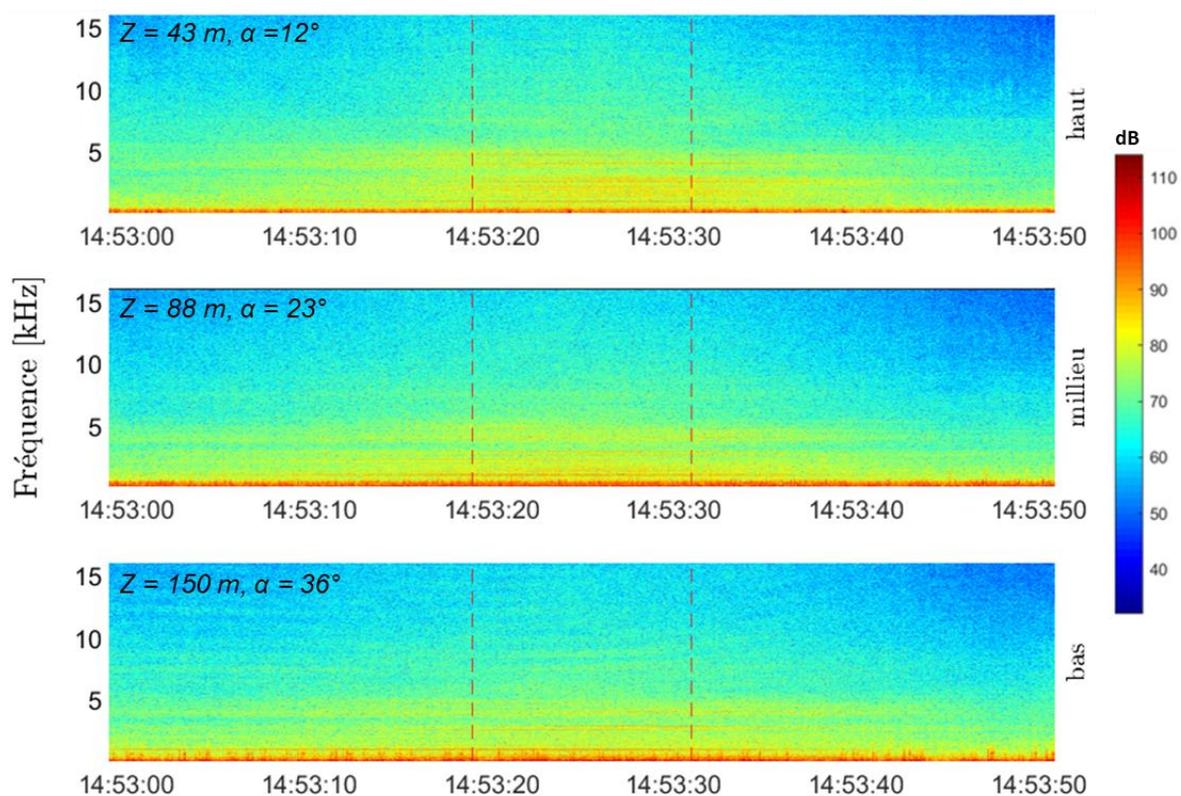


Figure 6. Spectrogrammes [0-16 kHz] (dB re $1\ \mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$) des niveaux de bruit reçus aux hydrophones lors du trajet de navigation d'un bateau typique pour sa mesure de SL à l'observatoire acoustique (PP3) pour un transit à vitesse nominale constante de 25 kn entre les points E1 et E2 (Figure 4).

Z: profondeur de l'hydrophone; α : angle de mesure par rapport à l'horizontale.

Le segment central entre les lignes brisées correspond à celui des mesures du SL ANSI/ISO de $\pm 30^\circ$ centré sur le **cpa**.

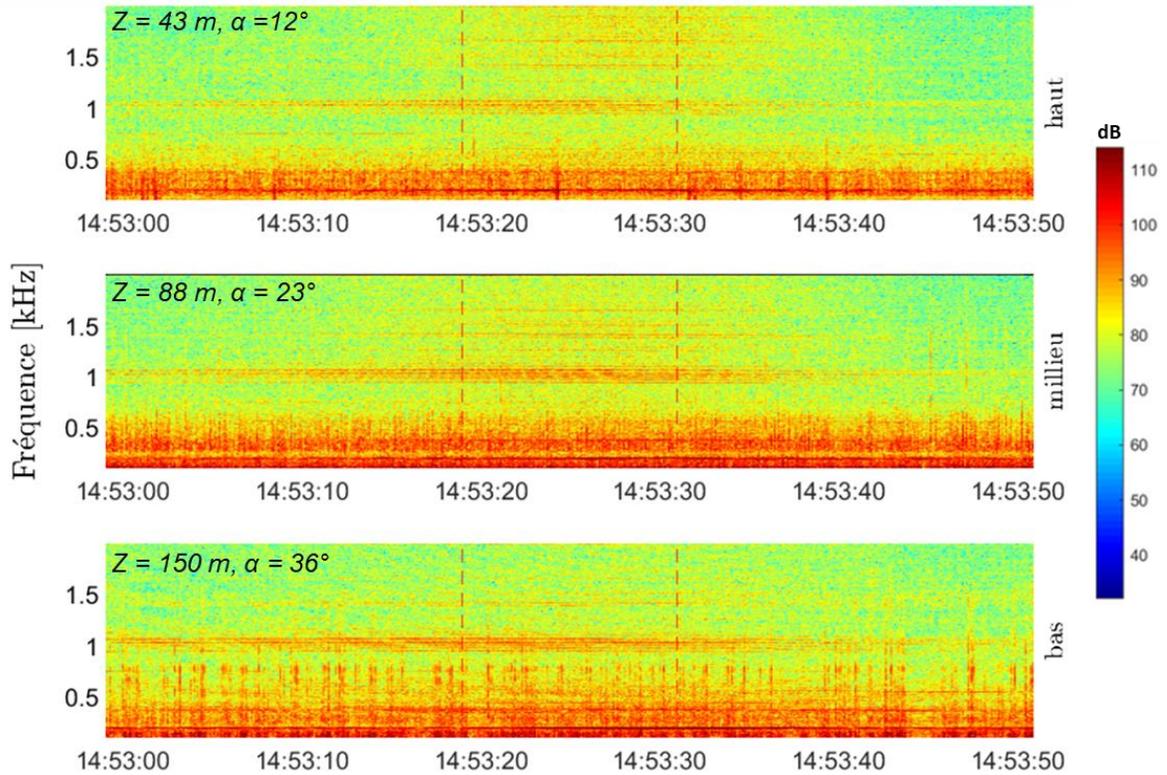


Figure 7. Spectrogrammes [0-2 kHz] (dB re 1 $\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$) des niveaux de bruit reçus aux hydrophones lors du trajet de navigation d'un bateau typique pour sa mesure de SL à l'observatoire acoustique (PP3) pour un transit à vitesse nominale constante de 25 kn entre les points E1 et E2 (Figure 4).

Z : profondeur de l'hydrophone; α : angle de mesure par rapport à l'horizontale.

Le segment central entre les lignes brisées correspond à celui des mesures du SL ANSI/ISO de $\pm 30^\circ$ centré sur le **cpa**.

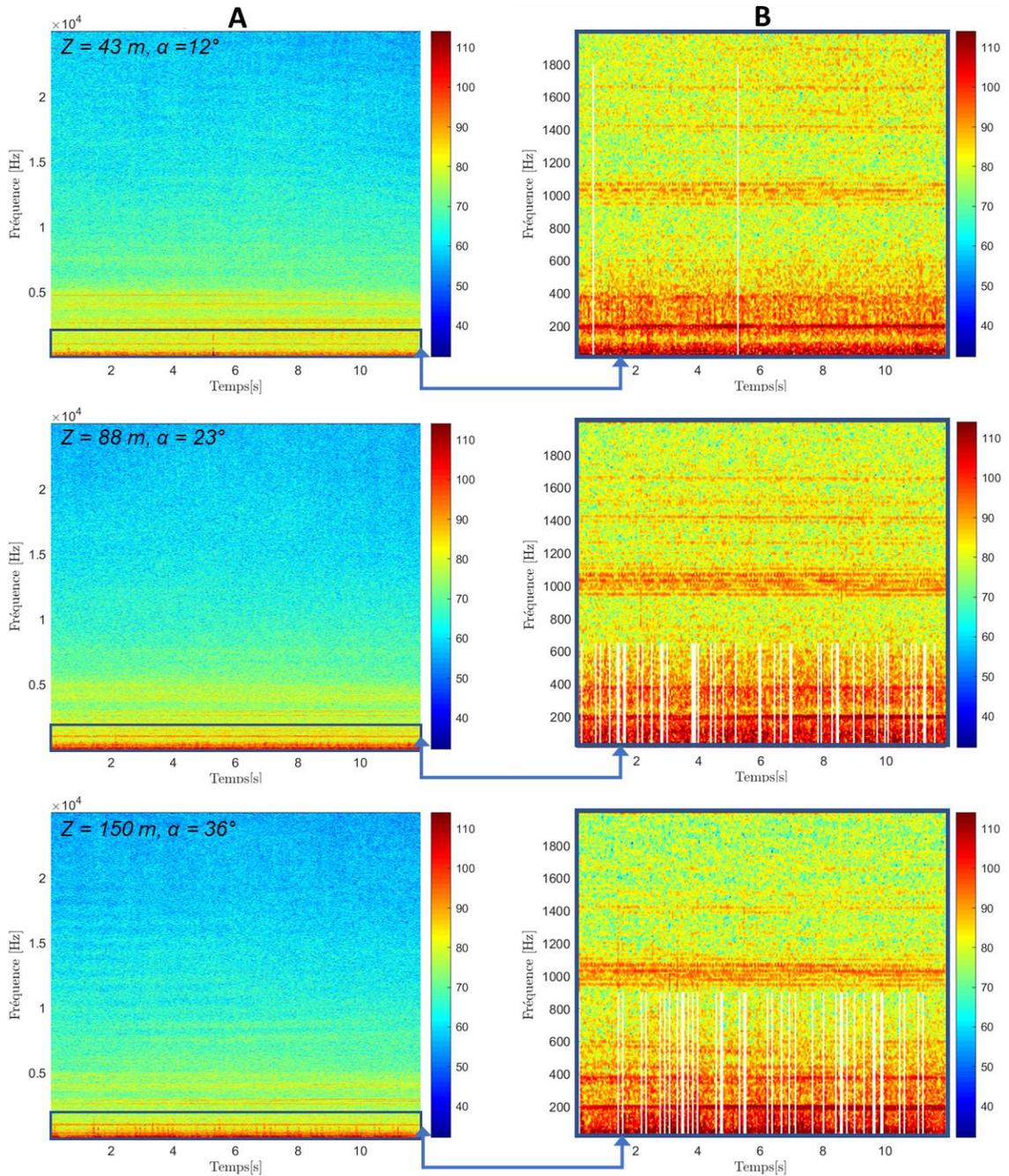


Figure 8. Spectrogrammes [0-16 kHz] (A) (dB re 1 $\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$) et zoom [0-2 kHz] (B) des niveaux de bruit reçus aux hydrophones lors du trajet de navigation d'un bateau typique pour sa mesure de SL sur le segment de $\pm 30^\circ$ centré sur le cpa à l'observatoire acoustique (PP3) pour un transit à vitesse nominale constante de 25 kn.

Z: profondeur de l'hydrophone; α : angle de mesure par rapport à l'horizontale.
 Les lignes blanches en B correspondent à des bruits de cognements éliminés ignorés pour les estimations du SL.

3. RÉSULTATS

3.1. Niveaux SSLs par tiers d'octave par groupe de bateaux

Les niveaux *SSLs* sont présentés par groupe de bateaux (c.f. Tableau 3 à Tableau 7) pour 3 vitesses différentes : moteur au neutre, en attente; transit à 10 kn, transit à 15 kn et transit à 25 kn lorsque possible. La distribution médiane des niveaux est présentée par un ligne pointillée; l'intervalle entre le 25^{ième} percentile et le 75^{ième} percentile, représentant 50% des bateaux, est présenté par une enveloppe grisée foncée; l'intervalle entre les 5^{ème} et 95^{ième} percentiles, représentant 90% des *SSLs* des bateaux, est en grisé pâle. Ces distributions ont été construites à partir des niveaux selon l'équation 7, en tiers d'octave.

Les graphiques des *SSLs* à toutes les vitesses testées sont d'abord commentés pour chaque groupe à la fin de chaque section. Ensuite les *SSLs* de tous les groupes à différentes vitesses sont présentés ensemble dans une autre section et leurs différences sont commentées.

Tableau 4. Niveaux *SSLs* médians (tiers d'octave, dB re 1 μ Pa @ 1 m) par groupe de bateaux, moteurs au neutre.

Fréquence centrale (Hz)	Vitesse = moteurs au neutre				
	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Groupe 4	Groupe 5
20	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
25	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
31.5	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
40	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
50	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
63	n.d.	170	n.d.	n.d.	n.d.
80	n.d.	167	n.d.	n.d.	n.d.
100	164	171	171	n.d.	n.d.
125	162	169	171	173	n.d.
160	159	162	166	171	n.d.
200	157	153	164	168	n.d.
250	153	152	160	162	n.d.
315	151	151	158	157	n.d.
400	147	146	156	151	n.d.
500	144	145	150	149	n.d.
630	141	141	147	150	n.d.
800	141	137	149	146	n.d.
1000	143	137	150	155	n.d.
1250	138	136	147	151	n.d.
1600	141	139	143	151	n.d.
2000	138	135	144	150	n.d.
2500	138	137	141	141	n.d.
3150	134	135	134	136	n.d.
4000	132	132	130	135	n.d.
5000	133	131	128	133	n.d.
6350	127	128	125	127	n.d.
8000	127	126	122	126	n.d.
10000	127	125	121	126	n.d.
12500	125	123	126	123	n.d.
16000	123	120	129	121	n.d.
20000	124	120	128	119	n.d.
25000	122	122	126	118	n.d.

Tableau 5. Niveaux SSLs médians (tiers d'octave, dB re 1 μ Pa @ 1 m) par groupe de bateaux, vitesse 10 kn.

Fréquence centrale (Hz)	Vitesse, 10 kn				
	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Groupe 4	Groupe 5
20	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	195
25	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	190
31.5	n.d.	165	n.d.	178	186
40	n.d.	167	n.d.	182	186
50	n.d.	163	185*	185	182
63	n.d.	166	180*	178	181
80	n.d.	164	181*	178	180
100	166	171	181*	173	176
125	171	174	184*	167	173
160	174	170	184*	171	170
200	165	167	173	169	167
250	166	166	161	165	167
315	160	162	159	162	167
400	155	159	159	160	171
500	152	152	159	159	169
630	153	149	156	157	166
800	149	147	155	155	165
1000	150	145	156	160	169
1250	151	147	154	158	164
1600	152	150	156	161	164
2000	151	154	156	165	164
2500	155	154	152	154	160
3150	153	153	153	153	160
4000	151	152	152	152	159
5000	151	148	153	151	158
6350	146	145	149	149	157
8000	144	144	148	147	157
10000	144	145	148	148	156
12500	144	142	147	146	155
16000	142	140	147	146	n.d.
20000	140	140	147	145	n.d.
25000	139	139	146	144	n.d.

* Ces valeurs correspondent à un seul des 4 bateaux, dont le fort niveau de bruit détonne par comparaison aux autres.

Tableau 6. Niveaux *SSLs* médians (tiers d'octave, dB re 1 μ Pa @ 1 m) par groupe de bateaux, vitesse 15 kn.

Fréquence centrale (Hz)	Vitesse, 15 kn				
	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Groupe 4	Groupe 5
20	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
25	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
31.5	n.d.	165	n.d.	n.d.	n.d.
40	n.d.	167	n.d.	n.d.	n.d.
50	n.d.	165	n.d.	n.d.	n.d.
63	n.d.	170	n.d.	n.d.	n.d.
80	n.d.	168	n.d.	n.d.	n.d.
100	174	167	n.d.	171	n.d.
125	171	169	n.d.	169	n.d.
160	175	175	n.d.	173	n.d.
200	165	168	n.d.	171	n.d.
250	165	166	162	168	n.d.
315	161	165	160	172	n.d.
400	158	161	158	169	n.d.
500	155	154	161	164	n.d.
630	154	151	158	165	n.d.
800	151	148	155	164	n.d.
1000	153	148	157	167	n.d.
1250	152	150	155	160	n.d.
1600	153	151	159	167	n.d.
2000	153	158	162	163	n.d.
2500	157	155	156	160	n.d.
3150	154	156	162	164	n.d.
4000	155	156	158	163	n.d.
5000	152	150	156	162	n.d.
6350	147	148	159	159	n.d.
8000	146	146	157	160	n.d.
10000	145	147	155	157	n.d.
12500	144	142	153	158	n.d.
16000	140	142	154	156	n.d.
20000	141	141	153	156	n.d.
25000	139	140	152	155	n.d.

Tableau 7. Niveaux *SSLs* médians (tiers d'octave, dB re 1 μ Pa @ 1 m) par groupe de bateaux, vitesse 25 kn.

Fréquence centrale (Hz)	Vitesse, 25 kn				
	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Groupe 4	Groupe 5
20	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
25	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
31.5	168	164	n.d.	n.d.	n.d.
40	173	170	n.d.	n.d.	n.d.
50	169	170	n.d.	n.d.	n.d.
63	167	174	n.d.	n.d.	n.d.
80	165	178	n.d.	n.d.	n.d.
100	166	177	n.d.	n.d.	n.d.
125	163	171	n.d.	n.d.	n.d.
160	164	171	172	n.d.	n.d.
200	178	169	172	n.d.	n.d.
250	165	168	169	n.d.	n.d.
315	163	165	171	n.d.	n.d.
400	165	164	170	n.d.	n.d.
500	160	162	170	n.d.	n.d.
630	158	159	169	n.d.	n.d.
800	154	156	168	n.d.	n.d.
1000	158	154	167	n.d.	n.d.
1250	155	156	166	n.d.	n.d.
1600	157	157	166	n.d.	n.d.
2000	158	160	169	n.d.	n.d.
2500	159	160	164	n.d.	n.d.
3150	160	161	167	n.d.	n.d.
4000	158	160	165	n.d.	n.d.
5000	157	155	162	n.d.	n.d.
6350	154	156	164	n.d.	n.d.
8000	152	155	164	n.d.	n.d.
10000	152	157	165	n.d.	n.d.
12500	151	154	161	n.d.	n.d.
16000	150	155	163	n.d.	n.d.
20000	149	154	162	n.d.	n.d.
25000	148	154	164	n.d.	n.d.

3.1.1. Groupe 1, 13 bateaux de moins de 10 m

Moteur au neutre

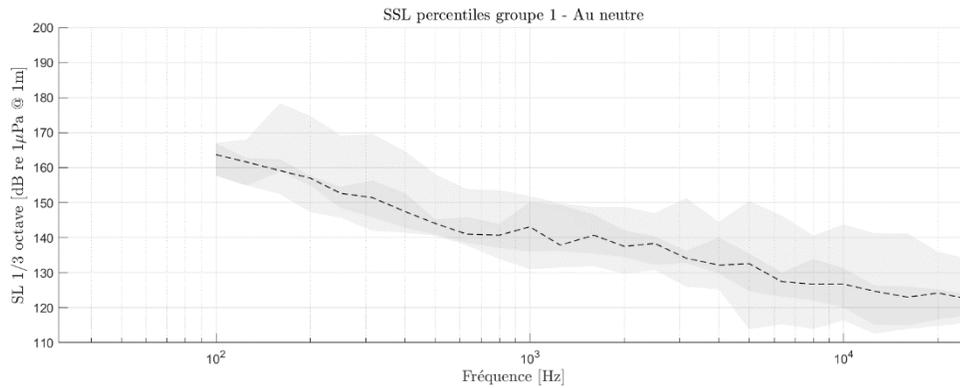


Figure 9. Niveaux SSLs en tiers d'octave des bateaux du groupe 1, moteur au neutre.

Ligne pointillée: médiane.

Gris foncé : 25^{ème} à 75^{ème} percentile. Gris pale : 5^{ème} à 95^{ème} percentile.

Transit à 10 kn

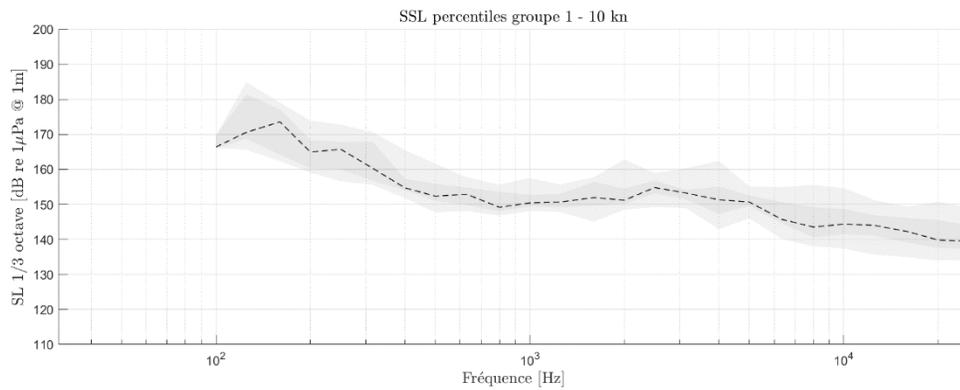


Figure 10. Niveaux SSLs en tiers d'octave des bateaux du groupe 1, vitesse 10 kn.

Ligne pointillée: médiane.

Gris foncé : 25^{ème} à 75^{ème} percentile. Gris pale : 5^{ème} à 95^{ème} percentile.

Transit à 15 kn

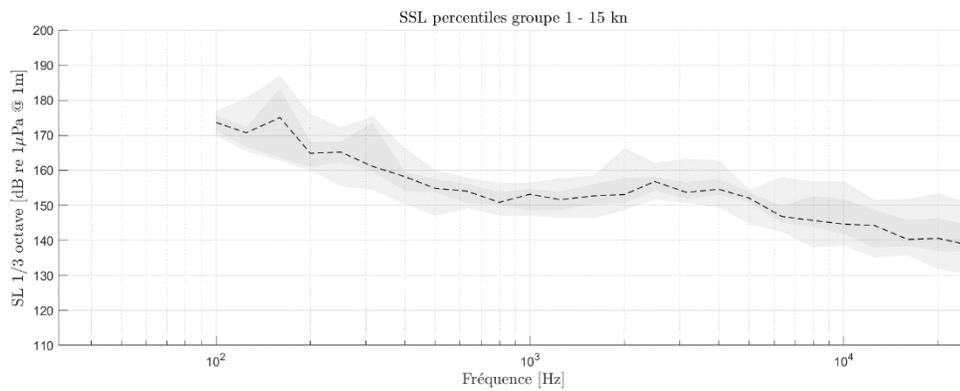


Figure 11. Niveaux SSLs en tiers d'octave des bateaux du groupe 1, vitesse 15 kn.

Ligne pointillée: médiane.

Gris foncé : 25^{ème} à 75^{ème} percentile. Gris pale : 5^{ème} à 95^{ème} percentile.

Transit à 25 kn

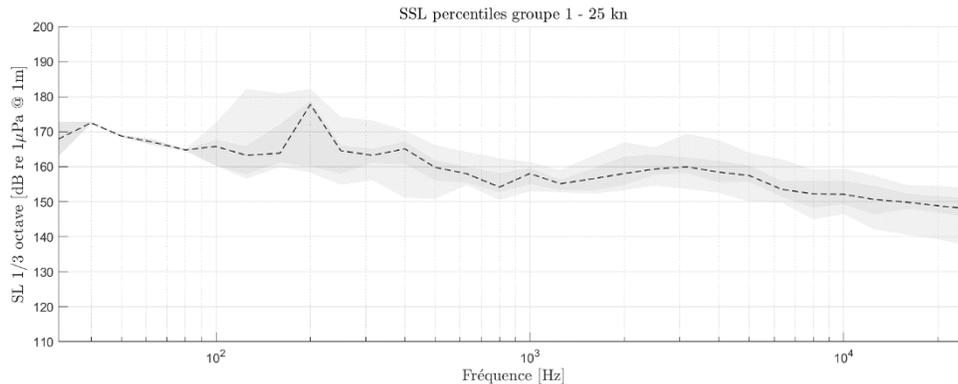


Figure 12. Niveaux *SSLs* en tiers d'octave des bateaux du groupe 1, vitesse 25 kn.
Ligne pointillée: médiane.
Gris foncé : 25^{ème} à 75^{ème} percentile. Gris pale : 5^{ème} à 95^{ème} percentile.

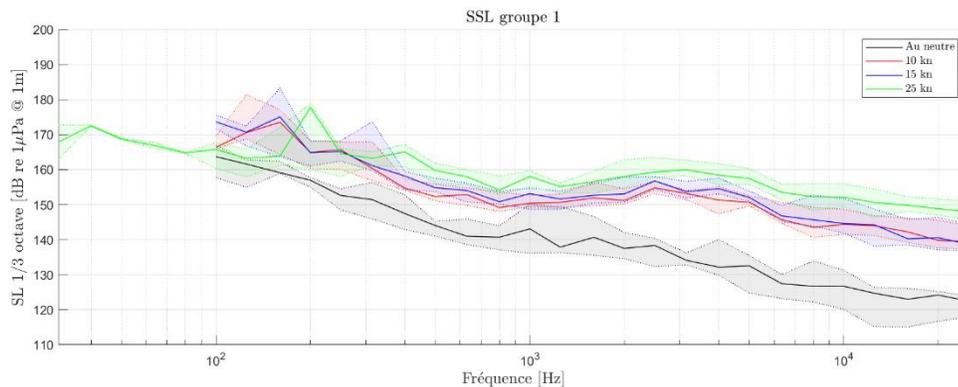


Figure 13. Niveaux *SSLs* médians en tiers d'octave des bateaux du groupe 1 en fonction des vitesses 0, 10, 15 et 25 kn.
Les enveloppes sont celles des interquartiles (25% à 75%).

Bien que la variabilité intra-groupe des niveaux *SSLs* estimés en conditions de moteur au neutre soit élevée, avec 5 dB pour l'intervalle interquartile (25% à 75%) et 10 à 20 dB pour 90% de la distribution, la médiane des *SSLs* indique une nette tendance de décroissance monotone de ~20 dB par décade (~6 dB par octave), passant de ~165 dB re 1 μPa @ 1 m dans la bande de tiers d'octave centrée à 100 Hz, à ~125 dB re 1 μPa @ 1 m dans celle centrée à 25 kHz (Figure 9, Tableau 4). Les bateaux en transit ont des niveaux *SSLs* qui sont de 10 à 30 dB supérieurs à ceux mesurés quand les moteurs sont au neutre (Figure 10 à Figure 13, Tableau 5 Tableau 4 à Tableau 7). La décroissance de niveau n'est plus monotone en fonction de la fréquence, mais indique une élévation du bruit entre ~ 800 Hz et 7 kHz (Figure 10 à Figure 13, Tableau 5 à Tableau 7). L'effet du changement de vitesse entre 10 et 15 kn sur les niveaux *SSLs* est indiscernable, mais il est évident en passant à une vitesse de transit de 25 kn. Il augmente alors de quelques 3 à 7 dB dans la bande de fréquences de ~400 Hz à 25 kHz par rapport aux vitesses de 10 et 15 kn (Figure 13, Tableau 5 à Tableau 7).

3.1.2. Groupe 2, 6 bateaux de 10 à 12 m

Moteur au neutre

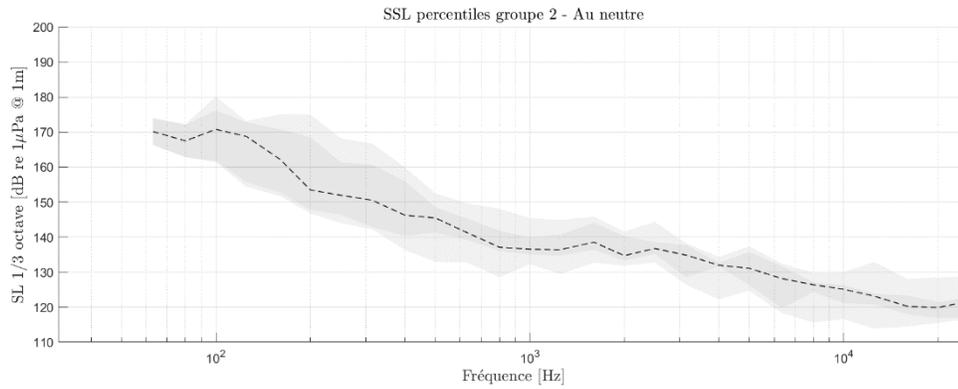


Figure 14. Niveaux *SSL* en tiers d'octave des bateaux du groupe 2, moteur au neutre.

Ligne pointillée: médiane.

Gris foncé : 25^{ème} à 75^{ème} percentile. Gris pale : 5^{ème} à 95^{ème} percentile.

Transit à 10 kn

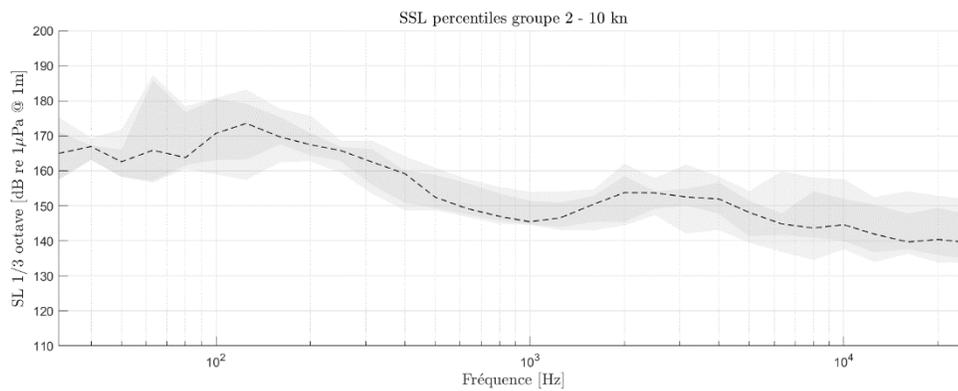


Figure 15. Niveaux *SSL* en tiers d'octave des bateaux du groupe 2, vitesse 10 kn.

Ligne pointillée: médiane.

Gris foncé : 25^{ème} à 75^{ème} percentile. Gris pale : 5^{ème} à 95^{ème} percentile

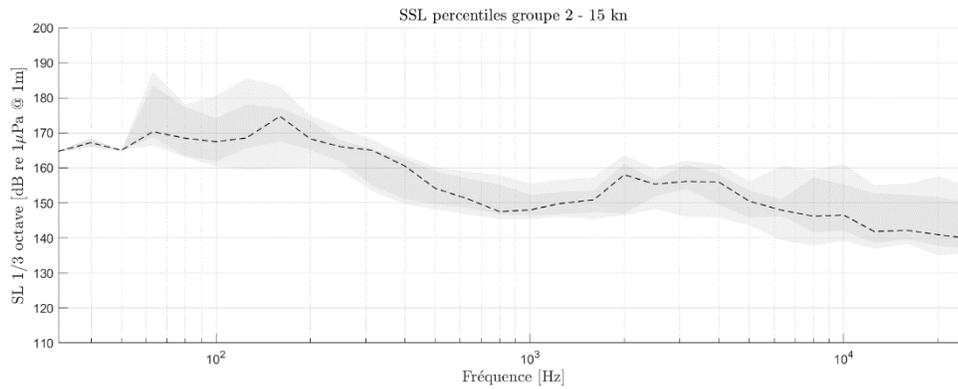
Transit à 15 kn

Figure 16. Niveaux *SSL*s en tiers d'octave des bateaux du groupe 2, vitesse 15 kn.
Ligne pointillée: médiane.
Gris foncé : 25^{ème} à 75^{ème} percentile. Gris pale : 5^{ème} à 95^{ème} percentile.

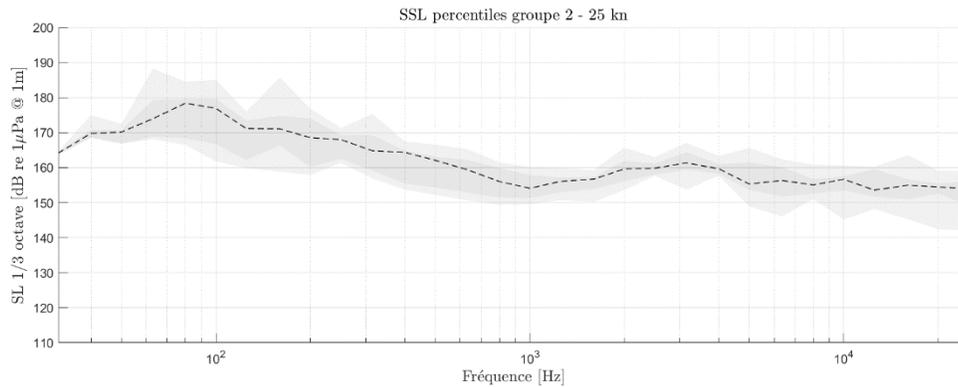
Transit à 25 kn

Figure 17. Niveaux *SSL*s en tiers d'octave des bateaux du groupe 2, vitesse 25 kn.
Ligne pointillée: médiane.
Gris foncé : 25^{ème} à 75^{ème} percentile. Gris pale : 5^{ème} à 95^{ème} percentile.

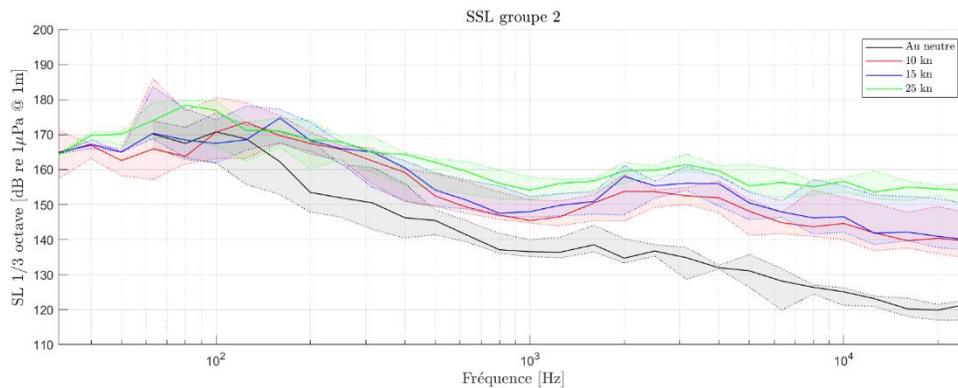


Figure 18. Niveaux *SSL*s médians en tiers d'octave des bateaux du groupe 2 en fonction des vitesses 0, 10, 15 et 25 kn.
Les enveloppes sont celles des interquartiles (25% à 75%).

Comme pour le groupe 1, les niveaux *SSLs* du groupe 2 en conditions de moteur au neutre montrent la même tendance décroissante en fonction de la fréquence entre 100 Hz et 25 kHz, avec une enveloppe de variabilité plus étendue (Figure 14, Figure 9, Tableau 4). Les *SSLs* à 10 kn et 15 kn sont comparables au groupe 1, sauf dans la bande entre 500 Hz et 2 kHz où ils sont de ~1 à 5 dB inférieurs (Figure 18, Figure 13, Tableau 5, Tableau 6). À la vitesse 25 kn, l'enveloppe des *SSLs* est centrée autour de la même médiane que le groupe 1 entre 100 Hz et 5 kHz, mais ce niveau *SSL* médian augmente ensuite de 1 à 5 dB jusqu'à 25 kHz (Figure 17, Figure 12, Tableau 7). Les conditions rencontrées lors des mesures de ce groupe ont rendu possible l'estimation des niveaux *SSLs* en basses fréquences jusqu'à 30 Hz. Cela a permis de mettre en évidence que les niveaux maximaux de bruit sont entre 50 Hz et 150 Hz (Figs. Figure 15 à Figure 18, Tableau 5 à Tableau 7).

3.1.3. Groupe 3, 4 bateaux de 14 à 22 m

Moteur au neutre

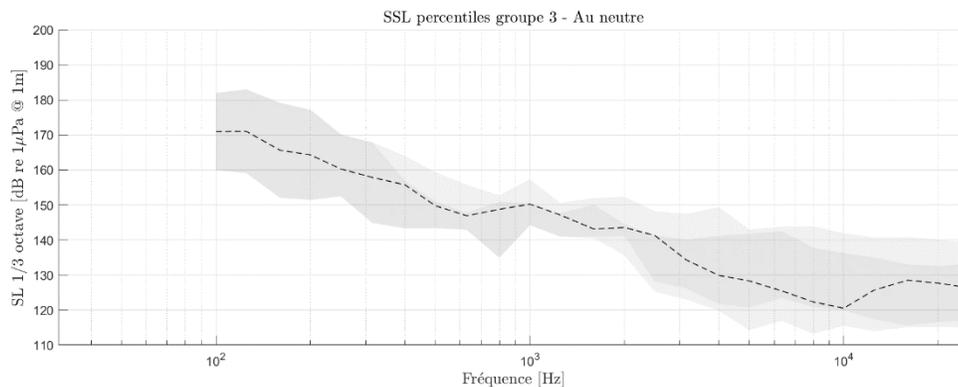


Figure 19. Niveaux *SSLs* en tiers d'octave des bateaux du groupe 3, moteur au neutre.
Ligne pointillée: médiane.
Gris foncé : 25^{ème} à 75^{ème} percentile. Gris pale : 5^{ème} à 95^{ème} percentile.

Transit à 10 kn*

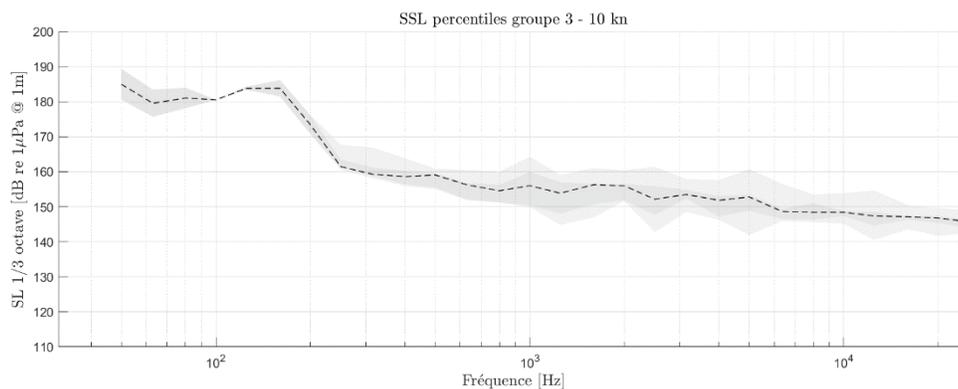


Figure 20. Niveaux *SSLs* en tiers d'octave des bateaux du groupe 3, vitesse 10 kn.
Ligne pointillée: médiane.

Gris foncé : 25^{ème} à 75^{ème} percentile. Gris pale : 5^{ème} à 95^{ème} percentile.

* Les niveaux élevés aux fréquences < 200 Hz correspondent à un seul bateau, qui détonne par rapport aux autres.

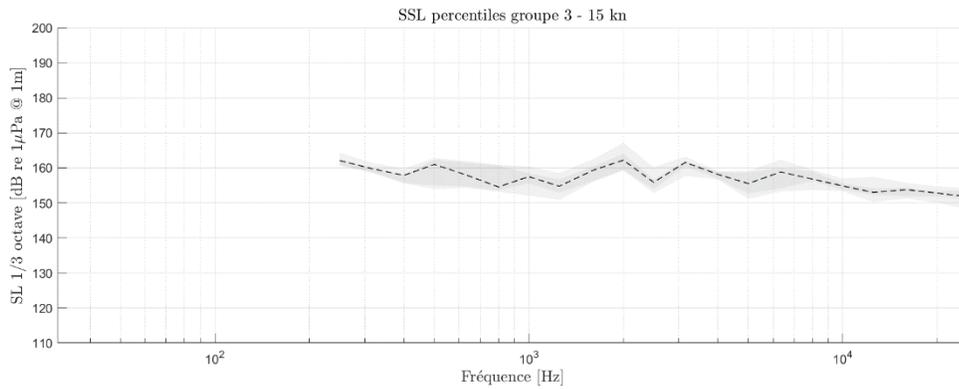
Transit à 15 kn

Figure 21. Niveaux *SSLs* en tiers d'octave des bateaux du groupe 3, vitesse 15 kn.
Ligne pointillée: médiane.
Gris foncé : 25^{ème} à 75^{ème} percentile. Gris pale : 5^{ème} à 95^{ème} percentile.

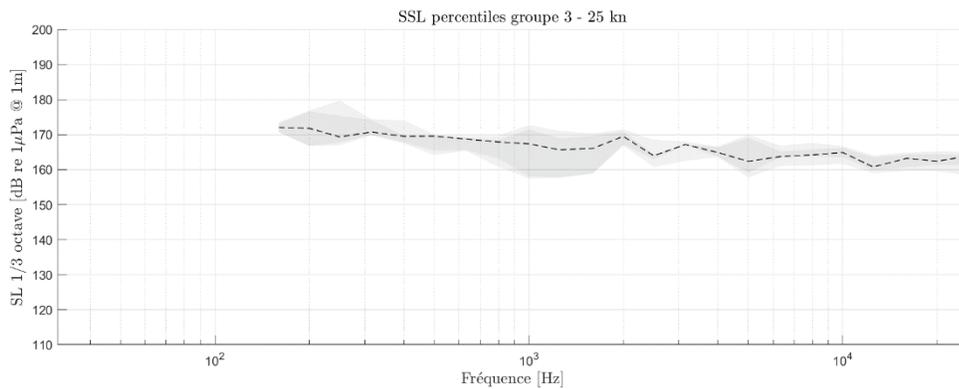
Transit à 25 kn

Figure 22. Niveaux *SSLs* en tiers d'octave des bateaux du groupe 3, vitesse 25 kn.
Ligne pointillée: médiane.
Gris foncé : 25^{ème} à 75^{ème} percentile. Gris pale : 5^{ème} à 95^{ème} percentile.

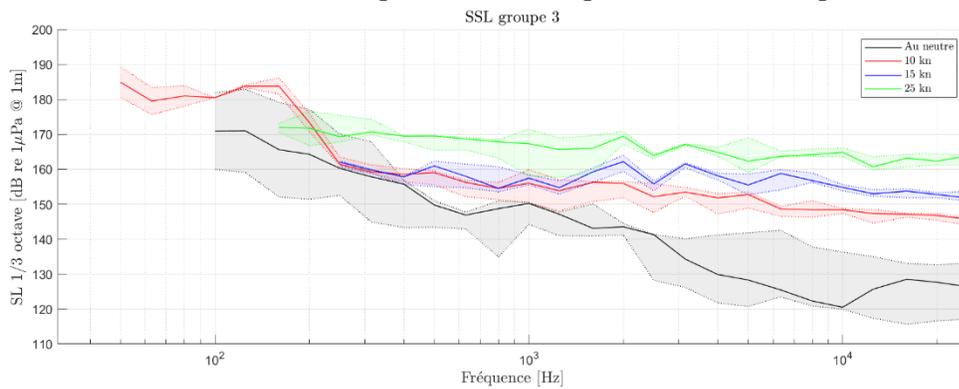


Figure 23. Niveaux *SSLs* médians en tiers d'octave des bateaux du groupe 3 en fonction des vitesses 0, 10, 15 et 25 kn.

Les enveloppes sont celles des interquartiles (25% à 75%).

* Les niveaux élevés aux fréquences < 200 Hz à 10 kn sont issus d'un seul bateau, qui détonne par rapport aux autres.

Les niveaux *SSLs* médians du groupe 3 en conditions de moteur au neutre sont de ~2 à 10 dB supérieurs à ceux des groupes 1 et 2 entre ~150 Hz et 2500 Hz, mais ils sont comparables aux fréquences plus élevées (Figure 19, Figure 14, Figure 9, Tableau 4). En transit, les niveaux *SSLs* diffèrent en général entre les 2 vitesses 10 et 15 kn, à l'exception de quelques bandes de fréquences, contrairement aux groupes 1 et 2 (Figure 23, Figure 18, Figure 13, Tableau 5, Tableau 6). L'effet de l'accroissement de vitesse y est plus évident. À une vitesse de 25 kn, les niveaux *SSLs* sont de 3 à 15 dB supérieurs à ceux des groupes 1 et 2 (Tableau 7, Figure 22, Figure 17, Figure 12).

3.1.4. Groupe 4, 3 bateaux de 24 à 34 m

Moteur au neutre

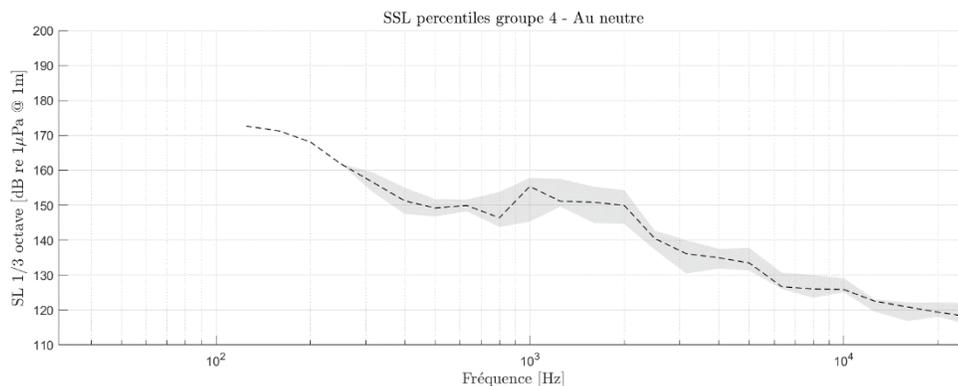


Figure 24. Niveaux *SSLs* en tiers d'octave des bateaux du groupe 4, moteur au neutre.

Ligne pointillée: médiane.

Gris foncé : 25^{ème} à 75^{ème} percentile. Gris pale : 5^{ème} à 95^{ème} percentile.

Transit à 10 kn

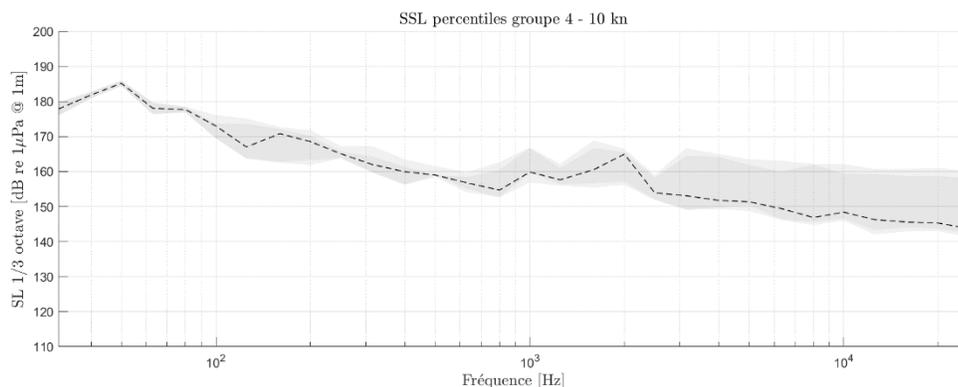


Figure 25. Niveaux *SSLs* en tiers d'octave des bateaux du groupe 4, vitesse 10 kn.

Ligne pointillée: médiane.

Gris foncé : 25^{ème} à 75^{ème} percentile. Gris pale : 5^{ème} à 95^{ème} percentile.

Transit à 15 kn

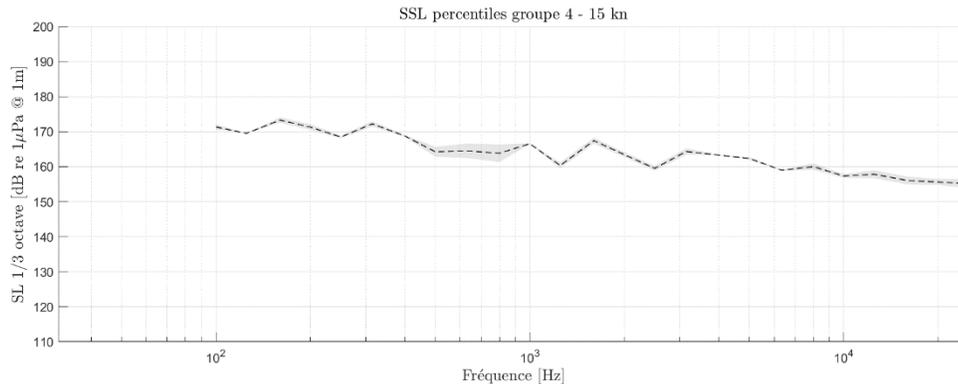


Figure 26. Niveaux *SSLs* en tiers d'octave d'un bateau du groupe 4, vitesse 15 kn.
Ligne pointillée: médiane.
Gris foncé : 25^{ème} à 75^{ème} percentile. Gris pale : 5^{ème} à 95^{ème} percentile.

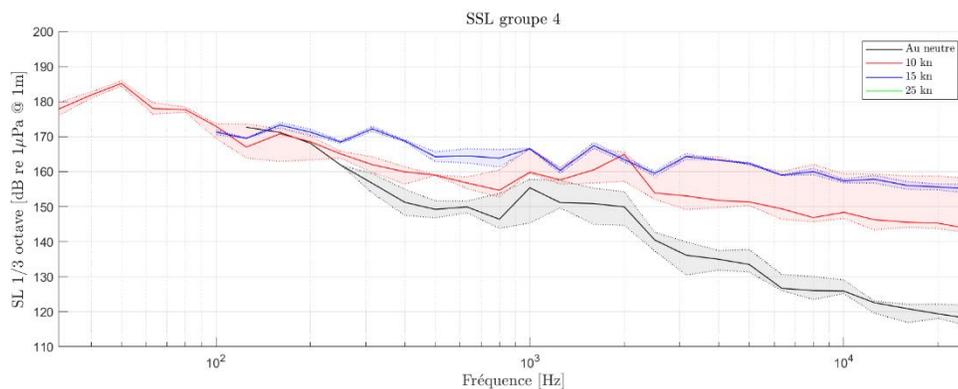


Figure 27. Niveaux *SSLs* médians en tiers d'octave des bateaux du groupe 4 en fonction des vitesses 0, 10, et 15 kn.
Les enveloppes sont celles des interquartiles (25% à 75%).

Les niveaux *SSLs* du groupe 4 en conditions de moteur au neutre, mais avec les génératrices toujours en marche, sont en général semblables à ceux du groupe 3, à l'exception de la bande de fréquences de 1 kHz à 2 kHz où ils excèdent d'environ 5 dB (Figure 24, Figure 19, Tableau 4). À 10 kn, on a le même constat par rapport au groupe 3, les niveaux *SSLs* sont comparables sauf dans la bande de 1 kHz à 2 kHz (Tableau 5, Figure 25, Figure 20). Les niveaux *SSLs* à 15 kn sont ~3 à 10 dB supérieurs à ceux du groupe 3, atteignant presque les niveaux *SSLs* à 25 kn du groupe 3 (Figure 26, Figure 21, Figure 22, Tableau 6, Tableau 7). Le *SSL* maximum à 15 kn s'est déplacé à des fréquences plus basses que ceux des plus petits bateaux (50 Hz vs [50 Hz à 150 Hz]) pour la même vitesse (Figure 27, Figure 18).

3.1.5. Groupe 5, 2 traversiers de 79 et 87 m

Transit à 10 kn

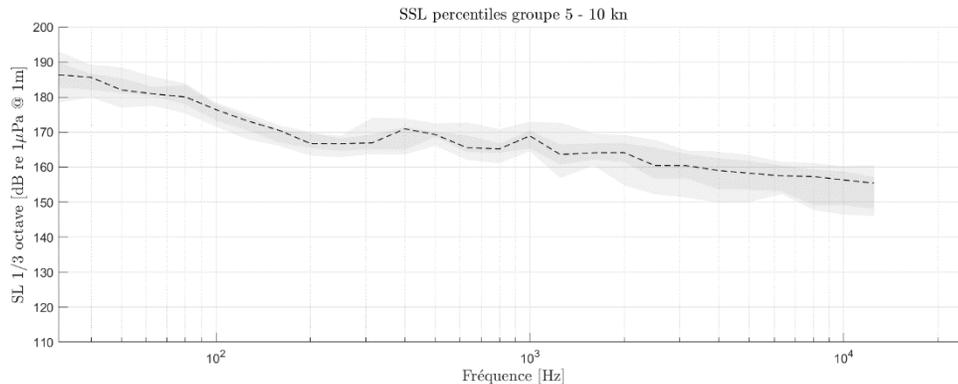


Figure 28. Niveaux *SSLs* en tiers d'octave des bateaux du groupe 5, vitesse 10 kn.
Ligne pointillée: médiane.
Gris foncé : 25^{ème} à 75^{ème} percentile. Gris pale : 5^{ème} à 95^{ème} percentile.

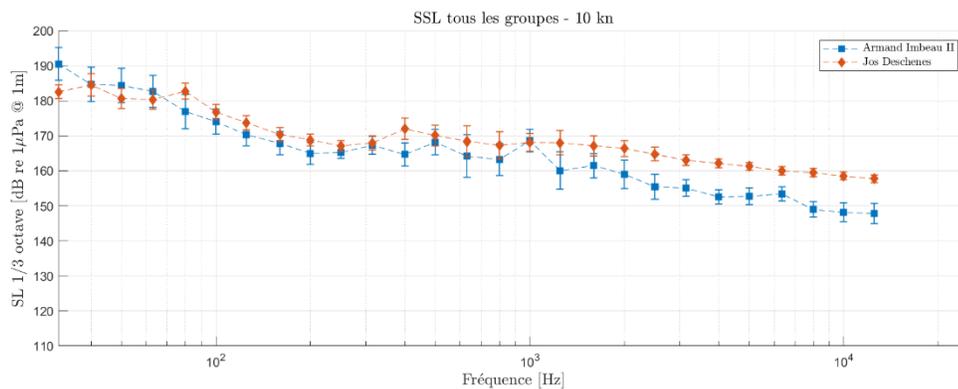


Figure 29. Niveaux *SSLs* en tiers d'octave comparés entre les 2 traversiers du groupe 5, vitesse 10 kn.

L'intervalle ($\pm \sigma$) entre les barres verticales est l'incertitude reliée à la méconnaissance de la distance exacte de la source par rapport aux hydrophones et la variabilité entre les différents passages à l'observatoire (cf. section 2.4.8. eq. 9)

Les niveaux *SSLs* médians des traversiers à 10 kn dépassent de ~ 3 à 10 dB ceux du groupe 4. Malgré son plus fort tonnage et sa plus grande taille (Tableau 3), le nouveau traversier, le Armand-Imbeau II, construit en 2018, a des *SSLs* de ~ 3 à 10 dB inférieurs à ceux du traversier Jos-Deschênes, construit en 1980 (Figure 29). La largeur angulaire du trajet des mesures disponibles autour du cpa (Figure 4) a été réduite à $\pm 10^\circ$ pour le Armand-Imbeau II au lieu de $\pm 30^\circ$ parce que l'enregistrement discontinu effectué en 2019 a interrompu l'enregistrement sur quelques trajets.

3.2. Niveaux SSLs médians comparés par groupe de bateaux pour chaque vitesse

Moteur au neutre

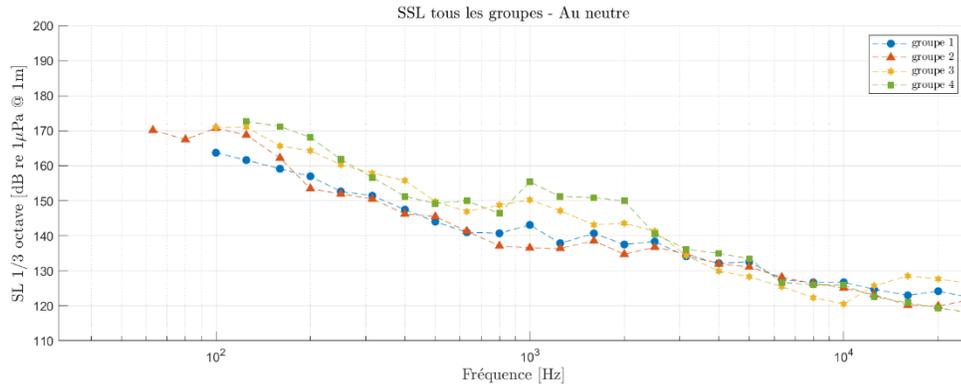


Figure 30. Niveaux SSLs médians en tiers d'octave, moteur au neutre, par groupe de bateaux.

Transit à 10 kn

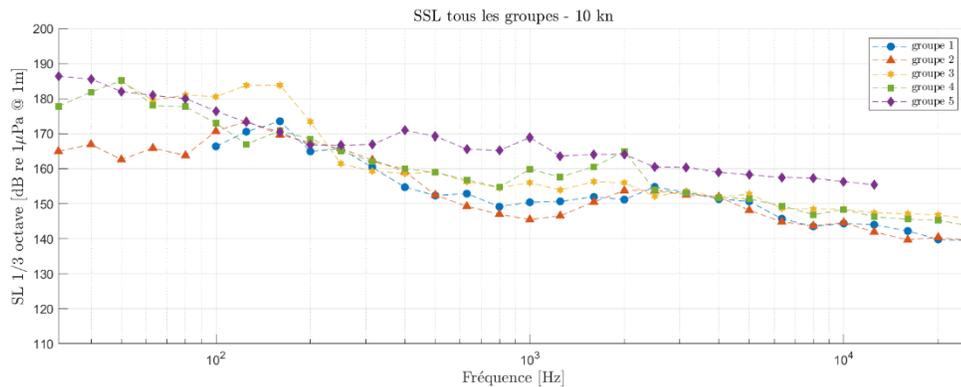


Figure 31. Niveaux SSLs médians en tiers d'octave à 10 kn, par groupe de bateaux.

* Les niveaux élevés aux fréquences < 200 Hz à 10 kn pour le groupe 3 sont issues d'un seul bateau, qui détonne par rapport aux autres.

Transit à 15 kn

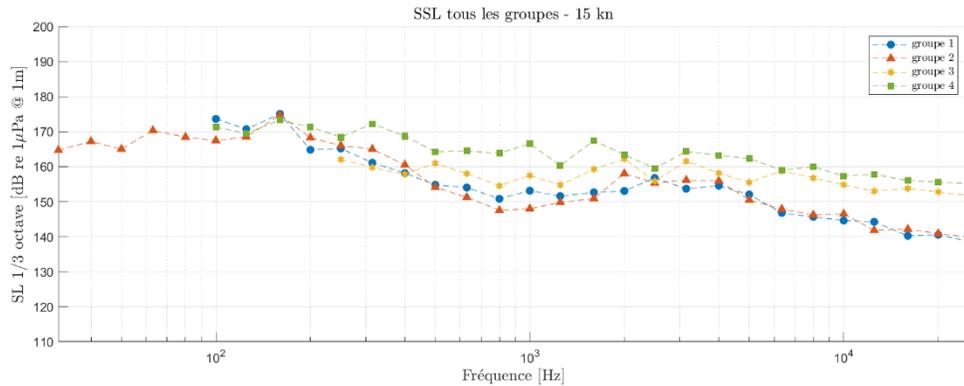


Figure 32. Niveaux *SSLs* médians en tiers d'octave à 15 kn, par groupe de bateaux.

Transit à 25 kn

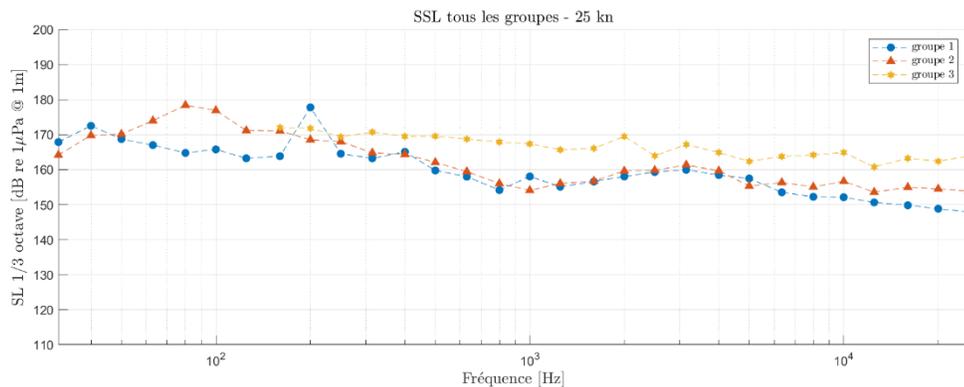


Figure 33. Niveaux *SSLs* médians en tiers d'octave à 25 kn, par groupe de bateaux.

Les différences des niveaux *SSLs* médians entre les groupes de bateaux 1 à 4 pour chaque vitesse sont illustrées aux Figure 30 à Figure 33. En général les niveaux *SSLs* tendent à augmenter avec la taille des bateaux. Toutefois les différences de niveau *SSL* par tiers d'octave sont parfois faibles, notamment entre les groupes de bateaux 1 et 2, et non significatifs considérant la variabilité intragroupe observée (Figure 9 à Figure 27) et les intervalles d'incertitudes associées à la mesure (cf. section 2.4.8). Sauf en de rares exceptions, ces niveaux *SSLs* médians par tiers d'octave sont inférieurs à ceux des traversiers à leur vitesse d'opération de 10 kn (Tableau 5).

3.3. Modélisation de l'effet de la vitesse sur les *SLs* par groupe de bateaux

Les effets de la vitesse sur les *SLs* des groupes de bateaux ont été examinés pour les niveaux large-bande des 2 bandes de fréquences tel que décrit à la section 2.4.7.

Tableau 8. Niveaux *SLs* large-bande [89 - 449 Hz] médians (dB re 1 μ Pa @ 1 m) par groupe de bateaux en fonction de la vitesse.

Vitesse (kn)	Bande 1, [89 - 449] Hz			
	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Groupe 4
0	167.4	173.4	175.3	177.7
10	176.7	177.4	n.d.	177.0
15	178.8	177.6	n.d.	179.5
25	178.8	179.7	179.7	n.d.

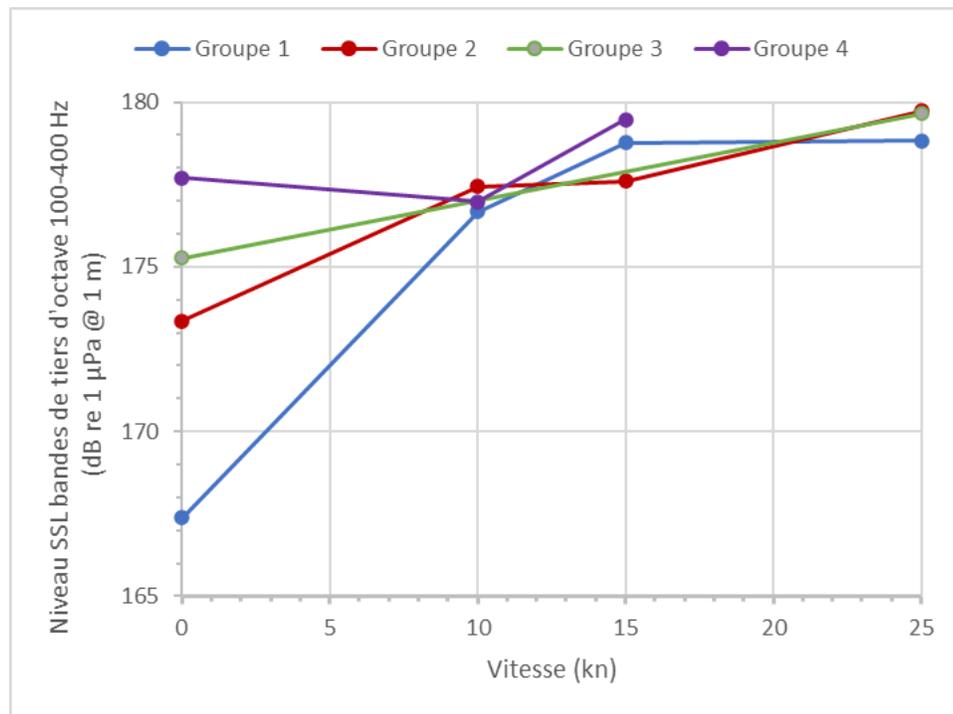


Figure 34. Niveaux *SLs* large-bande [89 - 449 Hz] médians par groupe de bateaux en fonction de la vitesse.

Tableau 9. Niveaux *SLs* large-bande [445-28062 Hz] médians (dB re 1 μ Pa @ 1 m) par groupe de bateaux en fonction de la vitesse.

Vitesse (kn)	Bande 2, [445 - 28062 Hz] Hz			
	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Groupe 4
0	150.4	149.3	156.4	159.8
10	162.7	161.8	166.1	169.3
15	164.4	164.5	170.3	175.1
25	169.0	170.3	178.6	nd

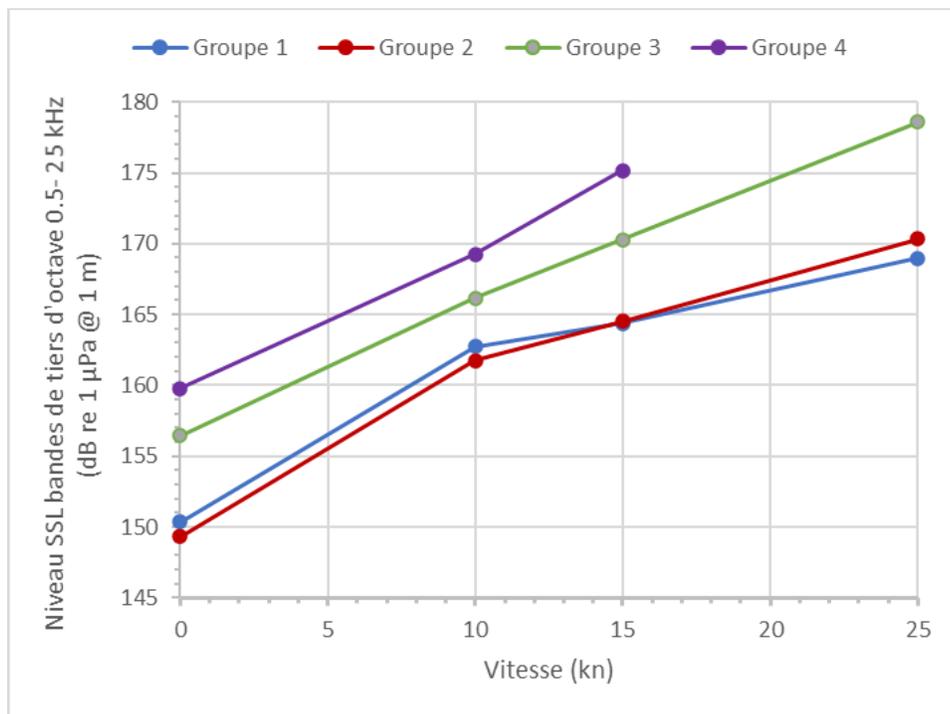


Figure 35. Niveaux *SLs* large-bande [445-28062 Hz] médians par groupe de bateaux en fonction de la vitesse.

Pour chaque groupe de bateau, on observe un effet général de la vitesse sur les niveaux *SLs* large-bande médians pour chacune des deux bandes considérées (Tableau 8, Figure 34, Tableau 9, Figure 35). Il est moins prononcé en basses fréquences (bande 1) qu'en hautes fréquences (bande 2).

En attente à l'observatoire, moteur au neutre, les niveaux *SLs* médians pour la bande 1 varient avec la taille du bateau (Tableau 8, Figure 34). Ils sont de ~ 9 -11dB inférieurs à ceux à 10 kn ou 25 kn pour le groupe 1, de ~ 4 -6 dB pour le groupe 2, de ~ 2 -4 dB pour le groupe 3 et supérieurs de 0.7 dB pour le groupe 4 à 10 kn mais inférieurs de ~ 2 dB à 15 kn.

Pour la bande 2, la différence est plus importante et semblable entre les 4 groupes (Tableau 9, Figure 35). Elle est de 10 à 12 dB à 10 kn et de 19 à 22 dB à 25 kn.

Les changements de niveau *SL* large bande en passant de 10 à 15 kn pour la bande 1 sont de 0.4, 0, et 0.5 dB/kn, respectivement pour les groupes 1, 2 et 4. Pour ce même changement de vitesse pour la bande 2, les pentes d'accroissement des niveaux *SLs* sont de 0.3, 0.6, 0.8 et 1.2, respectivement pour les groupes 1, 2, 3, et 4.

En passant de la vitesse 15 kn à 25 kn, l'accroissement des niveaux *SLs* sont faibles dans la bande 1, soit de 0 dB/kn pour le groupe 1 et 0.2 dB/kn pour le groupe 2. Pour la bande 2, ils sont de 0.5, 0.6, et 0.8 dB/kn, pour les groupes 1, 2, et 3 respectivement.

4. DISCUSSION

Le travail résumé dans ce document avait pour but d'estimer les niveaux de bruit émis par les bateaux de la flottille d'écotourisme d'observation des baleines et d'autres bateaux et navires opérant régulièrement dans la région du parc marin du Saguenay–Saint-Laurent. La réalisation de cet objectif en conformité avec les protocoles internationaux établis pour l'obtention de mesures rigoureuses des niveaux *SLs* des bateaux représente un défi considérable. Il exige le déploiement d'un observatoire acoustique conséquent, avec des mesures à 3 profondeurs différentes, dans un bassin suffisamment profond et de grande dimension pour permettre des conditions de propagation acoustique favorables. D'autres contraintes de logistique, comme la proximité des ports d'attache des bateaux, la présence de trafic dans la région, ainsi que l'exposition du site aux conditions météo et aux courants marins, s'ajoutent dans les considérations à prendre en compte dans le choix d'un site de mesure.

Le site retenu pour les mesures, atteignable en moins d'une heure de navigation, était le meilleur compromis pour répondre aux exigences ci-dessus, et permettait de cibler des fenêtres météo et de faible trafic maritime favorables. De plus, il était situé au cœur de la zone d'activité d'observation des baleines dans le parc marin.

À l'examen des données récoltées, ce site s'est révélé non idéal pour ce type de mesures avec un dispositif ancré, composé d'instruments étalés sur une colonne d'eau de 160 m, en raison des forts courants de marée et autres processus océanographiques (p. ex. upwelling tidal, ondes internes) qu'on retrouve dans cette région de la tête du Chenal Laurentien (cf. Saucier and Chassé 2000 et réf. citées). Combinés avec la trainée (« drag ») non négligeable de l'observatoire acoustique, ils faisaient incliner le dispositif et généraient des cognements, et vibrations qui engendraient du pseudobruit non monotone, qu'il a fallu traiter manuellement, cas par cas. Le temps d'analyse a alors été multiplié par un large facteur par rapport aux mesures du même type réalisées ailleurs par l'équipe avec un dispositif semblable (Simard et al. 2016).

Malgré ces difficultés, les périodes de mesures bruitées ont pu être éliminées et il a été possible d'extraire les niveaux *SLs* et *SSLs* des bateaux et navires testés, sur une large bande de fréquences (100 Hz à 25 kHz) et, parfois pour les fréquences < 100 Hz, où le bruit de la navigation commerciale est généralement maximal (cf. Simard et al. 2016)

4.1. Comparaisons avec les *SSLs* estimés publiés dans la littérature

Les *SSLs* médians estimés pour les groupes de bateaux 1 à 4 à une vitesse de 15 kn ont été comparés aux *SSLs* estimés de la flotte marchande, qui transite dans la Voie Maritime du Saint-Laurent à une vitesse comparable (Simard et al. 2016) (Figure 36). Ces niveaux *SSLs* médians se situent dans la moitié inférieure de l'enveloppe des *SSLs* de la navigation marchande, ceux des plus grands bateaux (groupe 4) se rapprochant du niveau médian aux fréquences supérieures à 100 Hz. Cette comparaison ne prend toutefois pas en compte la variabilité intra-groupe, qui est de ~10 à 20 dB. Malgré cette variabilité, on peut conclure que les niveaux *SSLs* de la flottille des bateaux estimés sont, en général, comparables à ceux de la fraction (~ 50%) des navires les moins bruyants de la flotte marchande, pour les fréquences supérieures à 200 Hz. Aux fréquences inférieures à 200 Hz, peu d'estimés sont disponibles pour la comparaison, mais comme cette bande de fréquence correspond au niveau maximum du bruit de la navigation marchande (cf. Simard et al. 2016), il est probable que ce soit ces navires qui dominant le bruit dans cette bande et que la contribution de la flottille soit marginale dans la région d'étude.

Les *SSLs* médians estimés pour les groupes de bateaux 1 à 3 à une vitesse de 25 kn ont été comparés aux estimés produits en 2009 par (Gervaise et al. 2012, Fig. 3) pour des bateaux de taille comparable à des vitesses de 20-25 kn. Les estimés de *SSLs* de cette étude ont été faits en dB re $1 \mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ @ 1 m, et été ramenés ici en niveaux *SSLs* en tiers d'octave pour quelques fréquences centrales (100 Hz, 1 kHz et 10 kHz) (Figure 37). Ces estimés ont été réalisés avant la publication du protocole standard de mesure des niveaux *SLs* des navires (ANSI 2009), avec un observatoire comprenant des hydrophones déployés au fond, mais étalés entre 40 et 140 m sur la pente du fjord du Saguenay à Pointe-Noire. Ce dispositif permettait donc la mesure des *SLs* des bateaux à plusieurs angles sur la verticale, comme recommandé par le protocole standard (Figure 2). Les *SSLs* médians de ces mesures se situent dans l'intervalle de ceux présentés ici pour les fréquences 1 kHz et 10 kHz. À 100 Hz, le niveau *SSL* médian est de quelques dB inférieur à ceux mesurés dans la présente étude. Contrairement à Simard et al. (2016) et la présente étude, les estimations de (Gervaise et al. 2012) n'utilisaient pas un modèle de pertes par propagation WI adapté aux conditions du milieu, mais un modèle de pertes sphériques. Cette différence de modèle de TL peut avoir contribué à l'écart observé aux basses fréquences puisque la correction du miroir de Lloyds par le modèle de l'intégration du nombre d'onde amplifie les basses fréquences par comparaison avec la correction par pertes sphériques (ISO 2019). La variabilité intragroupe des *SSLs* observée par Gervaise et al. (2012) était comparable (~ 20 dB) à celle de la présente étude.

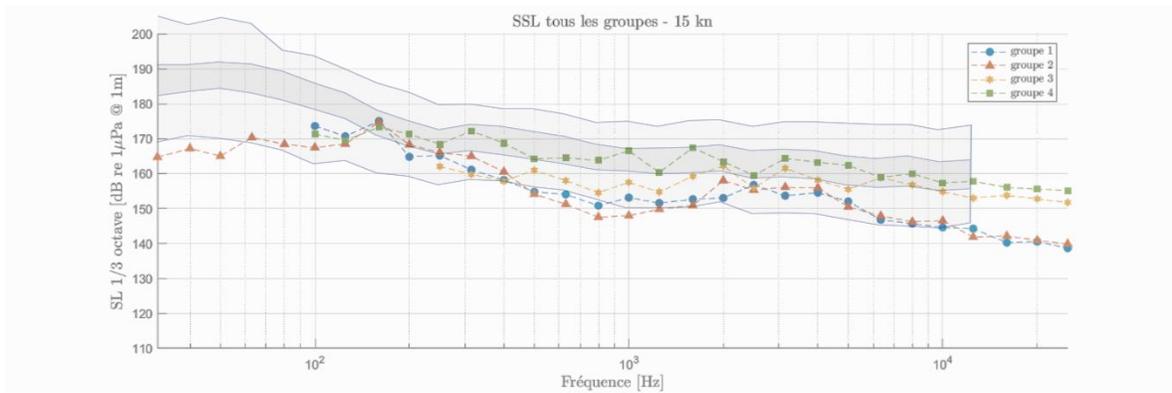


Figure 36. Comparaisons des niveaux *SSLs* médians en tiers d'octave à 15 kn par groupe de bateaux à l'enveloppe des *SSLs* de la navigation marchande dans la Voie Maritime du Saint-Laurent (Simard et al. 2016).

Enveloppe gris foncé : interquartiles (percentiles 25% à 50%) des *SSLs* de la flotte marchande à 13.9 ± 2.9 kn.

Enveloppe gris pâle : enveloppe à 98% (percentiles 1% à 99%) des *SSLs* de la flotte marchande à 13.9 ± 2.9 kn.

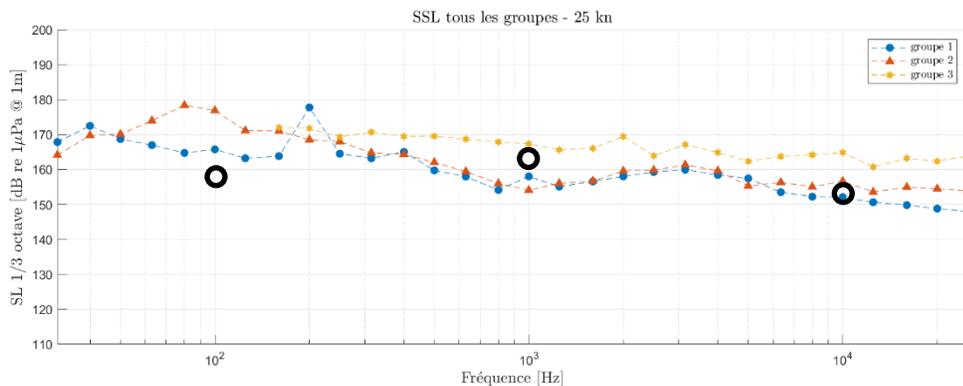


Figure 37. Comparaisons des niveaux *SSLs* médians en tiers d'octave à 25 kn par groupe de bateaux à ceux effectués en 2009 à Pointe-Noire dans le Saguenay avec un observatoire côtier (cercles à 100 Hz, 1 kHz et 10 kHz).

L'enveloppe des niveaux *SSLs* médians à 25 kn pour les 3 groupes de bateaux rapides est généralement contenue dans l'enveloppe définie par les normes proposées par trois bureaux de certification internationaux pour les navires commerciaux (Figure 38). À l'exception des fréquences < 200 Hz, les niveaux *SSLs* médians sont supérieurs à norme la plus restrictive (BV 2018, URN advanced vessel, corrigée pour les faibles profondeurs [$c=1470$ m/s, $d=1$ m, $Tetha=25$ deg.]). Les *SSLs* médians les plus forts, ceux du groupe 3, suivent les normes de la Lloyds (Lloyds 2018) et du American Bureau of Shipping (ABS 2021, UWN+T), sauf pour le groupe 3 où les fréquences > 1 kHz excèdent ces normes.

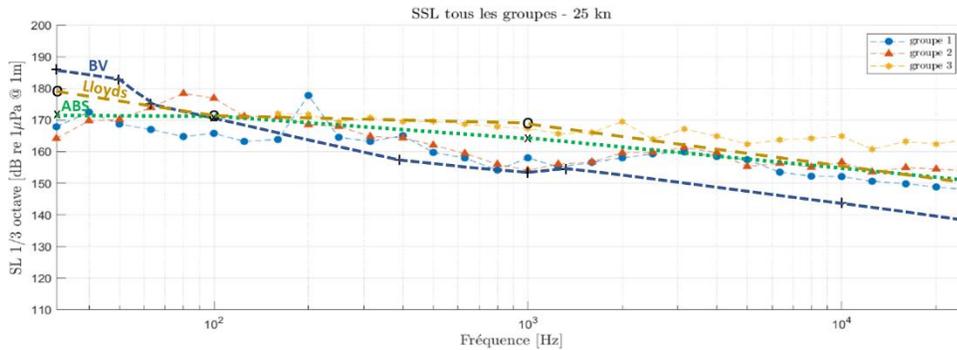


Figure 38. Comparaisons des niveaux *SSLs* médians en tiers d'octave à 25 kn par groupe de bateaux aux normes pour les navires commerciaux en transit de Bureau Véritas (BV), de la Lloyds et du American Bureau of Shipping (ABS).

Le niveau de bruit des traversiers à 10 kn se situe aussi généralement dans la moitié inférieure de l'enveloppe des *SSLs* de la flotte marchande, qui transite à une vitesse qui est plus élevée d'environ 4 à 6 kn (Figure 39). Ceci est particulièrement vrai pour le nouveau traversier, dont les niveaux *SSLs* sont dans cette moitié de l'enveloppe à toutes les fréquences, excepté la bande de tiers d'octave centrée à 1 kHz. Les niveaux *SSLs* du Jos-Deschênes entre 400 Hz et 2.5 kHz à une vitesse de 10 kn excèdent le niveau médian de la flotte marchande à une vitesse d'environ 15 kn.

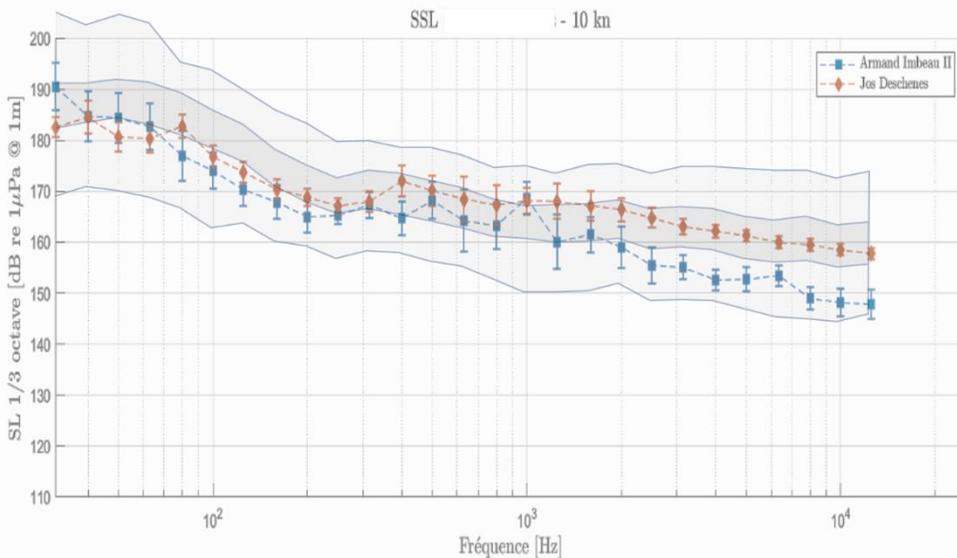


Figure 39. Comparaisons des niveaux *SSLs* médians en tiers d'octave à 10 kn des traversiers Jos-Deschênes et Armand-Imbeau II à l'enveloppe des *SSLs* de la navigation marchande dans la Voie Maritime du Saint-Laurent (Simard et al. 2016).
 Enveloppe gris foncé : interquartiles (percentiles 25% à 50%) des *SSLs* de la flotte marchande à 13.9 ± 2.9 kn.
 Enveloppe gris pâle : enveloppe à 98% (percentiles 1% à 99%) des *SSLs* de la flotte marchande à 13.9 ± 2.9 kn.

Les niveaux *SSL* médians des traversiers à 10 kn aux fréquences > 500 Hz avoisinent les normes proposées par les bureaux de certification internationaux pour les navires commerciaux (Figure 40). Ceux du Armand-Imbeau II sont de ~2 à 5 dB inférieurs à ces normes aux fréquences > 2000 Hz. Aux basses fréquences < 100 Hz, les niveaux des normes de la Lloyds (Lloyds 2018) et du American Bureau of Shipping (ABS 2021, UWN+T), qui n'incluent pas de correction pour les eaux peu profondes, sont inférieures aux niveaux observés. À ces basses fréquences, la correction incluse dans la norme URN controlled vessel de Bureau Véritas (BV 2018, URN advanced vessel, corrigée pour les faibles profondeurs [$c=1470$ m/s, $d=1$ m, $\Theta=25$ deg.]) suit mieux l'augmentation des niveaux *SSL* médians observés. Les deux traversiers présentent alors des niveaux inférieurs à cette norme aux fréquences inférieures à 500 Hz.

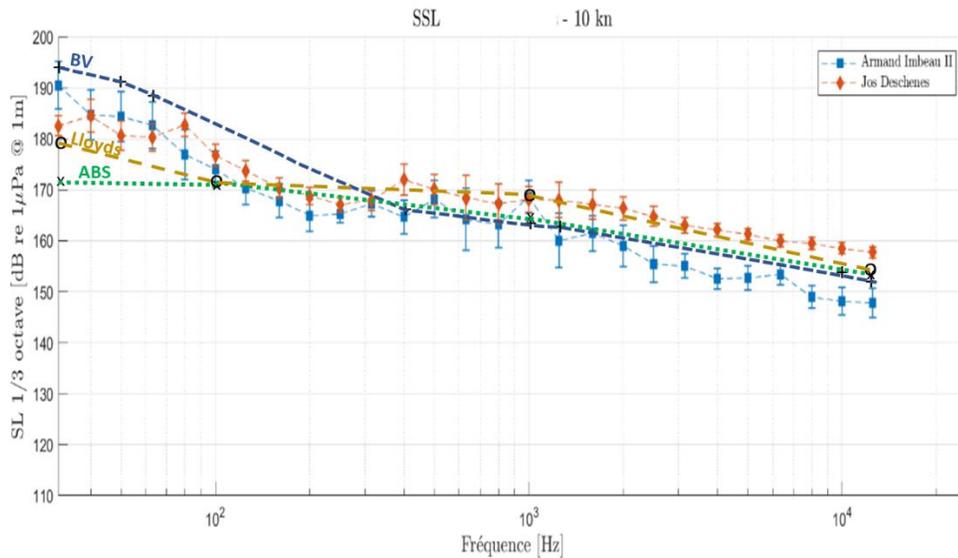


Figure 40. Comparaisons des niveaux *SSL* médians en tiers d'octave à 10 kn des traversiers Jos-Deschênes et Armand-Imbeau II aux normes pour les navires commerciaux en transit de Bureau Véritas (BV), de la Lloyds et du American Bureau of Shipping (ABS).

4.2. Effets de la vitesse sur les *SLs*

Contrairement aux études précédentes, des mesures ont été effectuées pour estimer les niveaux de bruit alors que les bateaux sont stationnaires lors d'observations des baleines ou d'autres opérations. Les résultats montrent que la différence entre le niveau de bruit des navires mobiles avec les navires en station est notable et s'accroît avec la fréquence. De faibles, mais détectables, aux basses fréquences pour les bateaux des groupes 1 à 3, les niveaux *SLs* large-bande médians à 0 kn pour la bande de 445 Hz à 28 kHz sont de 10 à 12 dB inférieurs à ceux observés à 10 kn et 19 à 22 dB à 25 kn (Tableau 9). En d'autres termes, dans cette bande de fréquences, en observation de baleines, au neutre, il faudrait une flottille composée de 10 à 15 bateaux (i.e. $10^{10/10}$ à $10^{12/10}$) pour produire un niveau de bruit équivalent à celui observé pour un bateau transitant à une vitesse de 10 kn dans cette bande. Pour une vitesse de 25 kn, il faudrait 79 à 158 bateaux (i.e. $10^{19/10}$ à $10^{22/10}$).

Le taux d'accroissement des niveaux *SLs* médians en fonction de la vitesse entre 10 à 25 kn est de l'ordre de 0.5 à 1 dB/kn, incluant des valeurs voisines de zéro, notamment pour les bateaux des groupes 1 et 2 entre 15 et 25 kn. Cette tendance est comparable à celle estimée par Gervaise et al. (2012, 0.5 dB/kn) pour une flottille comparable. Des taux similaires ont été mesurés pour la flotte marchande par Simard et al. (2016). Dans tous les cas, on note une grande variabilité entre les bateaux. Comme dans l'étude de Gervaise et al. (2012), la pente d'accroissement des niveaux est plus élevée aux hautes fréquences de la bande 2 qu'aux fréquences inférieures de la bande 1. Elle était plus prononcée et systématique pour les bateaux des groupes 3 et 4. Ceci est cohérent avec des résultats (données non publiées) de modélisation de la propagation du bruit pour des sources proches de la surface, comme les hélices des petits bateaux, qui montrent que le bruit est fortement atténué en basses fréquences par l'interaction avec la surface et son rayonnement dans l'environnement en est fortement atténué. En conclusion, l'effet de réduction de vitesse sur le niveau de bruit rayonné serait plus notable en hautes fréquences qu'en basses fréquences.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été financé par la Direction des Sciences de Pêches et Océans Canada à l'Institut Maurice-Lamontagne. Il a été réalisé avec la collaboration du parc marin du Saguenay–Saint-Laurent de Parcs Canada. Les crédits pour les photos sont fournis à l'annexe 1. Nous remercions Sandrine Vigneron pour l'aide à la prise des données, Kevin Duquette et Xavier Chartrand pour leur révision et leurs commentaires sur la version antérieure du manuscrit ainsi que Claude Brassard pour son travail éditorial.

REFERENCES

- ABS. 2021. Guide for the classification notation underwater noise and external airborne noise, may 2021. ABS, Texas, USA: 46 p. Available from <https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/other/295-guide-classification-notation-underwater-noise-and-external-airborne-noise-2021/wn-airn-guide-may21.pdf>.
- ANSI. 2009. Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships – Part 1: General Requirements. *In* Accredited Standards Committee S12, Noise. Acoust. Soc. Am. Standards Secretariat, N.Y. p. 21 p.
- ANSI/ASA. 2014. American National Standard Electroacoustics – Octave-band and fractional-octave-band filters – Part 1: Specifications (a nationally adopted international standard) Acoustical Society of America.
- BV. 2018. Underwater radiated noise: Rule note NR 614 DT R02E. BV, BV, Paris: 18 p. Available from https://erules.veristar.com/dy/data/bv/pdf/614-NR_2018-07.pdf.
- Gervaise, C., Simard, Y., Roy, N., Kinda, B., and Menard, N. 2012. Shipping noise in whale habitat: characteristics, sources, budget, and impact on belugas in Saguenay - St. Lawrence Marine Park hub. *J. Acoust.Soc. Am.* **132**: 76-89. doi:<https://doi.org/10.1121/1.4728190>.

- Haddle, G.P., and Skudrzyk, E.J. 1969. The physics of flow noise. *J. Acoust. Soc. Am.* **46**(1B): 130-157. doi:10.1121/1.1911663.
- ISO. 2016. Underwater acoustics — Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships — Part 1: Requirements for precision measurements in deep water used for comparison purposes. International standard, Switzerland [accessed 2016-03-15].
- ISO. 2019. Underwater acoustics — Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships —Part 2: Determination of source levels from deep water measurements. International standard ISO 17208-2:2019, Switzerland [accessed 24-Jul-2019].
- Lloyds. 2018. Additional design and construction procedure for the determination of a vessel's underwater radiated noise. ShipRight, Design and Construction, Additional Design Procedures, Lloyds, London: 7 pp. Available from <https://www.cdinfo.lr.org/information/documents/ShipRight/Design%20and%20Construction/Additional%20Design%20Procedures/Shipright%20ADP%20for%20underwater%20radiated%20noise.pdf>.
- Saucier, F.J., and Chassé, J. 2000. Tidal circulation and buoyancy effects in the St. Lawrence Estuary. *Atmos. Ocean.* **38**(4): 505-556. Available from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0034560099&partnerID=40> [accessed].
- Simard, Y., Roy, N., Gervaise, C., and Giard, S. 2016. Analysis and modeling of 255 source levels of merchant ships from an acoustic observatory along St. Lawrence Seaway. *J. Acoust. Soc. Am.* **140**(3): 2002-2018. doi:<http://dx.doi.org/10.1121/1.4962557>.
- Skudrzyk, E.J. 1988. The basics of flow noise. *J. Acoust. Soc. Am.* **84**(S1): S116-S116. doi:10.1121/1.2025699.

ANNEXE 1: PHOTOS DES BATEAUX**Groupe 1**

Crédits photo : Parcs Canada/L. Lévesque (3, 4), Parcs Canada/L. Patte (1, 2, 6, 7, 9, 10, 11, 12), Parcs Canada/M. Conversano (5, 8), Sépaq (13).



(1) Harfang des mers III



(2) Gremlin



(3) L'Estran



(4) Bleuвет



(5) CCG 573



(6) Harfang des mers



(7) Aventure 2



(8) Aventure 3



(9) Aventure 6



(10) Aventure 7



(11) Aventure 8



(12) Harfang des mers II



(13) Falco

Groupe 2

Crédits photo : Parcs Canada/L. Lévesque (16), Parcs Canada/L. Patte (14, 15, 18), Parcs Canada/M. Conversano (19), Parcs Canada/F. Ledoux (17).



(14) P-28B



(15) AML Saguenay II



(16) Frank Slim



(17) L'Alliance



(18) P41



(19) Aventure 9

Groupe 3

Crédits photo : Parcs Canada/L. Lévesque (21), Parcs Canada/M. Conversano (20, 22), <https://hikemetal.com/projects/h185-taukamaim/> (23).



(20) Cap de Rabast



(21) AML Marsouin



(22) Grandes Eaux



(23) Taukamaim

Groupe 4

Crédits photo : Parcs Canada/L. Lévesque (25, 26), Parcs Canada/L. Patte (24).



(24) AML Zéphyr



(25) Grand Fleuve



(26) AML Levant

Groupe 5

Crédits photo : Société des Traversiers du Québec (<https://www.traversiers.com/fr/a-propos-de-la-societe/nos-navires/>).



(27) Jos-Deschênes



(28) Armand-Imbeau II