

**Modélisation du trafic maritime et des déplacements des baleines
dans l'estuaire du Saint-Laurent et le Saguenay pour informer le
processus de réduction des impacts cumulatifs de la navigation
sur les bélugas et les grands rorquals dans le contexte du
déploiement de la Stratégie maritime du Québec**

Rapport d'activités – An # 1 (2018-2019)
Programme de recherche 2018-2023

Pr. Clément Chion, PhD

Département des Sciences naturelles
Université du Québec en Outaouais (UQO)

Collaborateurs :

Tyler Bonnell, PhD, University of Lethbridge

Dominic Lagrois, PhD, UQO

Adrien Guetté, PhD, UQO

Robert Michaud, M. Sc, GREMM

Pr. Angélique Dupuch, PhD, UQO

Pr. Jérôme Dupras, PhD, UQO

Rapport présenté à :

Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec

23 décembre 2019

Ce document sera cité comme suit :

Chion, C., Bonnell, T., Lagrois, D., Guetté, A., Michaud, R., Dupuch, A., Dupras, J. (2019). Modélisation du trafic maritime et des déplacements des baleines dans l'estuaire du Saint-Laurent et le Saguenay pour informer le processus de réduction des impacts cumulatifs de la navigation sur les bélugas et les grands rorquals dans le contexte du déploiement de la Stratégie maritime du Québec. Rapport de l'Université du Québec en Outaouais pour le Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec. 128 pages.

Sommaire exécutif

Contexte du programme de recherche (2018-2023) et premiers constats à l'an #1

L'estuaire du Saint-Laurent et la rivière Saguenay abritent l'habitat estival de la population du béluga du Saint-Laurent (BESL), une espèce désignée *menacée* au Québec et *en voie de disparition* au Canada, statuts les plus alarmants avant la disparition d'une espèce. Plusieurs autres espèces de baleines aux statuts précaires comme le rorqual bleu et le rorqual commun fréquentent cette région principalement entre mai et octobre. Les activités de navigation sont localement intenses et variées dans cette région. Elles incluent le transport marchand, les traversiers, les excursions commerciales ou encore la plaisance. Le bruit sous-marin (BSM) de la navigation est identifié comme une des trois principales menaces au rétablissement du BESL et des grands rorquals.

misés

La population du BESL poursuit son déclin, indiquant que les effets cumulatifs des principales menaces à son rétablissement sont au-delà des limites soutenables et que de nouvelles mesures doivent être mise en œuvre pour réduire ces menaces. Dans une perspective d'accroissement du transport maritime, la Stratégie maritime du Québec met à l'avant-plan la nécessité d'harmoniser les activités maritimes avec la santé des écosystèmes. Dans cette optique, et dans le cadre des obligations légales de rétablissement des espèces en péril, le présent programme de recherche a été financé par le Gouvernement du Québec dans le but d'informer un processus de réduction des impacts cumulatifs de la navigation sur la population du BESL et les grands rorquals dans l'estuaire du Saint-Laurent et le Saguenay.

L'approche d'accompagnement scientifique proposée dans ce programme de recherche de 5 ans repose sur la facilitation des échanges entre gestionnaires, acteurs du milieu maritime et scientifiques dans la recherche de solutions concertées. Plusieurs outils d'aide à la concertation et à la décision intégrant les meilleures connaissances et données scientifiques sur les impacts cumulatifs de la navigation sur les baleines y sont développés. Tout d'abord, afin d'évaluer l'exposition cumulative des baleines au bruit sous-marin de la navigation, nous développons un simulateur spatiotemporel des interactions entre les bateaux et les baleines dans l'estuaire du Saint-Laurent et le Saguenay. Ce simulateur permet d'estimer le bruit reçu par chaque baleine en provenance des bateaux situés dans son environnement, pour différents scénarios de gestion du trafic maritime co-construits en concertation. Parallèlement, une étude socio-économique est conduite afin d'évaluer les coûts et les bénéfices de différentes mesures (technologiques ou opérationnelles) visant à réduire le BSM de la navigation dans l'habitat du BESL.

À l'an #1 du programme de recherche, les travaux de simulation ont visé à évaluer l'exposition des BESL au bruit des navires marchands dans l'hypothèse du déploiement de quatre projets de développement industrialo-portuaire sur les rives du Saguenay. Les développements de la plateforme de simulation ont été conduits selon la planification prévue et ont permis d'atteindre un premier niveau de réalisme en ce qui a trait aux mouvements individuels des BESL en 3D et à la prise en compte de comportements tel que la fidélité au site. En parallèle, une revue et méta-analyse a permis de construire un simulateur réaliste du niveau de bruit sous-marin rayonné par les navires marchands. Plusieurs améliorations des différents modules de la plateforme de simulation ont été identifiées. Les développements de l'an #1 ont permis de confirmer la validité de cette approche et de produire des premières simulations pour orienter la suite de nos travaux.

L'importance du Saguenay, de par son utilisation par le BESL incluant de nombreux veaux et jeunes, est bien documentée. Les nouvelles analyses conduites sur les données de photo-identification des BESL disponibles à ce jour ont révélé que le pourcentage des individus connus

de la population qui fréquentent le Saguenay, sans égard à la fréquence de visite, s'élève à environ 50% des adultes (tous sexes confondus) et environ 67% des femelles adultes. Bien que les fonctions écologiques du Saguenay ne soient pas encore connues précisément, ces premiers résultats renforcent le constat de l'importance du Saguenay pour le BESL en y apportant la dimension de son utilisation à l'échelle de l'individu.

Une première série de simulations a été effectuée afin d'évaluer l'impact qu'aurait l'ajout de nouveaux transits de navires marchands sur l'exposition des BESL au BSM. Les transits hypothétiques de navires marchands se rapportent à quatre projets de développement industriel-portuaires sur les rives du Saguenay, actuellement à l'étude. Sur la base des données transmises par les promoteurs de ces quatre projets, il a été déterminé qu'un maximum d'environ 820 transits de navires marchands pourraient être ajoutés chaque année dans l'habitat estival du BESL, précisément dans le Saguenay et l'estuaire maritime. L'analyse des résultats d'une première série de simulations a conduit à deux principaux constats :

- 1- La prise en compte de la caractéristique sociale de fidélité au site du BESL conduit à une estimation de l'exposition instantanée et cumulative au bruit des navires marchands significativement différente de celle d'un scénario dans lequel cette caractéristique sociale est ignorée. Ce résultat confirme l'importance d'intégrer la dynamique sociale et spatiale de la population du BESL au meilleur des connaissances disponibles pour effectuer une évaluation réaliste de l'impact acoustique de la navigation.
- 2- Les simulations ont révélé que l'ajout de 820 transits additionnels annuellement (~2.2 transits additionnels / jour en moyenne) est susceptible d'entraîner une hausse des périodes bruyantes (c.-à-d. lorsque le bruit à basse fréquence en provenance de navires reçu par un béluga est supérieur à 120 dB large bande) comprise entre 161% et 450% par rapport à l'année de référence 2017, pour les BESL qui fréquentent le Saguenay. Cette importante hausse relative des périodes bruyantes pour le Saguenay s'explique par le fait que le Saguenay est actuellement un refuge acoustique naturel en ce qui a trait au bruit de la navigation marchande. Un ajout de 820 transits annuellement viendrait presque tripler le nombre de 447 transits de grands navires en 2017. Ce résultat confirme que l'ajout de navires additionnels transitant dans le Saguenay est susceptible d'augmenter de façon significative l'exposition des BESL qui fréquentent cette portion de leur habitat, d'autant plus que le niveau de trafic marchand actuel dans le Saguenay lui confère un rôle de refuge acoustique naturel.

Ces simulations conduites à l'an #1 du programme de recherche n'incluent pas de mesure de réduction du bruit des navires marchands. De telles mesures de réduction du BSM existent et ont fait l'objet d'une revue de la littérature, permettant d'identifier des pistes prometteuses, qu'il s'agisse de mesures opérationnelles ou technologiques. L'impact de ces mesures de réduction du BSM de la navigation fera l'objet de prochains développements et de nouvelles simulations dans le cadre de ce programme de recherche.

Finalement, en l'absence d'étude quantitative disponible au moment de produire les simulations, nous avons posé l'hypothèse que les BESL ne modifient pas leur comportement en fonction du bruit de la navigation reçu et continuent de fréquenter les différents secteurs selon notamment des caractéristiques de fidélité au site. Cependant, des observations sur le BESL suggèrent qu'on ne peut pas exclure un risque d'abandon temporaire ou permanent de certains habitats sous l'effet

d'une augmentation du trafic maritime. Par conséquent, nous investiguerons le risque d'abandon du Saguenay par le BESL dans un contexte d'augmentation de la navigation marchande dans la prochaine année du programme de recherche.

Recommandations et prochaines étapes

Le présent programme de recherche (2018-2023) ainsi que l'initiative de recherche conduite dans le cadre du Plan de protection des océans (2017-2022) mené par Pêches et Océans Canada visent notamment à évaluer l'exposition cumulative des BESL au BSM de la navigation ainsi que leurs impacts et effets cumulatifs sur cette population. Pour ce faire, ces deux initiatives s'appuient sur la collecte, l'analyse et l'intégration d'un grand nombre de jeux de données sur le BESL, la navigation, le BSM et ses impacts. Ces initiatives permettront d'informer le processus d'harmonisation des activités de navigation avec la population de BESL dans son habitat estival.

Dans le cadre du présent programme de recherche, des analyses en cours visent à décrire la structure sociale des BESL. Les résultats de ces analyses auront des répercussions sur l'évaluation de l'exposition cumulative des BESL au BSM de la navigation. Bien qu'il ne soit pas encore possible de déterminer précisément les effets du BSM de la navigation dans l'estuaire du Saint-Laurent et le Saguenay sur le BESL à l'échelle de l'individu, des communautés ou de la population, le déclin de la population de BESL observé au cours des dernières années suggère que les menaces à son rétablissement dépassent les seuils soutenables. L'ajout d'activités de navigation dans l'habitat essentiel du BESL sans mise en place de mesures de réduction du BSM efficaces résulterait en une augmentation de l'exposition des animaux au BSM d'origine anthropique. Un tel scénario irait donc à l'encontre des efforts de rétablissement du BESL.

Par conséquent, pour procéder à une évaluation complète de l'exposition des BESL au BSM de la navigation sous différents scénarios d'accroissement du trafic marchand dans son habitat estival, nous planifions :

- D'intégrer dans la plateforme de simulation les scénarios réalistes d'accroissement du transport marchand anticipé pour le Saint-Laurent et le Saguenay qui seront rendus disponibles par le Secrétariat à la Stratégie maritime du Québec;
- De compléter et d'intégrer dans le simulateur les résultats de l'analyse complète de la dynamique sociale des BESL à partir des données de photo-identification du GREMM;
- D'intégrer dans la plateforme de simulation l'ensemble des segments de la navigation afin d'obtenir un portrait complet des niveaux de bruit cumulatif reçus par les BESL dans leur habitat estival et de la contribution relative de chacun de ces segments.

D'autre part, afin d'assurer de réduire le BSM de la navigation dans l'habitat estival du BESL estimé au moyen de la plateforme de simulation, conformément aux exigences de rétablissement du BESL, nous recommandons et planifions solliciter:

- L'implication des acteurs de l'industrie du transport maritime dans une démarche de co-construction de scénarios de mesures efficaces menant à la réduction significative du BSM.
- L'implication des intervenants tiers de la chaîne du transport maritime (p.ex. fournisseurs et utilisateurs de services du transport maritime) dans la co-construction de solutions

facilitant la mise en œuvre de mesures efficaces par l'industrie du transport maritime menant à une réduction significative du BSM.

Finalement, compte tenu du haut niveau d'incertitude actuel entourant les effets de la navigation et du BSM sur la population du BESL et compte tenu de la situation précaire (déclin) de cette population en voie de disparition, conformément au principe de précaution, nous recommandons la plus grande prudence dans la prise de décisions pour lesquelles des effets écologiques dommageables et irréversibles ne peuvent être exclus.

Table des matières

SOMMAIRE EXÉCUTIF	III
LISTE DES FIGURES.....	IX
LISTE DES TABLEAUX	X
1 MISE EN CONTEXTE.....	1
1.1 L'ESTUAIRE DU SAINT-LAURENT ET LA RIVIÈRE SAGUENAY : INTERACTIONS ENTRE NAVIGATION ET BALEINES	1
1.2 DESCRIPTION DU PROGRAMME DE RECHERCHE	5
1.2.1 Objectifs et portée	5
1.2.2 Structure du programme de recherche interdisciplinaire	6
1.3 STRUCTURE DU RAPPORT	9
2 ACTIVITÉS À L'AN #1	10
2.1 CADRE DES TRAVAUX.....	10
2.2 PROBLÉMATIQUE	10
2.3 VOLET SIMULATEUR 3MTSIM	12
2.3.1 Objectifs	12
2.3.2 Données disponibles.....	12
2.3.3 Description du simulateur	13
2.4 VOLET SCÉNARIOS.....	20
2.4.1 Scénarios d'accroissement du trafic marchand.....	20
2.4.2 Cadre multicritère pour évaluer les mesures de réduction du bruit sous-marin	21
2.5 VOLET ANALYSES.....	25
2.5.1 Objectif.....	25
2.5.2 Données et méthodes.....	25
3 RÉSULTATS À L'AN #1.....	31
3.1 VOLET SIMULATEUR 3MTSIM	31
3.1.1 Module Béluga.....	31
3.1.2 Module de propagation acoustique.....	37
3.1.3 Prochaines étapes	38
3.2 VOLET SCÉNARIOS.....	39
3.2.1 Augmentation du trafic dans la rivière Saguenay	39
3.2.2 Mesures de réduction du bruit sous-marin de la navigation marchande.....	39
3.3 VOLET ANALYSES.....	41
3.3.1 Résultats des scénarios testés avec le simulateur 3MTSim.....	41
4 CONSTATS ET OBSERVATIONS À L'AN #1.....	48
5 RECOMMANDATIONS À L'AN #1	50
6 PROCHAINES ÉTAPES.....	51
6.1 ÉCOLOGIE DU BESL	51
6.2 NAVIGATION	51
6.3 PLATEFORME DE SIMULATION.....	51
6.4 RÉDUCTION DU BRUIT SOUS-MARIN	52
6.4.1 Analyse économique multicritère de la réduction du bruit sous-marin	52
6.4.2 Recherche concertée de mesures de réduction du bruit sous-marin	52
6.4.3 Refuges acoustiques.....	52
7 RÉFÉRENCES.....	53

ANNEXE 1 : PROJET DE DOCTORAT EN BIOLOGIE (SEPT 2019 – AOÛT 2022) – EMMANUELLE BARREAU.....	57
ANNEXE 2 : COMMUNICATIONS SCIENTIFIQUES PRODUITES À L'AN #1	60
ANNEXE 3 : REVUE DES MESURES DE RÉDUCTION DU BRUIT SOUS-MARIN RAYONNÉ PAR LES NAVIRES MARCHANDS.....	61
ANNEXE 4 : RAPPORT D'OCEAN WISE CONSERVATION ASSOCIATION POUR LE PROGRAMME DE RECHERCHE, SUR LES MÉTRIQUES ACOUSTIQUES EN LIEN AVEC LES IMPACTS SUR LE BESL.....	98

Liste des figures

FIGURE 1: AIRE D'ÉTUDE COUVRANT UNE PORTION DE L'ESTUAIRE DU SAINT-LAURENT ET LA RIVIÈRE SAGUENAY ENGLOBBANT L'INTÉGRALITÉ DE L'HABITAT ESTIVAL DU BÉLUGA DU SAINT-LAURENT (EXTRAIT DE (CHION, PARROTT, ET LANDRY 2012)).....	1
FIGURE 2: DENSITÉ DES DIFFÉRENTS SEGMENTS DE LA NAVIGATION DANS ET AUX ABORDS DU PARC MARIN DU SAGUENAY-SAINT-LAURENT EN 2007 (PANNEAU DE GAUCHE, EXTRAIT DE (CHION ET COLL. 2009)) ET EN 2017 (PANNEAU DE DROITE, EXTRAIT DE (TURGEON 2019))	2
FIGURE 3: CHEVAUCHEMENT DES DOMAINES VITAUX (= « HOME RANGE ») DE CINQ ESPÈCES DE BALEINES AVEC LE TRANSPORT MARITIME DANS L'ESTUAIRE DU SAINT-LAURENT (EXTRAIT DE (CHION ET COLL. 2012)).....	3
FIGURE 4: INTERACTIONS ENTRE BATEAUX ET BÉLUGAS DANS L'ESTUAIRE DU SAINT-LAURENT (CRÉDITS: GREMM) .	3
FIGURE 5: STRUCTURE DU PROGRAMME DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE.....	6
FIGURE 6: CAPTURE D'ÉCRAN DU SIMULATEUR DES INTERACTIONS ENTRE LES NAVIRES MARCHANDS (CUBES NOIRS) ET LES BÉLUGAS (BLANCS SI EXPOSÉS À MOINS DE 120 dB EN BRUIT SOUS-MARIN INTÉGRÉ SUR [11 - 1122] HZ ET ROUGES SINON).	8
FIGURE 7 : PROPORTION DE LA POPULATION DE BÉLUGAS D'APRÈS LES INVENTAIRES AÉRIENS (GAUCHE) ET EFFORT D'ÉCHANTILLONNAGE POUR LA PHOTO-IDENTIFICATION (DROITE), POUR CHACUN DES 13 SECTEURS	15
FIGURE 8 : SCHÉMA DU CADRE MÉTHODOLOGIQUE MULTICRITÈRE.	21
FIGURE 9 : CLASSIFICATION DES MESURES DE RÉDUCTION DU BRUIT SOUS-MARIN	22
FIGURE 10 : ESTIMATION DE LA PROPORTION DES BÉLUGAS OBSERVÉS DANS LE SAGUENAY AU MOINS UNE FOIS EN FONCTION DU NOMBRE MINIMUM DE FOIS OÙ LES ANIMAUX ONT ÉTÉ OBSERVÉS.	31
FIGURE 11 : SENSIBILITÉ DE LA MESURE DE MODULARITÉ. LES LIGNES CORRESPONDENT AU NOMBRE MINIMUM D'OBSERVATIONS D'INDIVIDUS. L'AXE DES Y EST LA MESURE DE MODULARITÉ POUR DIFFÉRENTES PÉRIODES D'AGRÉGATION DE DONNÉES DE PHOTO-IDENTIFICATION. LES RÉGIONS EN SEMI-TRANSPARENCE INDIQUENT L'INTERVALLE DE CONFIANCE DE 95 % DES VALEURS DE MODULARITÉ POUR UNE POPULATION SANS AUCUNE STRUCTURE SOCIALE (=RÉSEAU ALÉATOIRE), UN MODÈLE NUL CALCULÉ EN UTILISANT DES PERMUTATIONS DANS LE RÉSEAU.	33
FIGURE 12 : STRUCTURE SOCIALE ET SPATIALE DE LA POPULATION DE BÉLUGA : A) IDENTIFICATION DES COMMUNAUTÉS DISTINCTES DÉRIVÉES DE LA BASE DE DONNÉES DE PHOTO-IDENTIFICATION ET B) LOCALISATION SPATIALE DES OBSERVATIONS DES MEMBRES DE CHACUNE DES COMMUNAUTÉS.	33
FIGURE 13 : VISUALISATION DES DEUX ÉTATS ESTIMÉS DANS LE MMC : LA DISTRIBUTION A) DES LONGUEURS DE PAS ET B) DES ANGLES DE BRAQUAGE. LES COURBES EN VERT INDIQUENT L'ÉTAT AVEC UNE GRANDE PERSISTANCE DIRECTIONNELLE ET DE LONGS DÉPLACEMENTS.....	35
FIGURE 14: DISTRIBUTION DES PROFONDEURS DE PLONGÉE POUR LES BESL SIMULÉES (ROUGE) ET OBSERVÉES DANS LES DONNÉES VHF (VERTE)	36
FIGURE 15 : PANNEAU SUPÉRIEUR : HISTOGRAMMES DE LA FRACTION RELATIVE DES NIVEAUX DE BRUIT INSTANTANÉ REÇU POUR CHAQUE SCÉNARIO (AXE LOGARITHMIQUE) POUR LE SECTEUR DE L'ESTUAIRE MOYEN. PANNEAU DU MILIEU : GROSSISSEMENT DE LA SECTION ENCADRÉE AU PANNEAU SUPÉRIEUR AFIN DE SAISIR LES DIFFÉRENCES ENTRE LES DIVERS SCÉNARIOS POUR LES NIVEAUX DE BRUIT INSTANTANÉ ÉLEVÉS (> 120 dB). PANNEAUX INFÉRIEURS : DIAGRAMMES-MOUSTACHES DES NIVEAUX DE BRUIT INSTANTANÉ REÇU POUR LES 4 SCÉNARIOS ÉTUDIÉS. LES 5IÈME (POINT), 10IÈME (TRAIT), 25IÈME, 50IÈME, 75IÈME (BOÎTE), 90IÈME (TRAIT) ET 95IÈME (POINT) PERCENTILES SONT REPRÉSENTÉS. LES COURBES DE TYPE « VIOLON » EN GRIS REPRÉSENTENT LA PROBABILITÉ DE DENSITÉ DE DISTRIBUTION DES MESURES POUR CHAQUE SCÉNARIO.....	41
FIGURE 16 : IDENTIQUE À LA FIGURE 15 POUR LE SECTEUR DE L'ESTUAIRE MARITIME	42
FIGURE 17 : IDENTIQUE À LA FIGURE 15 POUR LE SECTEUR DU SAGUENAY.....	42
FIGURE 18: PANNEAUX SUPÉRIEURS : DISTRIBUTIONS DES SEL PAR SECTEUR ET PAR SCÉNARIO. PANNEAUX INFÉRIEURS : DIAGRAMMES-MOUSTACHES DES EXPOSITIONS CUMULATIVES PRÉDITES PAR SECTEUR ET PAR SCÉNARIOS. LES 5ÈME (POINT), 10ÈME (TRAIT), 25ÈME, 50ÈME, 75ÈME (BOÎTE), 90ÈME (TRAIT) ET 95ÈME (POINT) PERCENTILES SONT REPRÉSENTÉS. LES COURBES DE TYPE « VIOLON » EN GRIS REPRÉSENTENT LA PROBABILITÉ DE DENSITÉ DE DISTRIBUTION DES SEL.....	45

Liste des tableaux

TABLEAU 1: SYNTHÈSE DES BASES DE DONNÉES PARTAGÉES PAR DES PARTENAIRES ET COLLABORATEURS DU PROGRAMME DE RECHERCHE À L'AN #1	12
TABLEAU 2: GRILLE TRANSMISE AUX PROMOTEURS VISANT À CARACTÉRISER LE TRAFIC ADDITIONNEL SUSCEPTIBLE D'ÊTRE AJOUTÉ AU TRAFIC ACTUEL COMME SCÉNARIO DE DÉPLOIEMENT DE LA STRATÉGIE MARITIME DU QUÉBEC	20
TABLEAU 3 : CHAMPS CONTENUS DANS LA BASE DE DONNÉES DU SYSTÈME D'INFORMATION MARITIME	24
TABLEAU 4: PRINCIPAUX PARAMÈTRES D'ENTRÉE DU SIMULATEUR	26
TABLEAU 5 : MÉTRIQUES ACOUSTIQUES POUR L'ÉVALUATION DES IMPACTS DU BRUIT SOUS-MARIN DE LA NAVIGATION SUR LES BÉLUGAS DU SAINT-LAURENT (ANNEXE 4)	28
TABLEAU 6: DESCRIPTION DES QUATRE (4) SCÉNARIOS TESTS AVEC LE SIMULATEUR À L'AN #1	29
TABLEAU 7 : PLAN DE SIMULATION POUR RÉPONDRE AUX QUESTIONS DE L'AN #1	30
TABLEAU 8 : PARAMÈTRES ESTIMÉS PAR LE MMC À DEUX ÉTATS APPLIQUÉS SUR LES DONNÉES TÉLÉMÉTRIQUES DE SUIVI INDIVIDUEL DES BÉLUGAS. LES DEUX ÉTATS SONT IDENTIFIÉS PAR [1] ET [2].	34
TABLEAU 9: TEST DE STUDENT (T-TEST) SUR LES NIVEAUX DE BRUIT INSTANTANÉS RL REÇUS PAR LES BÉLUGAS DANS LES DIFFÉRENTS SECTEURS DE L'HABITAT, POUR VÉRIFIER SI LES DIFFÉRENCES ENTRE LES 4 SCÉNARIOS SONT STATISTIQUEMENT SIGNIFICATIVES. SCÉNARIO #1 : TRAFIC 2017 ET BÉLUGAS SANS DOMAINE VITAL ; SCÉNARIO #2 : TRAFIC 2017 + SMQ ET BÉLUGAS SANS DOMAINE VITAL ; SCÉNARIO #3 : TRAFIC 2017 ET BÉLUGAS AVEC DOMAINES VITAUX ; SCÉNARIO #4 : TRAFIC 2017 + SMQ ET BÉLUGAS AVEC DOMAINES VITAUX.	43
TABLEAU 10: POURCENTAGE DE RL INSTANTANÉS > 120 dB – PÉRIODES BRUYANTES POUR CHAQUE SECTEUR ET CHAQUE SCÉNARIO	44
TABLEAU 11: AUGMENTATION DES PÉRIODES BRUYANTES (RL > 120 dB) EN PRÉSENCE DU TRAFIC ADDITIONNEL (820 TRANSITS ADDITIONNELS DANS L'ESTUAIRE MARITIME ET LE SAGUENAY) PAR RAPPORT AU TRAFIC 2017. LES DEUX COLONNES FONT LA DISTINCTION ENTRE LES MODULES DE DÉPLACEMENTS DE BÉLUGAS PRENANT EN COMPTE OU NON LES DOMAINES VITAUX INDIVIDUELS DES ANIMAUX.....	44
TABLEAU 12: TEST DE STUDENT (T-TEST) SUR LES NIVEAUX DE BRUIT CUMULATIFS SEL REÇUS PAR LES BÉLUGAS DANS LES DIFFÉRENTS SECTEURS DE L'HABITAT, POUR VÉRIFIER SI LES DIFFÉRENCES ENTRE LES 4 SCÉNARIOS SONT STATISTIQUEMENT SIGNIFICATIVES. SCÉNARIO #1 : TRAFIC 2017 ET BÉLUGAS SANS DOMAINE VITAL ; SCÉNARIO #2 : TRAFIC 2017 + SMQ ET BÉLUGAS SANS DOMAINE VITAL ; SCÉNARIO #3 : TRAFIC 2017 ET BÉLUGAS AVEC DOMAINES VITAUX ; SCÉNARIO #4 : TRAFIC 2017 + SMQ ET BÉLUGAS AVEC DOMAINES VITAUX.	46

1 Mise en contexte

1.1 L'estuaire du Saint-Laurent et la rivière Saguenay : interactions entre navigation et baleines

L'estuaire du Saint-Laurent (ESL) et la rivière Saguenay (Figure 1) abritent des écosystèmes fragiles et d'une diversité exceptionnelle. Le parc marin du Saguenay–Saint-Laurent (PMSSL) cogéré par les gouvernements fédéral et provincial y a été créé en 1998 en priorité pour protéger l'habitat de la population du béluga de l'estuaire du Saint-Laurent (*Delphinapterus leucas*). Un projet d'aire marine protégée adjacente au PMSSL est également à l'étude dans ce secteur.

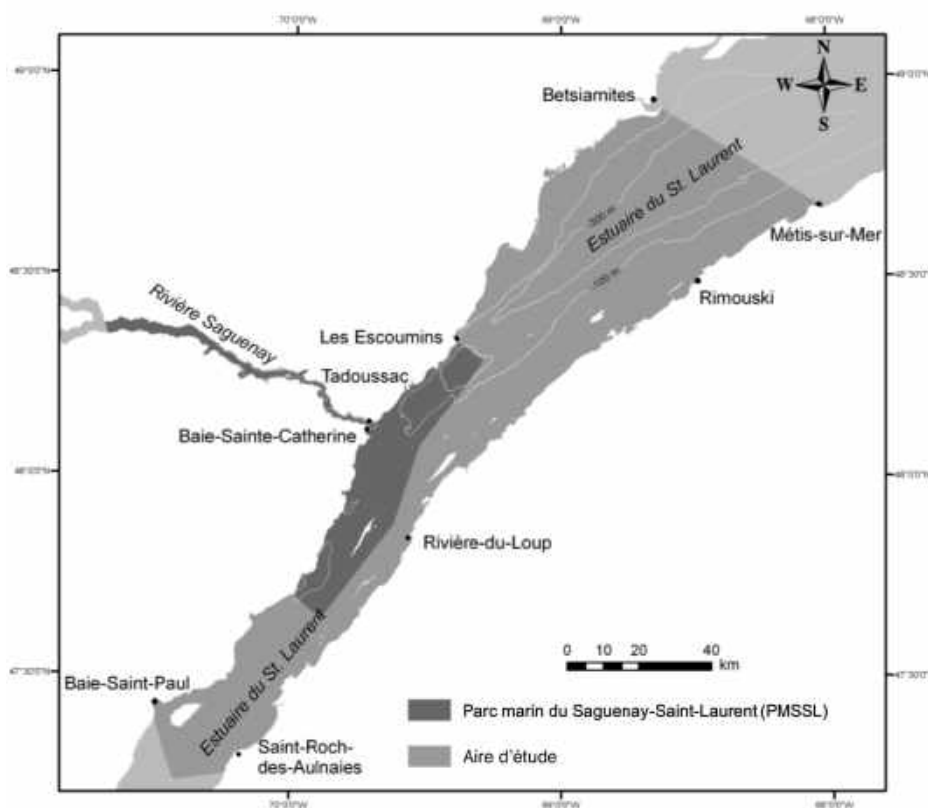


Figure 1: Aire d'étude couvrant une portion de l'estuaire du Saint-Laurent et la rivière Saguenay englobant l'intégralité de l'habitat estival du béluga du Saint-Laurent (extrait de (Chion, Parrott, et Landry 2012))

Notre aire d'étude¹ (Figure 1) couvre l'intégralité de l'habitat d'été du béluga de l'estuaire du Saint-Laurent (BESL) ainsi que les aires d'alimentation de plusieurs espèces migratrices de

¹ Notre aire d'étude dépasse les limites de l'habitat estival du BESL de façon à prendre en compte le bruit transmis par des bateaux situés à l'extérieur de cet habitat.

baleines, incluant la population de rorquals bleus de l'Atlantique Nord-Ouest (*Balaenoptera musculus*) et celle des rorquals communs de l'Atlantique Nord (*Balaenoptera physalus*). Ces trois espèces figurent sur la liste des espèces en péril au Canada (Canada 2002) et sur la liste des espèces désignées ou susceptibles d'être désignées menacées ou vulnérables au Québec (Québec 2010). Les statuts de ces espèces en péril étant reconnus par les gouvernements du Canada et du Québec, ils entraînent des exigences légales d'agir pour leur rétablissement.

En plus de leur valeur économique (p. ex. tourisme d'observation en mer des baleines), les baleines ont une très forte valeur socioculturelle et patrimoniale au Québec et au Canada (Boquet et Rioux 2018; Boxall et coll. 2012). Particulièrement, l'importance du BESL pour les Québécoises et Québécois s'est matérialisée par les fortes mobilisations sociales des dernières années dans l'intérêt de leur protection. Le rétablissement du BESL est par conséquent un enjeu écologique, économique et social demandant une stratégie de gestion durable et intégrée des activités humaines dans son habitat essentiel.

L'ESL et la rivière Saguenay est également une région où la circulation maritime des différents segments de la navigation est dense et intense pendant la période estivale (Chion et coll. 2009) (Figure 2). En 2017 (Turgeon 2019), il y a eu 4545 transits de navires marchands et 225 voyages de navires de croisière nationales et internationales dans le PMSSL qui protège le cœur de l'habitat estival du BESL. Il y a eu également 6658 excursions d'observation des mammifères marins, dont plus de 65% pendant les mois de juillet et août, et 659 autres excursions commerciales ne ciblant pas l'observation des mammifères marins. Si l'on ajoute 43785 mouvements de traversiers, près de 4732 mouvements des bateaux-pilotes et 3214 nuitées effectuées par des plaisanciers dans les marinas bordant le PMSSL, on obtient un portrait de plus de 98.6 % du trafic maritime dans l'ESL et le Saguenay (excluant les kayaks).

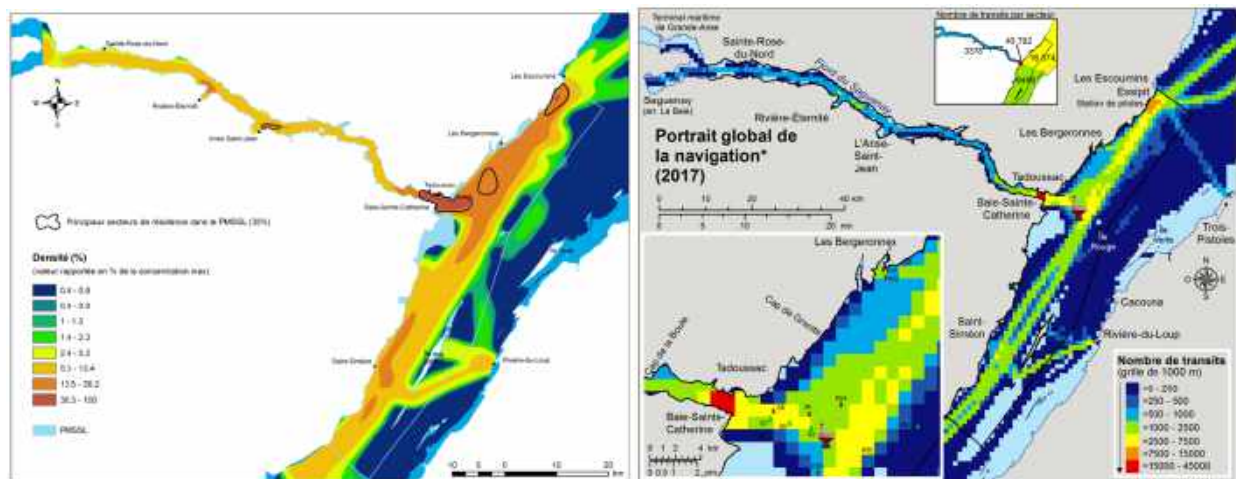


Figure 2: Densité des différents segments de la navigation dans et aux abords du parc marin du Saguenay-Saint-Laurent en 2007 (panneau de gauche, extrait de (Chion et coll. 2009)) et en 2017 (panneau de droite, extrait de (Turgeon 2019))

La co-utilisation de ce territoire par la navigation et les mammifères marins donne lieu à de nombreuses zones de chevauchement où les interactions rapprochées entre bateaux et baleines sont fréquentes (Figure 3 et Figure 4).

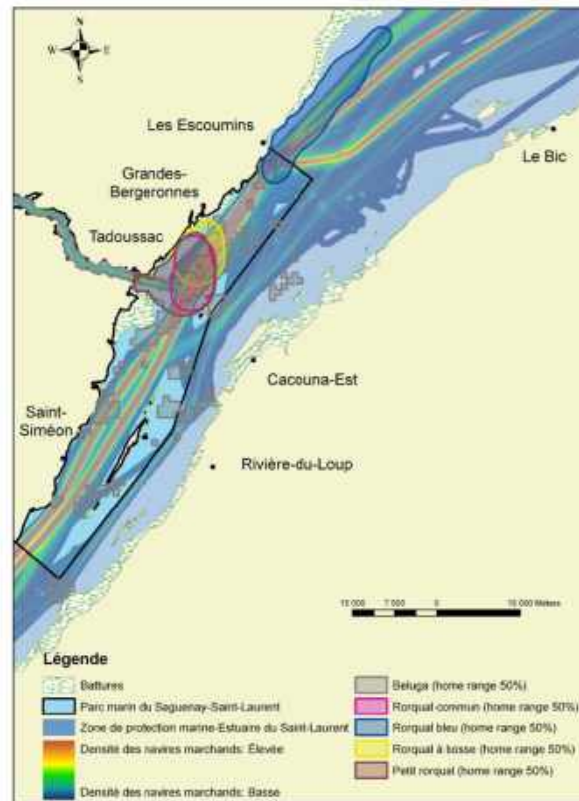


Figure 3: Chevauchement des domaines vitaux (= « home range ») de cinq espèces de baleines avec le transport maritime dans l'estuaire du Saint-Laurent (extrait de (Chion et coll. 2012)).



Figure 4: Interactions entre bateaux et bélugas dans l'estuaire du Saint-Laurent (crédits: GREMM)

La navigation exerce plusieurs menaces sur les baleines du Saint-Laurent incluant le bruit sous-marin (BSM), le dérangement et les collisions (Pêches et Océans Canada 2009, 2012). Plusieurs espèces de baleines utilisent une large plage du spectre de fréquences acoustiques pour la conduite de leurs activités vitales (Southall et coll. 2008). Le bruit d'origine anthropique a le potentiel d'interférer avec des fréquences utilisées par les baleines (Erbe et coll. 2016) (phénomène de masquage), de provoquer l'interruption (temporaire ou prolongée) d'activités vitales ou l'évitement (temporaire ou prolongé) d'habitats essentiels et d'entraîner des réactions physiologiques (stress) ou des lésions (temporaires ou permanentes) de leur système auditif (Gomez et coll. 2016; Richardson et coll. 1995; Southall et coll. 2008; Weilgart 2007).

La pollution sonore d'origine anthropique dans l'ESL et la rivière Saguenay peut donc conduire à la dégradation de l'habitat essentiel du béluga du Saint-Laurent, en faisant un enjeu majeur limitant son rétablissement. Le BSM de la navigation a été identifié parmi les trois principales menaces au rétablissement du BESL, avec la pollution d'origine industrielle et la disponibilité des proies (Pêches et Océans Canada 2018b). C'est pour ces raisons, que la réduction des impacts du bruit d'origine anthropique est identifiée comme une action *essentielle* dans les plans de rétablissement du béluga du Saint-Laurent et du rorqual bleu de l'Atlantique Nord-Ouest (Pêches et Océans Canada 2009, 2012), faisant l'objet d'un plan d'actions multi-espèce centré sur la population du béluga de l'estuaire du Saint-Laurent (Pêches et Océans Canada 2019).

La marine marchande est un contributeur majeur du BSM continu d'origine anthropique dans l'ESL et la rivière Saguenay. En effet, l'énergie acoustique des navires marchands se concentre dans les très basses fréquences (Wenz 1962) qui ont la particularité de se propager sur des distances beaucoup plus importantes que les hautes fréquences qui caractérisent les plus petites embarcations (Wladichuk et coll. 2019). Toute perspective de développement menant à l'augmentation du transport marchand dans les secteurs écologiquement sensibles requiert donc une attention particulière. D'autres composantes de la navigation motorisée contribuant également au BSM doivent être incluses dans une perspective centrée sur les impacts cumulatifs. Dans l'ESL et la rivière Saguenay, ces composantes incluent principalement les traversiers, la plaisance et le tourisme d'excursions en mer (Chion et coll. 2009; Turgeon 2019). Les activités de navigation dans l'habitat des baleines du Saint-Laurent présentent également des risques de dérangement et de collisions mortelles, identifiés comme des menaces au rétablissement de plusieurs espèces de baleines en péril.

Le déclin actuel de la population du BESL en dépit des efforts consentis depuis plusieurs décennies pour son rétablissement est préoccupant (Pêches et Océans Canada 2018b). Cette situation traduit l'insuffisance des mesures mises en œuvre pour réduire les menaces au rétablissement du BESL. Trois menaces principales limitent le rétablissement de la population du BESL, à savoir:

1. le bruit sous-marin de la navigation;
2. les contaminants de l'environnement;
3. la disponibilité et la qualité des proies.

Le déclin de la population suggère que les effets cumulatifs de ces principales menaces sont au-delà des limites soutenables par la population du BESL.

Le développement d'une stratégie maritime durable pour le Québec devant s'effectuer dans le respect des écosystèmes fragiles de l'ESL et de la rivière Saguenay et des lois protégeant les

espèces en péril et leur habitat (Gouvernement du Québec 2015), il est nécessaire 1) d'évaluer en amont les impacts potentiels et cumulatifs des projets susceptibles d'altérer l'habitat des espèces en péril de la région et 2) d'évaluer des scénarios de mesures visant à réduire les risques d'impacts.

Dans une perspective d'accroissement du trafic maritime, la réduction de l'impact du BSM et des risques de collisions entre la navigation et les baleines dans l'ESL et la rivière Saguenay sont des problèmes socio-économico-environnementaux complexes. Leur résolution requiert, en amont, l'interdisciplinarité scientifique pour accompagner une démarche de concertation impliquant l'ensemble des parties prenantes concernées. L'approche d'accompagnement scientifique proposée dans ce programme de recherche de 5 ans repose sur la facilitation des échanges entre gestionnaires, acteurs du milieu maritime et scientifiques dans la recherche de solutions concertées. Cette approche doit s'appuyer sur des outils d'aide à la concertation et d'aide à la décision intégrant les meilleures connaissances et données scientifiques sur la problématique des impacts cumulatifs de la navigation sur les baleines.

1.2 Description du programme de recherche

1.2.1 Objectifs et portée

Le programme de recherche scientifique d'une durée de 5 ans (2018-2023) vise à développer et utiliser des outils d'aide à la concertation et à la décision pour informer une démarche de réduction des impacts de la navigation sur les baleines dans l'estuaire du Saint-Laurent et la rivière Saguenay.

Spécifiquement, les outils développés dans ce programme de recherche visent à :

1. évaluer les impacts cumulatifs de la navigation sur les baleines du Saint-Laurent pour divers scénarios de déploiement de projets susceptibles d'augmenter le trafic maritime dans l'habitat du béluga, dans le cadre de la Stratégie maritime du Québec;
2. évaluer l'efficacité, les coûts et bénéfices de différentes mesures de gestion de la navigation, différentes innovations technologiques ou encore la mise en place de zone de protection tels que des refuges acoustiques visant à réduire les impacts de la navigation sur les baleines;
3. informer des processus multiacteurs visant à réduire les impacts de la navigation sur les baleines, sur la base des meilleures connaissances scientifiques et en tenant compte des contraintes opérationnelles de la navigation.

Sur l'horizon de 5 ans, le programme de recherche vise à rendre disponible une version du simulateur 3MTSim validée numériquement permettant d'effectuer des analyses multi-spécifiques et multi-risques de scénarios de déploiement de la Stratégie maritime, et d'identifier des mesures de réduction de ces risques réalistes. Cela signifie que le simulateur permettra d'évaluer plusieurs types de risques associés au transport maritime (collisions, exposition au bruit) pour plusieurs espèces de mammifères marins (béluga, grands rorquals) dans le but d'alimenter un processus de concertation multiacteur.

La portée de ce programme de recherche scientifique est définie comme suit :

- L'aire d'étude est la portion de l'estuaire du Saint-Laurent située entre Baie-Saint-Paul et Betsiamites sur la rive nord et Saint-Roch-des-Aulnaies et Métis-sur-Mer sur la rive sud et la rivière Saguenay (Figure 1).

- Les impacts spécifiques de la navigation sur les baleines qui sont ciblés dans ce programme de recherche sont :
 - 1) les risques de collisions mortelles entre bateaux et baleines;
 - 2) l'exposition des baleines au bruit sous-marin de la navigation.
- Cinq espèces de baleines sont prises en compte dans ce programme de recherche, à savoir :
 - 1) béluga du Saint-Laurent;
 - 2) rorqual bleu;
 - 3) rorqual commun;
 - 4) rorqual à bosse;
 - 5) petit rorqual.
- Les composantes de la navigation considérées sont :
 - 1) navigation marchande;
 - 2) croisières nationales et internationales;
 - 3) excursions aux baleines;
 - 4) navigation de plaisance;
 - 5) traversiers.

L'atteinte des objectifs fixés requiert des expertises couvrant plusieurs disciplines scientifiques.

1.2.2 Structure du programme de recherche interdisciplinaire

La structure du programme de recherche est schématisée à la Figure 5. Ce programme est réalisé par une équipe de recherche multidisciplinaire mobilisant des expertises en biologie, écologie, statistiques, génie, modélisation et simulation informatique, intelligence artificielle, acoustique, géographie et économie.

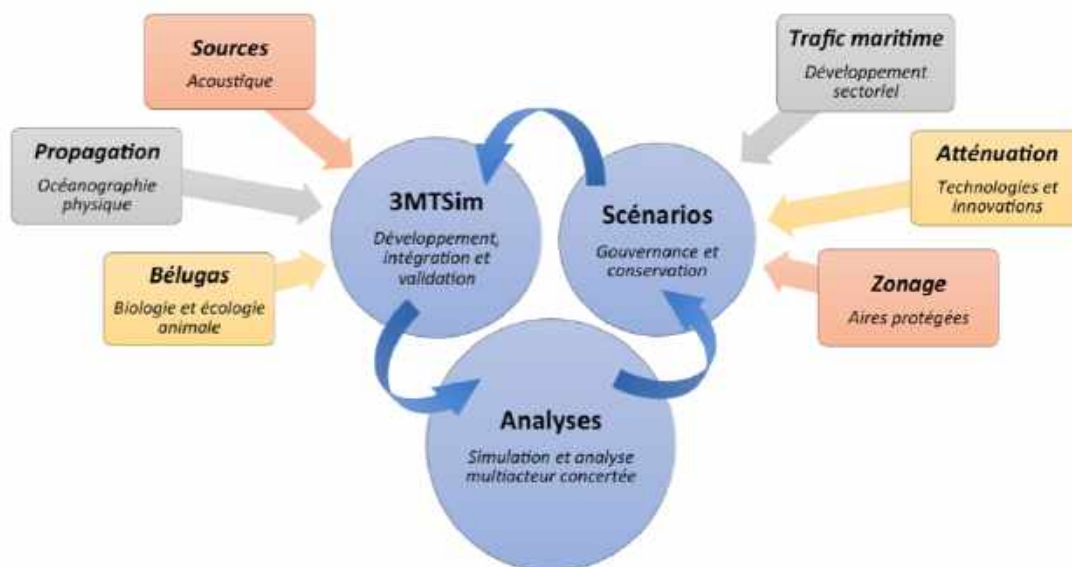


Figure 5: Structure du programme de recherche scientifique

L'approche proposée repose en premier lieu sur l'analyse de plusieurs bases de données existantes dans le but de modéliser la dynamique spatiotemporelle de la navigation et des baleines et leurs interactions dans l'ESL et la rivière Saguenay. Pour ce faire, nous développons un simulateur spatiotemporel par l'approche de la modélisation multiagent. Cette approche de modélisation origine du domaine de l'intelligence artificielle et a été appliquée abondamment dans le contexte de la gestion d'écosystèmes (Bousquet et Le Page 2004; Chion et coll. 2013, 2012). Comme illustré à la Figure 6, le principe de cette approche est de représenter les comportements et interactions entre des agents dans un environnement, en leur octroyant des capacités de communication, de collecte d'information et d'actions/réactions en fonction des propriétés de leur environnement et du comportement des autres agents.

Cette approche de modélisation permet de représenter de façon individuelle le comportement de chaque bateau et de chaque baleine dans l'environnement virtuel de l'ESL et du Saguenay (Figure 6). Elle permet également d'intégrer dans un même environnement de simulation les meilleures connaissances sur la navigation, sur l'écologie des baleines et leurs interactions spatiotemporelles et acoustiques dans l'estuaire du Saint-Laurent et la rivière Saguenay. Le simulateur ainsi créé permet de comparer différents scénarios d'accroissement du trafic maritime et de mesures de réduction sur la base de l'exposition des baleines au trafic maritime et des risques d'impacts.

Des analyses socio-économiques sont également élaborées dans le cadre de ce programme de recherche. Dans un premier temps, ces analyses sont centrées sur l'évaluation des coûts associés à la mise en place de mesures de réduction du BSM de la marine marchande.

Les trois volets du programme de recherche illustrés à la Figure 5 sont brièvement décrits ci-après.

1.2.2.1 Volet #1 : Simulateur 3MTSim

Ce volet a pour objectif d'améliorer et de valider le simulateur 3MTSim (Chion et coll. 2017) afin de lui permettre d'évaluer les impacts de différents scénarios de développement du transport maritime et de réduction du BSM de la navigation dans l'estuaire du Saint-Laurent et le fjord du Saguenay, avec une attention particulière sur l'habitat essentiel du béluga du Saint-Laurent. L'objectif principal porte sur la représentation des différents types de navires marchands, mais les autres composantes du trafic maritime régional seront aussi représentées dans le simulateur 3MTSim. Ces autres composantes incluent notamment les traversiers, les bateaux d'excursions aux baleines et les plaisanciers. Le développement du simulateur 3MTSim repose sur l'amélioration des trois modules soit 1) la caractérisation des sources de bruit, 2) leur propagation dans le milieu naturel et 3) la distribution et les mouvements des mammifères marins, en particulier ceux des bélugas.

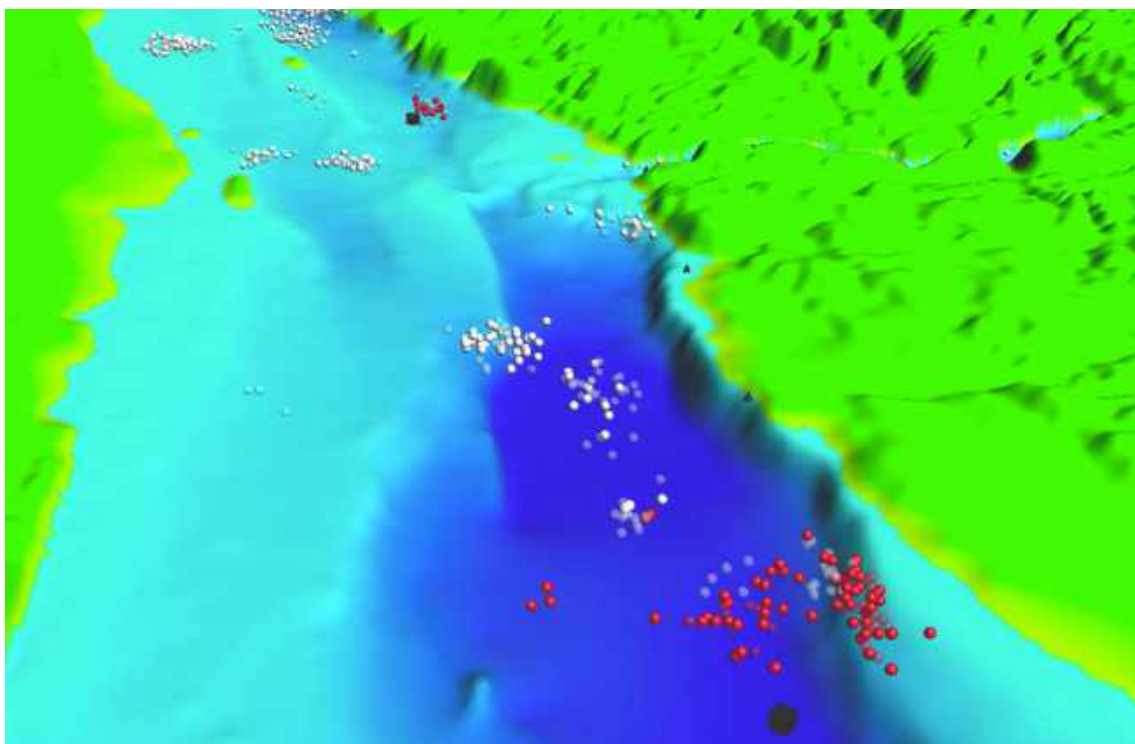


Figure 6: Capture d'écran du simulateur des interactions entre les navires marchands (cubes noires) et les bélugas (blancs si exposés à moins de 120 dB en bruit sous-marin intégré sur [11 - 1122] Hz et rouges sinon).

1.2.2.2 Volet #2 : Scénarios

Ce volet vise à élaborer des scénarios réalistes de stratégies de conservation en lien avec le déploiement de la Stratégie maritime du Québec. L'élaboration de ces scénarios sera faite au sein du groupe multiacteur. Ces scénarios sont des intrants du simulateur 3MTSim qui permettra de projeter leurs impacts cumulatifs sur les bélugas dans leur habitat essentiel. L'équipe du programme de recherche visée par la présente entente devra traduire ces scénarios dans le langage informatique du simulateur 3MTSim.

1.2.2.3 Volet #3 : Analyses

La fonction principale du simulateur 3MTSim est d'évaluer des scénarios pour informer un ensemble d'acteurs et de parties prenantes interpellés par la réduction du BSM et de ses impacts sur les écosystèmes. Les activités prévues dans ce volet du programme de recherche consistent donc à informer de façon itérative le groupe multiacteur dans la recherche de solutions de réduction du bruit dans l'habitat essentiel du béluga, menant ultimement à leur implémentation. C'est cette même approche qui a été utilisée pour la mise en place de mesures volontaires visant à réduire les risques de collisions entre les navires marchands et les grands rorquals dans l'ESL (Chion et coll. 2018).

1.3 Structure du rapport

Ce rapport commence par présenter le cadre des travaux conduits à l'an #1 du programme (section 2.1). Par la suite, la problématique des interactions entre la navigation et le béluga dans une perspective de croissance du transport maritime est présentée (section 2.2). Pour chacun des 3 volets du programme (Figure 5), nous poursuivons avec une description des objectifs spécifiques poursuivis à l'an #1, ainsi que les données et méthodes mobilisées pour atteindre ces objectifs (sections 2.3, 2.4 et 2.5). Les résultats des travaux conduits dans chacun des trois volets à l'an #1 sont ensuite présentés (section 3) permettant d'énoncer une série de constats et d'observations (section 4). Finalement, une série de recommandations (section 5) et une description des prochaines étapes du programme de recherche (section 6) ponctuent ce rapport.

2 Activités à l'an #1

2.1 Cadre des travaux

L'an #1 du programme de recherche a été la période de démarrage au cours de laquelle le recrutement des étudiants et membres de l'équipe (Annexe 1), le maillage des partenariats, le partage de données et l'identification des synergies avec d'autres initiatives connexes ainsi que l'arrimage administratif avec les différents services et politiques internes de l'Université du Québec en Outaouais ont constitué des priorités.

En plus de poser les fondations du programme de recherche pour 5 ans, les travaux de l'an #1 ont eu pour objectif d'identifier les enjeux prioritaires et de produire des connaissances pour alimenter le débat actuel sur l'évaluation des impacts du BSM de la navigation sur la population de béluga de l'estuaire du Saint-Laurent et sur la recherche de solutions de réduction. Plusieurs productions et communications scientifiques ont été effectuées dans cette première année (Annexe 2).

Spécifiquement, les travaux scientifiques réalisés se sont concentrés sur la question de l'évaluation des impacts du trafic maritime additionnel résultant de nouveaux projets de développement industrialo-portuaires sur les rives de la rivière Saguenay sur le BESL et sur le recensement d'options de réduction du BSM des navires marchands. La portée des travaux de l'an #1 s'est donc limité à :

- Espèce de baleine : population de bélugas de l'estuaire du Saint-Laurent;
- Segment de la navigation : navires marchands;
- Type d'impact de la navigation : bruit sous-marin à basse fréquence (<1200 Hz);
- Période d'intérêt : juin à septembre² ;
- Aire d'étude : estuaire du Saint-Laurent et rivière Saguenay (Figure 1) ;
- Solutions explorées : réduction de l'exposition du BESL au bruit des navires marchands.

La section suivante présente la problématique des travaux réalisés à l'an #1.

2.2 Problématique

L'analyse des impacts acoustiques d'activités humaines (p. ex. navigation) sur des mammifères marins passe préalablement par une étape d'estimation de l'exposition de la population au BSM généré par ces activités. Dans le cas d'activités de navigation, cette étape est généralement conduite en croisant une carte statique des niveaux de BSM générés avec une carte statique de la densité de la population de mammifères marins, sans tenir compte des mouvements individuels des animaux ni des patrons d'utilisation de l'habitat (p. ex. fidélité au site). De plus, chaque nouveau projet de développement est souvent évalué « à la pièce » sans tenir compte des effets cumulatifs de l'ensemble des projets s'ajoutant aux activités humaines exerçant déjà une pression sur les populations de mammifères marins. Dans le cas du BESL, cette approche comporte plusieurs faiblesses qui ne permettent pas une évaluation précise de l'exposition des animaux au bruit de la navigation, limitant la capacité d'estimer les impacts d'une augmentation du trafic maritime dans

² Cette période est déterminée en fonction de la disponibilité des données sur le BESL (Tableau 1).

son habitat estival (Pêches et Océans Canada 2018a). De plus, ces approches classiques sont également limitées par le fait que la population du BESL est une espèce sociale dont la dynamique sociale est susceptible d'influencer fortement l'utilisation de l'habitat (Faille et coll. 2010; Sigaud et coll. 2017). Cette limite des analyses d'impact acoustique actuelles est d'ailleurs formulée dans la Réponse des Sciences du MPO sur les effets potentiels des projets de construction de terminaux maritimes dans le fjord du Saguenay sur le BESL et son habitat (Pêches et Océans Canada 2018a), dans laquelle les experts concluent :

« ... une évaluation complète des impacts de ce trafic additionnel sur le béluga, que ce soit au niveau de l'individu ou de la population, passe obligatoirement par une analyse cumulative de l'exposition au bruit qui tient compte des mouvements individuels et de la fréquentation des divers secteurs. Le nombre d'individus dont la condition physique pourrait être négativement affectée suite à des pertes d'opportunités permettrait d'estimer l'effet probable sur la production de jeunes et la survie de l'individu, ainsi que sur la trajectoire de la population (en tenant compte du sexe et du nombre d'individus affectés). Cette information n'était pas disponible au moment de produire cet avis. »

Ce constat scientifique sur les évaluations d'impact acoustique est préoccupant puisqu'il signifie que les prémisses des évaluations effectuées pour le BESL jusqu'ici sont incomplètes en ce sens qu'elles tiennent peu compte de l'écologie de cette espèce. Considérant le statut précaire de la population de BESL en voie de disparition et en déclin, il est primordial de prendre des décisions basées sur une évaluation d'impact acoustique qui comble les lacunes des approches classiques réalisées jusqu'ici. L'approche de simulation proposée pour pallier les lacunes mentionnées précédemment est décrite dans la section sur le volet Simulateur 3MTSim (section 2.3). Cette étape d'évaluation des impacts acoustiques du trafic marchand sur les baleines, en particulier sur le BESL, est préalable à la co-construction de scénarios de mesures visant à réduire l'exposition des baleines au BSM des navires marchands.

Dans le cadre du déploiement de la Stratégie maritime du Québec (SMQ), plusieurs projets industrialo-portuaires sont susceptibles de voir le jour, impliquant du trafic maritime additionnel dans la rivière Saguenay. Afin de conduire une évaluation des impacts cumulatifs de ce trafic additionnel sur les baleines dans l'estuaire du Saint-Laurent et la rivière Saguenay au moyen du simulateur 3MTSim, il est nécessaire de connaître les scénarios de trafic marchand additionnel découlant de la SMQ. La démarche suivie pour l'élaboration de ces scénarios est présentée dans la section sur le Volet Scénarios (section 2.4).

L'approche de simulation développée dans ce programme de recherche requiert un grand nombre de jeux de données sur la navigation, l'environnement et sur les baleines. Plusieurs analyses de ces jeux de données sont nécessaires pour développer et valider le simulateur. À l'issue de ces étapes, les premières simulations réalisées à l'an #1 visent à évaluer l'impact d'une augmentation de la navigation dans le Saguenay et l'estuaire maritime sur les niveaux de bruit reçu par les bélugas à l'échelle de l'individu. Les simulations visent également à mettre en lumière la valeur-ajoutée de l'approche de simulation développée comparativement à une approche classique d'évaluation d'impact acoustique. La démarche et les analyses réalisées sont présentées dans la section sur le Volet Analyses (section 2.5).

Les sections suivantes décrivent les objectifs et méthodes des trois volets du programme de recherche (cf. Figure 5) qui ont fait l'objet des travaux réalisés à l'an #1.

2.3 Volet Simulateur 3MTSim

2.3.1 Objectifs

L'objectif principal du volet Simulateur à l'an #1 est d'intégrer dans un même environnement de simulation les déplacements spatiotemporels des navires marchands mis à jour avec les données complètes disponibles de 2017 et ceux des BESL à l'échelle de l'individu pour simuler leur exposition au BSM de la navigation à basse fréquence. Ce travail est réalisé en bâtissant sur la version disponible du simulateur présentée dans (Chion et coll. 2017).

2.3.2 Données disponibles

Lors de la 1^{ère} année du programme, plusieurs bases de données ont été rendues accessibles par les partenaires et collaborateurs du programme de recherche. Une description de ces bases de données est présentée dans le Tableau 1.

Tableau 1: Synthèse des bases de données partagées par des partenaires et collaborateurs du programme de recherche à l'an #1

Jeu de données	Propriétaire/Référence	Étendue temporelle	Description	Module du simulateur
Photo-identification des bélugas	Groupe de recherche et d'éducation sur les mammifères marins	1989-2007 (été)	Structure sociale et communautés	Béluga
Suivis télémétriques des bélugas (VHF) en 3D	Pêches et Océans Canada	2001-2005	Patrons de mouvements en 3D	Béluga
Suivis de troupeaux de bélugas	Groupe de recherche et d'éducation sur les mammifères marins	1989-2017	Patrons d'utilisation du territoire par les communautés	Béluga
Distribution spatiale des bélugas en provenance des inventaires aériens	Pêches et Océans Canada	1994-2014	Distribution spatiale de la population en été	Béluga
Données AIS	Garde côtière du Canada	2011-2018	Caractérisation du trafic maritime dans l'habitat du béluga du Saint-Laurent	Navigation
Données du Système d'Information Maritime	Innovation Maritime	2018-2019	Information sur les navires marchands	Navigation
Propriétés bathymétriques	Service Hydrographique canadien	N.A.	Information bidimensionnelle des mesures de profondeur sur l'ensemble de la surface computationnelle	Navigation Acoustique-Propagation

Jeu de données	Propriétaire/Référence	Étendue temporelle	Description	Module du simulateur
			(résolution horizontale = 100 mètres)	
Propriétés géoacoustiques des fonds marins	(Jensen et coll. 2011; Loring et Nota 1973)	N.A.	Information géologique des fonds marins convertie en propriétés géoacoustiques	Acoustique - Propagation
Propriétés géoacoustiques de la colonne d'eau	Observatoire global du Saint-Laurent (OGSL) (Leroy, Robinson, et Goldsmith 2008)	2004-2018 (été)	Information par secteur des propriétés en température (T) et salinité (S) en fonction de la profondeur (z) (résolution verticale = 1 mètre). Conversion des paires (T, S) en vitesse du son (cw). Ajustement polynomial des profils en vitesse du son.	Acoustique - Propagation
Signatures sonores des navires à basse fréquence	(Simard et coll. 2016)	2013	Modèle empirique du bruit à la source des navires	Acoustique - Source
Niveaux de bruit dans l'habitat estival du béluga	(McQuinn et coll. 2011)	2004-2005	Niveaux de bruit dans différents secteurs à 15 m de profondeur	Acoustique

2.3.3 Description du simulateur

Les principaux modules qui interviennent dans la composition du simulateur utilisé à l'an #1 sont :

- le module des déplacements des bélugas;
- le module de déplacement des navires marchands et de croisière;
- les modules acoustiques pour l'estimation du bruit à la source des navires et pour la perte de transmission acoustique.

Ces modules sont décrits dans les sections suivantes.

2.3.3.1 Modules de déplacement des BESL

Un premier module de référence de déplacement des bélugas (module *Béluga_référence*) a été développé à l'an #1 reproduisant statistiquement deux patrons extraits des données (Tableau 1), à savoir les paramètres de mouvement et de plongée à l'échelle de l'individu (données VHF) ainsi la distribution spatiale à l'échelle de la population (données d'inventaires aériens et données de suivis de troupeaux).

En plus du module *Béluga_référence*, un deuxième module de déplacement des bélugas a été développé qui reproduit également les domaines vitaux individuels des bélugas extraits des données de photo-identification. Ce deuxième module de déplacement est identifié comme *Béluga_domaines_vitaux*.

La principale différence entre ces deux modules est qu'avec *Béluga_référence*, tous les bélugas simulés sont libres de se déplacer dans l'intégralité de leur habitat estival, sans aucune préférence ni contrainte autre que celles imposées par la densité spatiale de la population et celles des patrons de mouvements (p. ex. vitesse, profils de plongée). Dans le cas du module *Béluga_domaines_vitaux*, les préférences individuelles envers certains secteurs extraits des données de photo-identification (Tableau 1) sont introduites pour représenter les caractéristiques réelles de fidélité au site. Ainsi, les bélugas simulés avec *Béluga_domaines_vitaux* se déplacent préférentiellement à l'intérieur des limites connues de leur domaine vital.

Afin de s'assurer de reproduire correctement les niveaux d'exposition des bélugas au bruit des navires marchands à l'échelle de l'individu dans un scénario d'augmentation du trafic dans le Saguenay, il est nécessaire de déterminer la proportion des animaux qui utilisent ce secteur. Les analyses pour y parvenir sont décrites ci-après.

2.3.3.1.1 Évaluation de la proportion des BESL fréquentant le Saguenay

Pour estimer la proportion de la population de bélugas qui utilise le Saguenay, nous utilisons la base de données de photo-identification des bélugas analysées pour la période 1989 – 2007 (Tableau 1). Cette base de données fournit des informations sur la localisation où les animaux ont été photographiés. Étant donné que l'effort d'échantillonnage n'était pas uniformément distribué dans l'habitat estival du béluga (Figure 7), c'est-à-dire qu'il y a davantage de photos prises à l'intérieur et proche du Saguenay, nous proposons un ré-échantillonnage des données observées pour parvenir à un effort uniforme à travers l'habitat estival du béluga. Cette méthode divise l'habitat en 13 régions dans chacune desquelles un nombre fixe de photos est échantillonné aléatoirement. Cette méthode s'appelle l'échantillonnage aléatoire stratifié (Wang et coll. 2012).

Pour cette procédure, nous retirons d'abord toutes les photos des individus qui ont été observés à moins de 5 occasions lors de différentes sorties de recherche en mer. Cela limite notre analyse aux individus les plus souvent rencontrés et aussi les plus reconnaissables. Avec les photos restantes et leurs positions réparties dans les 13 secteurs, nous pigeons 30 photos uniques dans chaque secteur, c'est-à-dire sans remise des photos déjà pigées. Ensuite, pour chaque secteur nous calculons la proportion des individus dans ces photos qui ont déjà été observés dans le Saguenay, c'est-à-dire, les utilisateurs du Saguenay. Nous poursuivons en calculant la moyenne pondérée sur la base de la proportion de la population de BESL présente dans chaque secteur, estimée à partir des inventaires aériens (Figure 7, panneau de gauche). Finalement, nous répétons cette procédure 1 000 fois pour générer des estimations sur l'incertitude autour de la proportion des individus de la population connue ayant été observés à au moins 5 occasions qui utilisent le Saguenay.

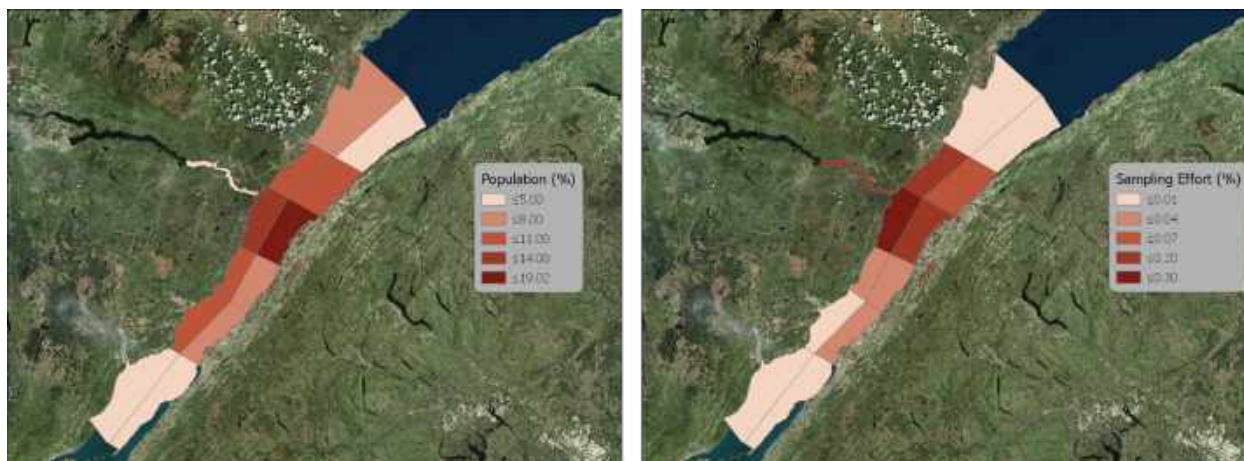


Figure 7 : Proportion de la population de bélugas d'après les inventaires aériens (gauche) et effort d'échantillonnage pour la photo-identification (droite), pour chacun des 13 secteurs

La méthode d'échantillonnage aléatoire stratifié suit les étapes suivantes :

- 1- prendre les photos des individus vus au moins 5 fois;
- 2- prendre un échantillon aléatoire de 30 photos pour chaque secteur;
- 3- pondérer chaque secteur par la proportion de la population de bélugas de ce secteur;
- 4- calculer la moyenne pondérée à travers tous les secteurs;
- 5- répéter la procédure 1 000 fois.

Comme cette méthode permet d'échantillonner tous les secteurs le même nombre de fois (30), cela retire le biais généré par un effort de collecte de données non uniforme.

Cependant, il existe un biais potentiel puisque les bélugas du Saguenay ont davantage de chance de rencontrer le seuil des 5 observations pour être retenus dans le ré-échantillonnage. Pour déterminer la magnitude du biais induit par le seuil du nombre minimum d'observations, nous proposons également une analyse de sensibilité sur l'estimation de la proportion d'utilisateurs du Saguenay en faisant varier ce seuil minimum de 1 à 5 observations.

2.3.3.1.2 Évaluation préliminaire de la mixité sociale des BESL

Pour estimer à quel niveau la population de BESL est structurée socialement, nous utilisons une analyse du réseau social (Croft, James, et Krause 2008). Nous utilisons la base de données de photo-identification pour construire le réseau social en considérant que les animaux vus dans un même troupeau étaient associés (connectés). L'accumulation de ces associations est utilisée pour construire des réseaux sociaux.

Nous conduisons une analyse de sensibilité pour déterminer le nombre d'années successives qui permet d'obtenir la plus grande modularité du réseau. La métrique de modularité d'un réseau mesure la façon dont des communautés peuvent être définies en minimisant le nombre de liens entre différentes communautés et en maximisant le nombre de liens intra-communautés, c'est-à-dire le plus grand niveau de ségrégation entre les différentes communautés de bélugas. En utilisant ce nombre d'année des données de photo-identification maximisant la modularité, les

communautés sont extraites en utilisant l'algorithme « walk-trap » (Yang, Algesheimer, et Tessone 2016). Nous comparons aussi les valeurs de modularité calculées pour différents nombres d'années avec des réseaux sociaux aléatoires. Ce test nous permet de détecter s'il existe une structure d'organisation dans les interactions sociales du BESL autre que des associations d'individus dues au hasard (Farine 2017). Cette analyse nous permet d'effectuer un premier pas vers la caractérisation quantitative de la structure des interactions sociales au sein de la population de BESL.

2.3.3.1.3 Détermination d'un modèle statistique des mouvements des BESL

Nous extrayons les patrons de mouvement observés à partir des données télémétriques VHF (Tableau 1) pour estimer un modèle statistique des mouvements des BESL à l'échelle de l'individu. Un modèle de Markov caché (MMC) avec deux états est utilisé pour estimer les paramètres *d'angle de braquage* et de *longueur de pas* qui permettent de décrire un mouvement en 2D (Hooten et coll. 2017; Leos-Barajas et Michelot 2018). Finalement, les données de profondeur sont analysées et ajoutées au modèle de simulation pour obtenir un modèle de mouvement des bélugas en 3D.

2.3.3.1.4 Module de plongée des BESL

Pour reproduire les patrons d'utilisation de la colonne d'eau par les BESL, il faut implanter un module de plongée dans le simulateur. Ce module est construit à partir des données VHF (Tableau 1). La durée entre deux plongées est estimée à partir des données VHF en utilisant une distribution gamma et en considérant une valeur-seuil de 20 mètres. Dans la simulation, la distribution gamma est utilisée pour déterminer la durée entre deux plongées. Lorsqu'un BESL n'est pas en plongée, il est à la surface. Quand un événement de plongée survient, le béluga choisit une profondeur de plongée basée sur une distribution log-normale paramétrée à partir des profondeurs de plongée extraites des données VHF. En utilisant la valeur médiane de la vitesse de plongée extraite des données VHF, le béluga simulé effectue sa plongée à la profondeur déterminée et retourne à la surface en suivant une trajectoire de forme parabolique. Une fois de retour à la surface, le béluga calcule de nouveau le temps avant une prochaine plongée et reste en surface jusqu'à ce que ce temps soit écoulé dans la simulation. La distribution des profondeurs de béluga simulés sont alors comparées aux données de profondeur des VHF pour s'assurer que les bélugas reproduisent adéquatement ce comportement de plongée.

2.3.3.1.5 Extraction des domaines vitaux des BESL

Les données de photo-identification des bélugas prises lors des campagnes d'acquisition en mer suggèrent des restrictions sur l'utilisation de l'habitat par les individus identifiés. Afin d'introduire un premier niveau de restriction des mouvements des individus de la population de BESL dans le module *Béluga_domaines_vitaux* (section 2.3.3.1), nous introduisons un premier niveau de représentation des domaines vitaux définissant les secteurs préférés par les bélugas (cf. Figure 7). Pour cela, nous utilisons un modèle bayésien de régression catégorique multi-niveaux (Jaeger 2008) afin de calculer la vraisemblance d'observer un individu dans chaque secteur du Saint-Laurent et du Saguenay. Puisque l'échantillonnage des bélugas photo-identifiés ne correspond pas à la distribution de la population, la probabilité moyenne d'observer un individu est biaisée vers les régions les plus échantillonnées. Cependant, nous pouvons utiliser les différences relatives

d'observer un béluga particulier dans chaque secteur. Cela signifie que même si un secteur particulier a été sur-échantillonné en comparaison d'autres secteurs, nous sommes en mesure d'estimer quel béluga est plus ou moins susceptible d'être observé dans ce secteur. En comparant les probabilités relatives pour tous les secteurs, nous pouvons donc estimer la dépendance entre les secteurs, fournissant une estimation des secteurs qui sont ou non utilisés conjointement par des individus. Ce modèle est alors utilisé pour générer des listes de secteurs déterminant le domaine vital de chaque béluga dans la simulation.

Au début de chaque simulation, les BESL sont distribués dans leur habitat selon des probabilités extraites de la distribution des bélugas déterminée à partir des inventaires aériens (Mosnier et coll. 2016). Chaque BESL simulé se voit alors attribuer une liste de secteurs préférés déterminée par le modèle décrit plus haut et contenant le secteur où il a été placé à l'instant initial de la simulation. Cette liste vient influencer les mouvements des bélugas lors des simulations en définissant les secteurs préférentiellement choisis par les BESL lors de leurs déplacements.

2.3.3.2 Module de déplacement des navires

Le module de déplacement des navires marchands et de croisière repose sur la fusion de données en provenance du système INNAV et des données AIS de la Garde côtière canadienne (GCC). Ces données permettent de caractériser les caractéristiques propres des navires marchands (p. ex. dimensions) ainsi que la dynamique spatiotemporelle du trafic maritime. Le module de navigation décrit dans (Chion 2011) est mis à jour dans cette nouvelle version du simulateur au moyen des données AIS de la GCC pour l'année 2017 (Tableau 1).

2.3.3.3 Module du bruit à la source des navires

Un certain nombre de modèles permettant de quantifier l'amplitude du bruit à la source des navires marchands en fonction de la fréquence d'émission sont décrits dans la littérature récente. Dans notre méta-analyse sur les études scientifiques visant à déterminer le bruit à la source des navires marchands (Chion, Lagrois, et Dupras 2019), nous présentons une description statistique de ces modèles et des facteurs intrinsèques aux navires (p. ex. longueur, largeur, vitesse) dont ils dépendent. Parmi nos constats, nous notons une disparité entre l'échantillon de modèles testés et celui développé par (Simard et coll. 2016). Les résultats de notre méta-analyse mettent en cause l'approche numérique utilisée pour rétropropager l'amplitude du bruit reçue à l'hydrophone jusqu'à la position du navire émetteur pour expliquer cette disparité. La majorité des auteurs des études proposent une approche isotrope de dilution géométrique en r^{-2} du bruit émis à la source ce qui représente une simplification ayant plusieurs limites. En effet, bien que peu exigeante d'un point de vue computationnel, cette méthode géométrique néglige notamment l'effet d'atténuation du son attribué aux réflexions à l'interface eau-air (c. à d., effets du miroir de Lloyd; voir (Gassmann, Wiggins, et Hildebrand 2017)). Ceci contribue à expliquer la dichotomie entourant le modèle de (Simard et coll. 2016), les auteurs rapportant des niveaux de bruit à la source allant jusqu'à 25 dB re 1 μ Pa à 1 m supérieurs aux autres études pour des navires de classes similaires en utilisant une méthode de rétropropagation semi-empirique basée sur un modèle numérique de propagation par nombre d'ondes. Les auteurs démontrent clairement l'efficacité de leur approche en obtenant, à partir de trois mesures provenant de trois hydrophones distincts soutenant trois angles de dépression différents, une mesure unique du bruit à la source pour chaque navire observé.

Une approche statistique d'ajustement polynomial d'ordre supérieur est utilisée afin de caractériser, dans l'espace des fréquences, le bruit à la source en fonction des paramètres statiques (c. à d., longueur, largeur et tirant d'eau) et dynamiques (c. à d., vitesse) des navires. Finalement, le modèle de Simard et coll. (2016) est spécialement conçu afin d'estimer les niveaux de bruit à la source des navires à basses fréquences ce qui correspond au régime fréquentiel optimal utilisé par le module de propagation acoustique utilisé dans la plateforme de simulation (section 2.3.3.4). Pour ces raisons, nous optons pour l'intégration de ce modèle de bruit à la source dans 3MTSim. La profondeur de la source d'émission du bruit d'un navire (hypothèse du champ lointain) sera de 70% la valeur du tirant d'eau de chaque navire (ISO 17208-2 2019).

2.3.3.4 Module de propagation du bruit sous-marin

L'algorithme RAM (Collins 1993, 1995) est basé sur la résolution de l'équation parabolique. Cet algorithme est implanté dans la plateforme 3MTSim afin de quantifier la perte de transmission du signal généré par un navire marchand (section 2.3.3.3) jusqu'à la position des mammifères marins qui, à l'intérieur du volume computationnel, ont une ligne de visée directe avec ce navire. Cet algorithme est spécialement bien adapté à la propagation des basses fréquences (Farcas, Thompson, et Merchant 2016). Au-delà de 500 Hz, la résolution de l'équation parabolique devient en effet excessivement exigeante en ressources computationnelles. Puisque 99 % de l'énergie acoustique produite par l'entremise des moteurs, pales d'hélice et bulles de cavitation des navires marchands se situe sous la barre des 500 Hz (Gassmann et coll. 2017), le choix de ce modèle est adapté afin d'estimer la perte de transmission et d'établir le bilan acoustique dans l'estuaire du Saint-Laurent pour les navires marchands.

L'algorithme RAM fonctionne en mode bidimensionnel et tient compte de la stratification en vitesse du son dans la colonne d'eau, des variations bathymétriques du sol marin et des propriétés géomorphologiques des sédiments, afin de prédire le comportement en perte de transmission le long de la ligne de visée. Les profils de vitesse du son, à une résolution spatiale verticale de 1 m seront produits à partir de mesures existantes de température et de salinité à diverses profondeurs dans l'estuaire. Un échantillon complet des propriétés bathymétriques de la zone d'intérêt est accessible pour une résolution horizontale de 100 m.

La principale limitation de l'algorithme RAM (dans cette configuration) demeure l'incapacité à produire des profils de perte de transmission corrélés à l'environnement tridimensionnel du milieu sous-marin. L'approche bidimensionnelle actuelle, quoique fiable pour des environnements semi-infinis (c'est-à-dire, profonds et larges), devient problématique pour des milieux exigus susceptibles d'initier divers effets de rebond et d'écho. Cette limitation est susceptible de sous-estimer les niveaux de bruit reçus par les BESL dans des secteurs comme le Saguenay.

Dans le but de faciliter les échanges d'informations entre 3MTSim et RAM, nous optons pour la réécriture de l'algorithme original (produit en Fortran 95) en langage JAVA et l'intégration directe sous forme d'une classe unique dans la plateforme de simulation. Afin d'accélérer les temps de calcul, des efforts ont été investis afin de paralléliser l'algorithme RAM dans l'espace des fréquences.

2.3.3.5 Validation

À l'an #1 du programme, nous conduisons plusieurs étapes de vérification et de validation sur les modules de déplacement des bélugas et sur le module de propagation acoustique.

2.3.3.5.1 *Déplacements des bélugas*

L'algorithme de déplacement est construit sur la base des patrons de mouvements réels observés à partir des données de télémétrie VHF. Nous validons que les bélugas simulés reproduisent les patrons d'utilisation de leur habitat observés dans les données réelles. Pour ce faire, nous vérifions que 1) la distribution simulée des bélugas dans l'ESL et le Saguenay reproduit la distribution observée dans les données d'inventaires aériens et les données de suivi de troupeau, et que 2) que la distribution verticale des bélugas correspond à celle extraite des données VHF. Avec ces deux étapes de validation, nous sommes en mesure d'évaluer à quel point les bélugas simulés reproduisent l'utilisation de la population de BESL de leur habitat en 3D, une caractéristique importante pour évaluer adéquatement l'exposition des bélugas au bruit de la navigation.

Au terme du programme de recherche, la validation sera conduite sur des données qui n'ont pas été utilisées pour informer la construction du modèle. La distribution spatiale de la population des BESL dans l'habitat estival fait partie des patrons auxquels les sorties du simulateur seront comparées. Des relevés terrestres de présence/absence de béluga dans des secteurs-clés (p. ex. embouchure du Saguenay, baie Sainte-Marguerite) seront également utilisés pour valider le simulateur de déplacement. Finalement, la simulation des niveaux de bruit reçus par les bélugas en présence de navires marchands sera comparée aux niveaux de bruit réels reçus par des bélugas mesurés à l'aide de DTags.

2.3.3.5.2 *Bruit sous-marin*

L'algorithme RAM est un standard en acoustique sous-marine. Les données utilisées pour alimenter RAM dans le simulateur proviennent de l'OGSL, en assurant la qualité. Par conséquent, l'étape de validation consiste premièrement à vérifier que le code informatique de RAM en JAVA produit les mêmes résultats que l'algorithme original (FORTRAN). Dans un deuxième temps, les mesures acoustiques n'étant pas disponibles à ce stade initial du programme, nous comparons qualitativement les sorties du simulateur pour des niveaux de bruit instantané à basse fréquence aux résultats publiés dans la littérature pour notre secteur d'étude (Aulanier et coll. 2016). À terme, les données DTags (niveaux de bruit reçus et position de bélugas marqués) seront utilisées pour valider quantitativement les modules acoustiques du simulateur.

2.4 Volet Scénarios

2.4.1 Scénarios d'accroissement du trafic marchand

2.4.1.1 Objectifs

Afin de d'évaluer les niveaux d'exposition des BESL au BSM des navires marchands dans le scénario de déploiement de la SMQ, il est nécessaire de caractériser le trafic maritime qui serait ajouté au trafic actuel.

2.4.1.2 Données et méthode

Pour caractériser adéquatement le trafic marchand qui serait ajouté au trafic actuel dans le cadre de la SMQ, une grille a été transmise par le Secrétariat à la Stratégie maritime aux promoteurs de quatre projets de développement industrialo-portuaires, à savoir Métaux BlackRock, Ariane Phosphate Inc., GNL Québec et Pure Fonte Ltée (Tableau 2). Cette grille vise à recueillir les données utiles pour simuler les transits dans la plateforme 3MTSim et estimer le BSM émis à la source par les navires marchands.

Tableau 2: grille transmise aux promoteurs visant à caractériser le trafic additionnel susceptible d'être ajouté au trafic actuel comme scénario de déploiement de la Stratégie maritime du Québec

Projet / Scénario	Caractéristiques des voyages*			Caractéristiques connues ou estimées des navires affectés**									Nombre de voyages additionnels prévus sur une base annuelle [min-max]	Autre information utile / commentaire
	Origine (port)	Destination (port)	Période de l'année [mois début; mois fin]	Nom	MMSI	Longueur (mètre)	Largeur (mètre)	Tirant d'eau (mètre)	Tonnage (tonne)	Vitesse maximale (nœud)	Vitesse de croisière (nœud)	Type de navire (classes INNAV)		
Projet #1														
	...													
Projet #2														
	...													
...														
	...													
Croissance économique														
	...													

* un voyage est défini ici comme chaque mouvement d'un navire entre deux ports

** les caractéristiques des navires estimées seront inscrites en *italique* dans le tableau pour les différencier des caractéristiques connues

Les données transmises par les promoteurs sur la nature des navires et des voyages anticipés étant confidentielles, elles ne seront pas présentées de façon détaillée dans ce rapport.

2.4.2 Cadre multicritère pour évaluer les mesures de réduction du bruit sous-marin

2.4.2.1 Objectifs

L'objectif de ce projet de recherche est de déterminer, selon des paramètres socio-économiques, les mesures de réduction du BSM les plus prometteuses pour maximiser une réduction du bruit émis dans l'espace du Saguenay-Saint-Laurent (SSL). Différentes actions – non exhaustives – sont envisagées pour atteindre cet objectif :

- recenser les mesures de réduction du bruit sous-marin à partir de la littérature grise scientifique;
- caractériser les mesures de réduction au regard de la faisabilité de mise œuvre dans le SSL;
- quantifier le trafic maritime et caractériser la flotte du SSL;
- estimer les gains en matière de bruit et les coûts économiques de la mise en place des mesures les plus prometteuses.

Ces mesures de réduction du BSM pourront être testées sous forme de scénarios dans la plateforme de simulation (section 2.3).

2.4.2.2 Méthodologie

La Figure 8 présente le cadre méthodologique multicritère élaboré à l'an #1 du programme de recherche pour estimer les gains de réduction du BSM et les coûts économiques associés. Le premier volet visant à recenser les mesures de réduction du BSM des navires a été complété à l'an #1 et sera présenté dans la section des résultats et en annexe de ce rapport (Annexe 3). Les quatre volets de ce cadre méthodologique sont détaillés dans les prochaines sous-sections.

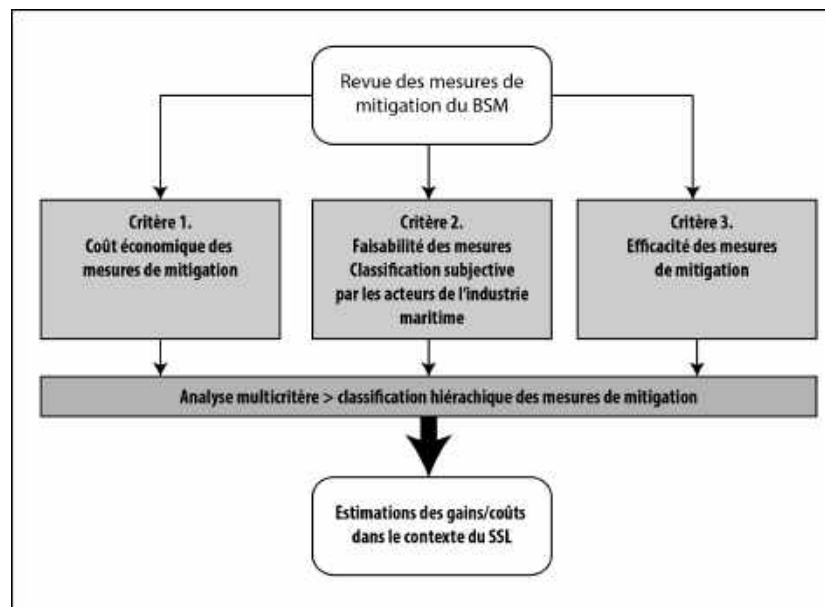


Figure 8 : Schéma du cadre méthodologique multicritère.

2.4.2.3 Étapes du projet de recherche

2.4.2.3.1 Revue des mesures de réduction du bruit sous-marin.

La revue des mesures est réalisée à partir d'une analyse qualitative de la littérature scientifique et de la littérature grise. Plusieurs études majeures relatives aux mesures de réduction du BSM ont été produites ces dernières années (p. ex. (Hemmera Envirochem Inc. 2016; Renilson Marine Consulting 2009; Vard Marine Inc. 2019)). L'objectif sera, par la synthèse des précédentes études, de recenser l'ensemble des mesures selon une classification qui distingue les mesures technologiques qui relèvent principalement des opérateurs maritimes à l'échelle des navires (p. ex. taille et design de l'hélice, entretien de la coque) et les mesures principalement sous le contrôle des autorités maritimes qui impliquent une réorganisation spatio-temporelle du trafic maritime (p. ex. limitation de vitesse, réorganisation saisonnière, zonage, convois, etc.) (Figure 9).

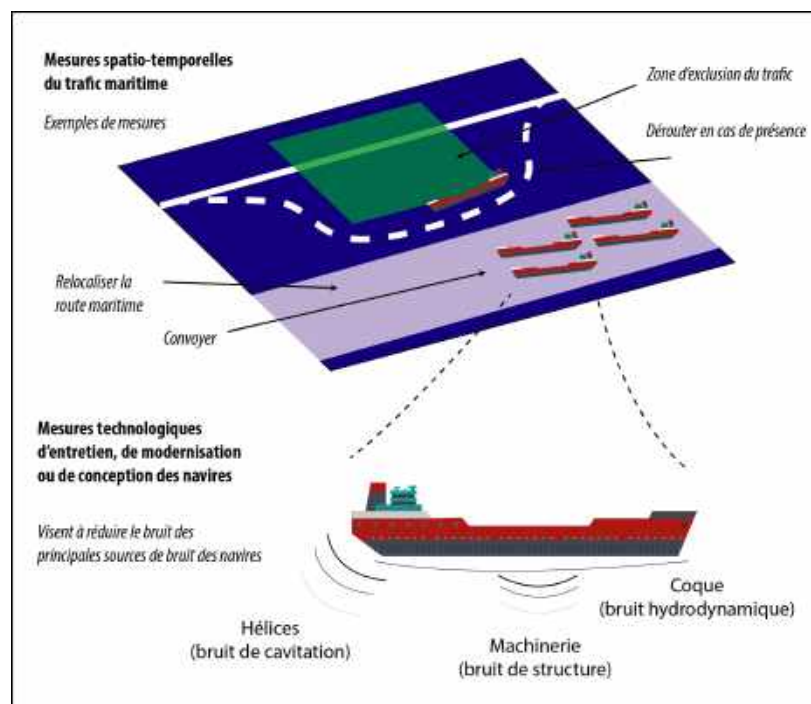


Figure 9 : Classification des mesures de réduction du bruit sous-marin

Il sera également fait mention des mesures qui incombent aux autres acteurs de la chaîne logistique du transport maritime, qui peuvent soit contribuer directement à la réduction du bruit sous-marin soit indirectement faciliter l'adoption de mesures pour l'industrie du transport maritime.

Les résultats de cette recension permettront notamment d'alimenter le protocole d'étude soumis aux acteurs de l'industrie maritime.

2.4.2.3.2 Faisabilité de la mise en application des mesures de réduction du bruit sous-marin.

En complément des caractéristiques lacunaires des mesures de réduction du BSM mobilisées dans la littérature (p. ex. efficacité, coût, co-bénéfices, etc.), cette deuxième étape a pour objectif de

caractériser les mesures précédemment recensées au regard de la connaissance et de la perception qu'ont les acteurs de l'industrie maritime de ces mesures.

La méthode vise à déterminer un état de référence relatif à la prise en compte de la problématique du bruit sous-marin par l'industrie maritime. Cet état de référence sera alimenté par des entretiens semi-directifs conduits auprès des différents acteurs de la chaîne logistique du transport maritime. Les thématiques abordées lors des entretiens seront : (i) la connaissance de la problématique générale du bruit sous-marin pour les écosystèmes sous-marins et notamment les mammifères marins, (ii) la connaissance des sources principales d'origine anthropique du bruit sous-marin, (iii) le niveau de conscience de la responsabilité du trafic maritime dans la production du bruit sous-marin, (iv) la connaissance des mesures de réduction du bruit sous-marin, (v) le degré de prise en compte de cette problématique dans les prospectives environnementales et économiques des compagnies, (vi) l'identification des différents acteurs de la chaîne logistique ayant la capacité de contribuer directement ou indirectement à la réduction du BSM. La production de cet état de référence canadien servira notamment à déterminer où et par qui les efforts sont à déployer pour une meilleure prise en compte de cette problématique. Comme tout état de référence, son objectif sera aussi de mesurer des évolutions futures. Enfin, il devra également mettre en lumière les points de blocage et les leviers d'action pour faire avancer la prise en compte de la problématique du bruit sous-marin. Les résultats seront produits à partir d'une analyse qualitative des entretiens et la définition d'une typologie des acteurs.

2.4.2.3.3 Évaluation économique des mesures de réduction du bruit sous-marin

Le critère économique sera évalué dans le contexte du SSL. Cette approche mobilisera les données économiques rapportées par l'industrie maritime et celles compilées par le Système d'information maritime (SIM) (Tableau 1). Le SIM a pour objectif principal d'animer un système de collecte, de traitement et de diffusion de l'information relative aux navires, au trafic et aux marchandises qui transitent dans le SSL.

La méthodologie d'évaluation des mesures de réduction sera élaborée de concert avec les études produites et commandées par Transports Canada dans le cadre de la mission d'évaluation des coûts/avantages des mesures de réduction du BSM.

2.4.2.3.4 Efficacité des mesures

L'efficacité des mesures de réduction du BSM sera évaluée de plusieurs manières complémentaires. Dans un premier temps, l'efficacité sera évaluée à partir des résultats rapportés et compilés par la littérature (p. ex. (Vard Marine Inc. 2019)). Il est ensuite envisagé d'intégrer les résultats des études menées dans le SSL pour préciser l'efficacité de certaines mesures (p. ex. réduction de la vitesse) testées empiriquement.

2.4.2.3.5 Quantification du trafic maritime et caractérisation de la flotte dans l'habitat du BESL

Cet objectif vise à quantifier le trafic maritime du Saguenay et du Saint-Laurent, principalement par le nombre de transits et le nombre de navires. Il s'agira de (i) préciser les types de navires dont l'information est contenue dans les données statiques AIS (*Automatic Identification System*) et (ii) les caractéristiques techniques des navires. Les caractéristiques techniques peuvent être obtenues à partir du numéro d'identification des navires MMSI (*Maritime Mobile Service Identity*). Deux

bases de données ont été identifiées pour obtenir les caractéristiques techniques des navires : la base de données nationale canadienne d'information maritime/ISMM et la base de données du SIM. Cette dernière compile un grand nombre de caractéristiques des navires (Tableau 3).

Tableau 3 : Champs contenus dans la base de données du système d'information maritime

Nom du champ	Description
VesselId	Numéro de navire dans la BD SIM
ConfigId	Numéro de configuration du navire dans la Base de données SIM
MmsiNumber	MMSI
OffiNumber	Numéro officiel assigné aux navires marchands par le pays d'enregistrement
LloydRegister	Numéro de navire dans la base de données Lloyd's
CallSign	Lettres d'appel
CurrentName	Nom actuel du navire
PreviousName	Nom précédent du navire (si applicable)
YearOfConstruction	Année de construction
PortOfRegistration	Port d'enregistrement
MouldedDepth	Creux. Distance entre le point le plus bas du pont principal et le point le plus bas de la quille d'un navire
Draft	Tirant d'eau maximum
Length	Longueur
Width	Largeur de la quille
Height	Hauteur
NetTonnage	Jauge nette
GrossTonnage	Jauge brute
DeadweightTonnage	Port en lourd
CrewCapacity	Capacité d'équipage
PassengerCapacity	Capacité passagers
MaximumPower	Puissance maximale
MaximumSpeed	Vitesse maximale
Iso3166Alpha2	Pays d'enregistrement. Standard ISO à 2 caractères (ISO 3166-2).
Country	Pays d'enregistrement.
Pays	Pavillon
TypeEnglish	Type de navire (en anglais)
TypeFrancais	Type de navire (en français)
GeneralTypeEnglish	Type de navire généralisé (en anglais)
TypeGeneralFrancais	Type de navire généralisé (en français)
VersionDateTime	Dernière mise à jour

2.4.2.3.6 Cadre de l'analyse multicritère

Trois grands critères (économique, social, efficacité) sont proposés dans le cadre de l'analyse multicritère. Ces critères constitueront la hiérarchie principale, qui pourra être précisée par des sous-critères. L'analyse multicritère prévoit un système de pondération des critères et sous-critères pour déterminer des notes synthétiques. D'autres critères pourront également être intégrés de manière itérative au cadre d'étude. Les résultats de cette analyse constitueront des données permettant d'éclairer la décision d'application des mesures de réduction du BSM.

2.5 Volet Analyses

2.5.1 Objectif

Comme précisé dans les sections précédentes, le simulateur développé dans ce programme de recherche permet la prise en compte de caractéristiques des bélugas (et autres espèces) telles que la fidélité au site des individus, les caractéristiques de leurs déplacements en 3D, l'appartenance à une communauté ou encore les changements de comportements selon les modifications de leur environnement. Ces caractéristiques individuelles et collectives des bélugas sont toutes susceptibles d'avoir un effet sur l'estimation du niveau d'exposition des individus au bruit de la navigation.

L'objectif de ce volet à l'an #1 est d'évaluer l'impact de la prise en compte des domaines vitaux des bélugas sur l'estimation de l'exposition cumulative des animaux au bruit des navires marchands, en utilisant la plateforme de simulation 3MTSim.

Spécifiquement, les simulations produites à l'an #1 du programme de recherche visent à répondre aux questions suivantes :

- **Q1 : l'ajout de nouveaux transits de navires marchands dans le Saguenay et l'estuaire maritime, dans le scénario du déploiement de la Stratégie maritime du Québec, augmente-il de façon statistiquement significative l'exposition des bélugas au bruit sous-marin ?**
- **Q2 : la prise en compte des domaines vitaux des bélugas reproduisant les caractéristiques de fidélité au site des animaux à l'échelle de l'individu a-t-elle un impact statistiquement significatif sur l'estimation de leur exposition cumulative au bruit des navires marchands ?**

Ces simulations permettront de préciser la valeur-ajoutée de l'approche de simulation proposée pour estimer l'exposition cumulative des bélugas à l'échelle de l'individu, en comparaison des approches traditionnelles à l'échelle de l'habitat.

2.5.2 Données et méthodes

Le simulateur 3MTSim mis à jour (section 2.3) est utilisé pour répondre aux deux questions présentées dans la section précédente.

En raison de l'importante demande en ressources computationnelles nécessaires pour conduire les simulations visant à répondre à ces deux questions, le code informatique du simulateur est parallélisé et les simulations sont conduites sur des supercalculateurs externes. Spécifiquement, les simulations sont effectuées sur un supercalculateur d'Amazon nommé Elastic Cloud Computing (EC2). Ce service externe permet d'accéder à de multiples ordinateurs virtuels de haute performance, sur demande. Les simulations sont réparties sur quatre instances de c5.metal, chacun ayant 96 cœurs logiques (processeurs Intel Xeon (Cascade Lake) avec une fréquence turbo de 3.6 GHz) et 192 Gb de ram.

2.5.2.1 Paramètres d'entrée du simulateur

Les principaux paramètres d'entrée du simulateur 3MTSim utilisés pour la conduite des simulations à l'an #1 sont présentés dans le Tableau 4.

Tableau 4: Principaux paramètres d'entrée du simulateur

Paramètre	Description	Valeur (unité)	Commentaires et références
tick	Pas de temps du simulateur	1 (minute)	Le simulateur étant à temps discret, chaque pas de temps appelé « tick » correspond à 1 minute réel.
S	Salinité de l'eau	Variable par secteur et selon la profondeur	Observatoire global du Saint-Laurent
T	Température de l'eau	Variable par secteur et selon la profondeur	Observatoire global du Saint-Laurent
cw	Vitesse du son dans l'eau	Dépend des valeurs de T et S	Ajustements polynomiaux par secteur en fonction de la profondeur
cb	Vitesse du son dans les sédiments du fond marin	Variable par secteur	(Jensen et coll. 2011; Loring et Nota 1973)
rhob	Densité des sédiments du fond marin	Variable par secteur	(Jensen et coll. 2011; Loring et Nota 1973)
attn	Coefficient d'atténuation du son dans les sédiments du fond marin	Variable par secteur	(Jensen et coll. 2011; Loring et Nota 1973)
zb	Hauteur de la colonne d'eau	[0-350] (m)	Propriétés bathymétriques
zs	Profondeur de la source	Variable (m)	Correspond à 70% de la valeur du tirant d'eau
zr	Profondeur du récepteur	Variable (m)	Correspond à profondeur du béluga
rmax	Distance source-récepteur	[100-40000] (m)	Distance 2D entre le navire et le béluga. Limite inférieure fixée par la résolution spatiale des données de bathymétrie. Limite supérieure déterminée statistiquement au-delà de laquelle le bruit reçu à la position de l'animal est inférieur au bruit naturel.
dr	Résolution spatiale horizontale de l'algorithme de propagation	[100] (m)	Fixée par la résolution spatiale de la carte de bathymétrie.
dz	Résolution spatiale verticale de l'algorithme de propagation	[1] (m)	Fixée par la résolution spatiale des données en température et salinité extraites de l'Observatoire global du Saint-Laurent (OGSL)

f	Fréquence	[11-1122] (Hz)	Étendue spectrale permettant de couvrir chaque bande en 1/3 d'octave entre 12.5 et 1000 Hz.
$\alpha(f)$	Coefficient d'absorption induite par les molécules d'eau	Donné par équation (dB re 1 μ Pa (1000 m) ⁻¹)	(Francois et Garrison 1982b, 1982a)
Bruit naturel	Bruit intégré (11-1122 Hz) [dB re 1 μ Pa]	90 (dB re 1 μ Pa)	Plus bas niveau de bruit mesuré, sans activités humaine (Carr et coll. 2006)
v	Vitesse des navires	[5-30] (noeuds)	Données AIS
l	Longueur des navires	[20-350] (m)	Données INNAV
b	Largeur des navires	[10-50] (m)	Données INNAV
d	Tirant d'eau des navires	[3-16] (m)	Données INNAV
Durée de la Simulation	Nombre de jours simulés pour chaque réplication	7 (jours)	Le premier jour de la simulation n'est pas considéré dans les analyses (période transitoire)
Nombre de bélugas	Le nombre de bélugas générés dans chaque réplication	1000	Estimation de la taille de la population
Distribution spatiale des bélugas	Densité de la population	Densité (beluga/m2)	Survols aériens (MPO) + données de suivis de troupeaux (GREMM)
Angle de braquage	Distribution (k) VonMises décrivant la direction de déplacement d'un béluga pendant la simulation	7.06	Valeur estimée avec les données VHF
Longueur de pas	Distribution Gamma {forme, échelle} décrivant la distance de déplacement d'un beluga dans la simulation	{1.62, 0.32}	Valeurs estimées avec les données VHF
Durée avant la prochaine plongée	Distribution Gamma {forme, échelle} décrivant la durée entre les plongées	{0.68, 0.006437}	Valeurs estimées avec les données VHF
Profondeur de plongée	Distribution Lognormal {moyenne, écart-type} décrivant la profondeur des plongées	{1.95, 1.23}	Valeurs estimées avec les données VHF
Période	Période de la simulation	25/07 – 01/08	Période de navigation achalandée dans l'estuaire du Saint-Laurent

2.5.2.2 Variables de sortie du simulateur

La gamme d'acuité auditive du béluga couvre un large spectre allant de 40 Hz à 160 kHz (Erbe et coll. 2016). Afin de définir les indicateurs acoustiques pertinents pour le BESL à considérer en sortie du simulateur, une étude de synthèse a été réalisée par Ocean Wise dans le cadre de ce

programme de recherche. Cette synthèse identifie des métriques acoustiques pertinentes pour étudier les impacts du BSM anthropique sur le BESL (Annexe 4). Quatre métriques reliant le BSM à des impacts sur le béluga ont été identifiées et sont synthétisées dans le Tableau 5.

Tableau 5 : Métriques acoustiques pour l'évaluation des impacts du bruit sous-marin de la navigation sur les bélugas du Saint-Laurent (Annexe 4)

Métrique	Description	Impacts
1— Augmentation relative du bruit large-bande mesurée par rapport à un niveau de référence (=conditions naturelles)	Niveau de pression acoustique (SPL) non pondéré sur la plage de fréquences [0.01 – 150] kHz Proportion du temps où le SPL est en présence de bruit anthropique n'excède pas le 95 ^e percentile du SPL dans des conditions acoustiques naturelles.	- Dérangement – changement comportemental - Stress physiologique - Perte d'audition (seuils pour les « mid-frequencies », extraits de (National Marine Fisheries Service 2018)) :
2— Bruit large-bande mesuré de façon absolue	Niveau de pression acoustique (SPL) non pondéré sur la plage de fréquences [0.01 – 150] kHz Le seuil critique est 120 dB re 1 µPa	- Permanente : $SEL_{MF,24h} = 198$ dB - Temporaire : $SEL_{MF,24h} = 178$ dB
3— Réduction de l'espace de communication	Basé sur la densité spectrale de puissance du bruit (PSD)	- Masquage des signaux de communication ayant des impacts sur la cohésion et la coordination du groupe. - Interférence avec le comportement social. - Particulièrement critique dans le cas des paires mère veau dont la cohésion repose sur la communication acoustique à de faibles amplitudes.
4— Réduction de l'espace de détection pour l'alimentation	Basé sur la densité spectrale de puissance du bruit (PSD)	Masquage des signaux d'écholocalisation.

Étant donnée la plage de fréquences considérées dans le simulateur à l'an #1 (11 Hz à 1122 Hz), nous avons retenu deux métriques générales comme indicateurs pour comparer les résultats des premiers scénarios testés pour répondre aux deux questions (section 2.5.1). Ces deux métriques reliées au bruit reçu intégré instantané et à l'exposition cumulative sont associées aux risques de dérangement, de changement comportemental, de stress physiologique et de perte d'audition des BESL (métriques 1 et 2 dans le Tableau 5). Elles sont définies comme suit :

- Niveaux de bruit reçu instantané (RL) : Obtenus via la soustraction, fréquence à fréquence, entre les niveaux de bruit à la source et la perte de transmission attribuable au médium

entre le navire et le béluga. Les contributions individuelles de chaque navire, auquel le béluga est exposé, sont sommées dans l'espace des pressions acoustiques. Une fois le pas de temps écoulé, la sommation dans l'espace des fréquences des pressions acoustiques permet d'obtenir le bruit intégré entre 11 et 1122 Hz auquel est instantanément exposé le béluga. Cette métrique est appelée niveaux de bruit reçu instantané dans ce travail.

- Exposition cumulative (SEL) : En supposant que les niveaux de bruit reçu instantané, prédits par le simulateur, restent constants à l'intérieur d'un pas de temps d'1 minute (hypothèse simplificatrice), l'intégration dans le temps des pressions acoustiques sur 60 secondes permet ainsi d'obtenir le bruit cumulatif subi par un animal donné à l'intérieur de ce pas de temps. En sommant pour chaque mesure de bruit reçu instantané comptabilisée pour un même béluga pour la durée d'une simulation (en moyenne, entre 5 et 6 mesures par béluga par 24 heures), nous obtenons une mesure de l'exposition cumulative d'environ 30 minutes réparties dans un intervalle de 7 jours. Cette métrique donne une première indication de l'exposition cumulative qu'il sera possible de calculer plus finement en ayant accès à une plus grande puissance de calcul.

2.5.2.3 Scénarios testés

Au total, quatre (4) scénarios distincts sont testés pour répondre aux deux questions de recherche (section 2.5.1). Ces scénarios sont décrits dans le Tableau 6.

Tableau 6: Description des quatre (4) scénarios tests avec le simulateur à l'an #1

Scénario	Module béluga	Module trafic maritime	Description
#1	<i>Béluga_référence</i>	<i>2017</i>	Les bélugas se déplacent en reproduisant la densité de la population et les patrons de mouvement en 3D, sans fidélité au site des individus. Ils sont exposés au bruit du trafic marchand de 2017.
#2	<i>Béluga_référence</i>	<i>2017 + SMQ</i>	Les bélugas se déplacent en reproduisant la densité de la population et les patrons de mouvement en 3D, sans fidélité au site des individus. Ils sont exposés au bruit du trafic marchand de 2017 auquel s'ajoute le trafic marchand maximal pour les quatre projets de la SMQ.
#3	<i>Béluga_domaines_vitaux</i>	<i>2017</i>	Les bélugas se déplacent en reproduisant la densité de la population et les patrons de mouvement en 3D, chaque animal étant limité dans ses mouvements par son domaine vital extrait des données de photo-identification. Ils sont exposés au bruit du trafic marchand de 2017.
#4	<i>Béluga_domaines_vitaux</i>	<i>2017 + SMQ</i>	Les bélugas se déplacent en reproduisant la densité de la population et les patrons de mouvement en 3D, chaque animal étant limité dans ses mouvements par son domaine vital extrait des données de photo-identification. Ils sont exposés au bruit du trafic marchand de 2017 auquel s'ajoute le trafic marchand maximal pour les quatre projets de la SMQ.

2.5.2.4 Plan de simulation

Afin de tenir compte des processus stochastiques du simulateur et pour pallier l'importante demande de ressources computationnelles, un plan de simulation et une stratégie d'échantillonnage ont été développés pour répondre aux premières questions posées aux simulateur à l'an #1. Ce plan est présenté dans le Tableau 7.

Tableau 7 : Plan de simulation pour répondre aux questions de l'an #1

Scénario	Nombre de réplifications	Fréquence d'échantillonnage	Proportion des bélugas échantillonnés
#1	10	1 fois / heure	20%
#2			
#3			
#4			

3 Résultats à l'an #1

3.1 Volet Simulateur 3MTSim

3.1.1 Module Béluga

3.1.1.1 Fréquentation du Saguenay par les bélugas

La procédure de ré-échantillonnage conduit à une estimation de la proportion de bélugas utilisant le Saguenay de 53 % (écart-type = 3 %). Au total, 476 bélugas identifiés dans la base de données de photographies ont été observés au moins 5 fois parmi lesquels 276 ont été observés dans le Saguenay. Ainsi, sans utiliser cette méthode de ré-échantillonnage pour retirer le biais d'effort de collecte de données, la proportion de bélugas qui fréquentent le Saguenay aurait été de 58 %.

Pour déterminer la magnitude du biais induit par le seuil du nombre minimum d'observations, nous avons conduit une analyse de sensibilité pour estimer la proportion d'utilisateurs du Saguenay en faisant varier ce seuil minimum de 1 à 5 observations. Les résultats de cette analyse de sensibilité indiquent que le biais induit par ce seuil existe, mais qu'il est inférieur à 10 % (Figure 10).

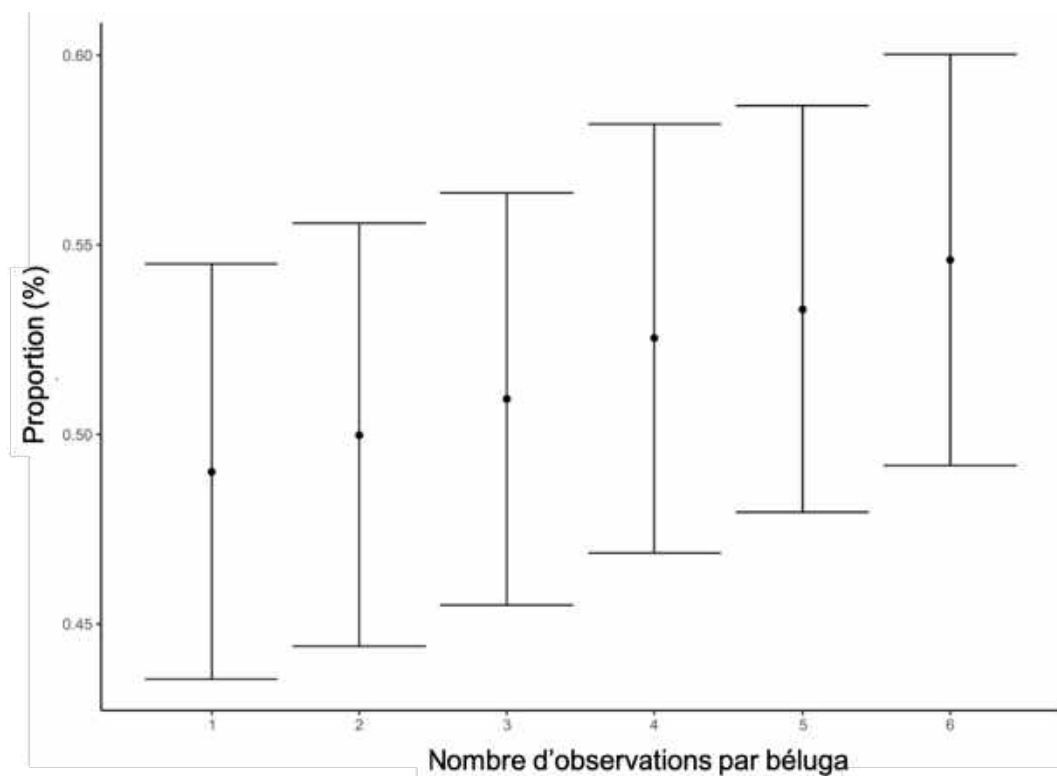


Figure 10 : Estimation de la proportion des bélugas observés dans le Saguenay au moins une fois en fonction du nombre minimum de fois où les animaux ont été observés.

La même analyse de ré-échantillonnage sur les données de photo-identification de femelles bélugas adultes uniquement révèle que 67% (écart-type = 3%) de femelles de la population de BESL fréquentent le Saguenay, sans distinction de fréquence d'utilisation.

En vue de mieux comprendre l'impact potentiel de l'augmentation du trafic maritime dans le Saguenay, on cherche à bien évaluer l'utilisation de Saguenay par les bélugas. Les nombreux relevés aériens ont déjà permis d'estimer qu'en moyenne entre 2 et 5% des effectifs de la population se trouvent dans le Saguenay (Michaud 2014). S'il y a environ 1000 dans la population ceci veut dire qu'on est susceptible de rencontrer entre 50 et 70 bélugas dans le Saguenay régulièrement.

On sait depuis longtemps que plusieurs individus reconnaissables dont certains connus depuis la fin des années 1970, utilisent régulièrement le Saguenay. Si c'était toujours les mêmes bélugas qui remontaient le Saguenay on pourrait croire que seulement 50 ou 70 bélugas utilisent cette portion de l'habitat essentiel. Cette première analyse des captures recaptures de tous les individus photo-identifiés entre 1989 et 2007 suggère toutefois qu'environ la moitié des bélugas du Saint-Laurent et environ deux tiers de femelles utilisent le Saguenay, au moins occasionnellement.

Les analyses en cours tentent maintenant de déterminer quelle proportion de ces individus sont des utilisateurs réguliers du Saguenay.

3.1.1.2 Mixité sociale dans la population de bélugas

Pour estimer à quel degré la population de béluga est structurée socialement, nous avons utilisé une analyse du réseau social. Nous avons utilisé la base de données de photo-identification pour construire le réseau social en considérant que les animaux vus dans un même troupeau étaient associés (connectés). L'accumulation de ces associations a été utilisée pour construire des réseaux sociaux. Nous avons conduit une analyse de sensibilité qui suggère que c'est en prenant 5 années consécutives de photographies, excluant les individus ayant été vus moins de 5 fois, qu'on obtient la plus grande modularité (Figure 11). La métrique de modularité d'un réseau mesure la façon dont des communautés peuvent être définies en réduisant au maximum le nombre de liens entre différentes communautés et en maximisant le nombre de liens intra-communautés, c'est-à-dire le plus grand niveau de ségrégation entre les différentes communautés de bélugas (Figure 12). En utilisant les 5 années les plus récentes des données de photo-identification, les communautés ont été extraites en utilisant l'algorithme « walk-trap » (Figure 12a). Pour visualiser où ces communautés de bélugas sont trouvées dans leur habitat estival, nous avons utilisé les points GPS de tous les animaux observés (Figure 12 b). Malgré une ségrégation spatiale, on remarque un degré de chevauchement entre les communautés identifiées notamment dans le Saguenay, ce qui appuie les résultats sur la fréquentation de ce secteur par une grande proportion des animaux (section 3.1.1.1).

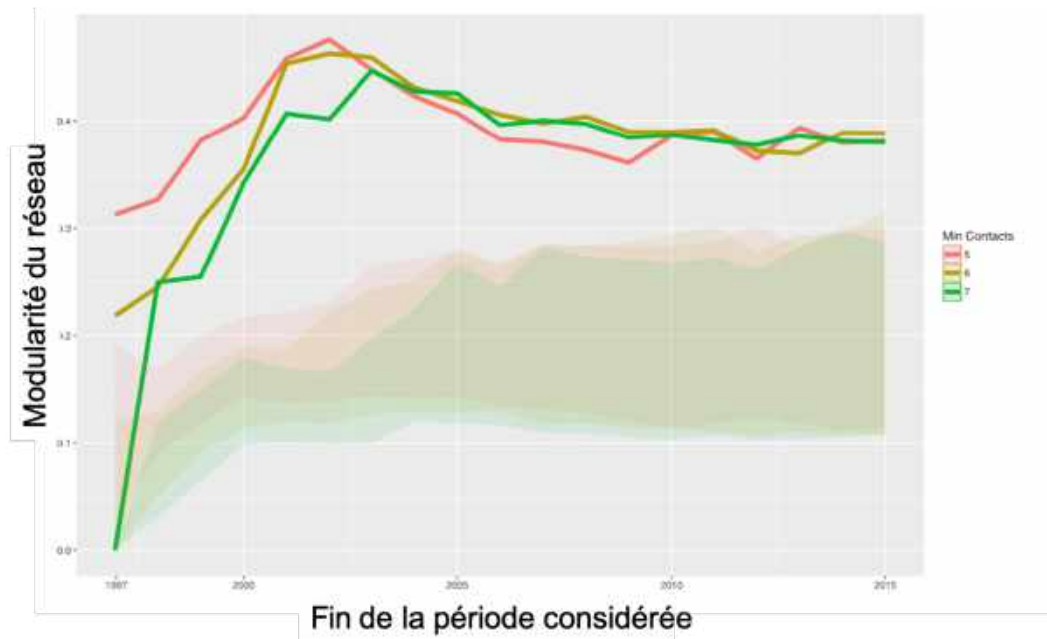


Figure 11 : Sensibilité de la mesure de modularité. Les lignes correspondent au nombre minimum d'observations d'individus. L'axe des y est la mesure de modularité pour différentes périodes d'agrégation de données de photo-identification. Les régions en semi-transparence indiquent l'intervalle de confiance de 95 % des valeurs de modularité pour une population sans aucune structure sociale (=réseau aléatoire), un modèle nul calculé en utilisant des permutations dans le réseau.

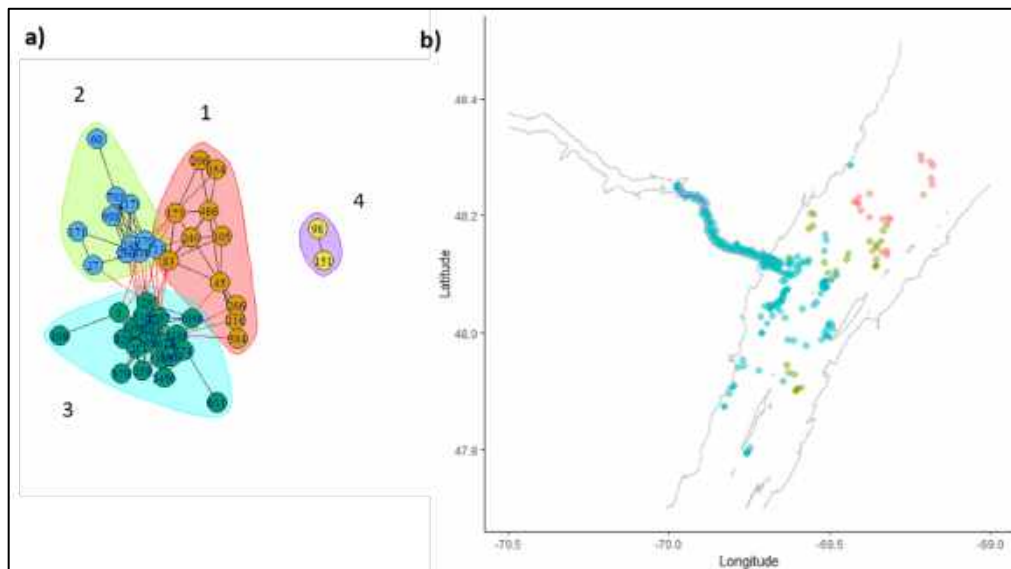


Figure 12 : Structure sociale et spatiale de la population de béluga : a) identification des communautés distinctes dérivées de la base de données de photo-identification et b) localisation spatiale des observations des membres de chacune des communautés.

Nos résultats préliminaires suggèrent qu'il existe une structure sociale significative caractérisant cette population et que les communautés existantes présentent une forme de ségrégation spatiale dans leur habitat estival. Ces structures sociales et spatiales à l'intérieur de cette population ont des implications importantes pour l'évaluation des niveaux d'exposition des individus au BSM de la navigation. Nous planifions conduire des analyses de réseaux sociaux dynamiques pour mieux définir ces structures sociales et spatiales et l'inclure dans notre simulateur par l'intermédiaire d'un biais social dans notre modèle du mouvement des bélugas.

3.1.1.3 Modèle statistique de mouvement des BESL

Nous avons extrait les patrons de mouvements observés à partir des données télémétriques VHF (Tableau 1) pour estimer un modèle statistique du mouvement des bélugas à l'échelle de l'individu. Un modèle de Markov caché (MMC) avec deux états a été utilisé pour estimer les paramètres *d'angle de braquage* et de *longueur de pas*. Qui permet de décrire un mouvement en 2D (Leos-Barajas et Michelot 2018).

Tableau 8 : Paramètres estimés par le MMC à deux états appliqués sur les données télémétriques de suivi individuel des bélugas. Les deux états sont identifiés par [1] et [2].

Type	Paramètre	moyenne	Écart-type	IC - limite inférieure 95%	IC – limite supérieure 95%
Longueur de pas	mu[1]	0.66	0.4	0.04	1.49
	mu[2]	0.78	0.35	0.25	1.52
	sigma[1]	0.59	0.04	0.53	0.67
	sigma[2]	0.55	0.03	0.49	0.62
	time_s	0.01	0.26	-0.53	0.4
Angle de braquage	loc[1]	0.29	0.12	0.06	0.52
	loc[2]	0.02	0.02	-0.02	0.05
	kappa[1]	0.52	0.07	0.38	0.65
	kappa[2]	7.48	0.76	6.16	9.12
	time_k	1.21	0.37	0.69	2.09

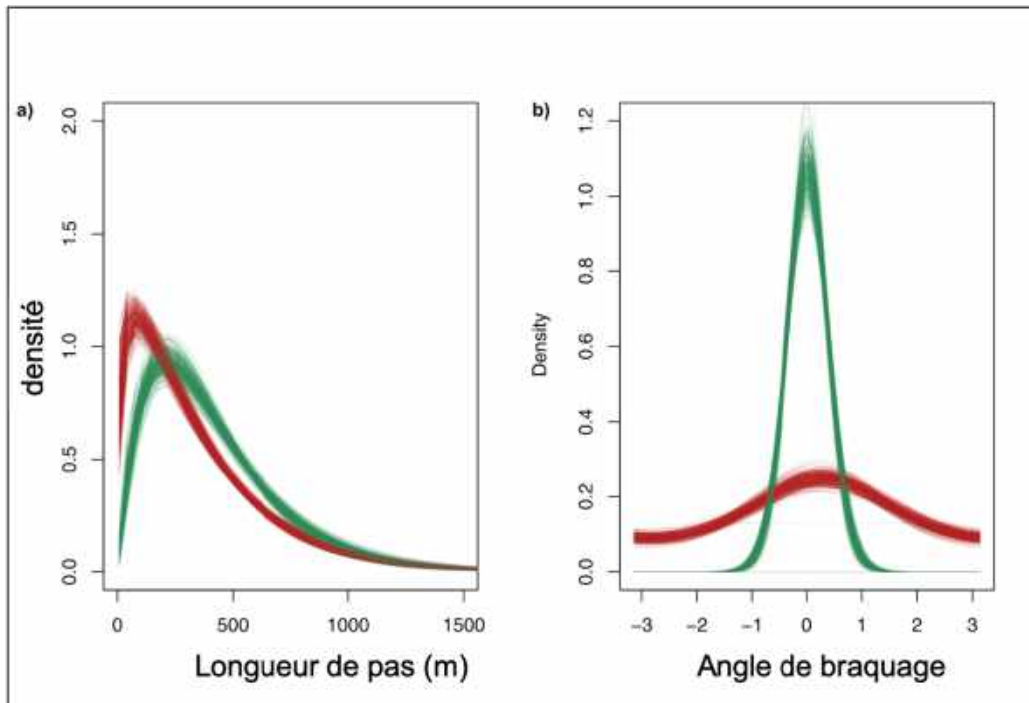


Figure 13 : Visualisation des deux états estimés dans le MMC : la distribution a) des longueurs de pas et b) des angles de braquage. Les courbes en vert indiquent l'état avec une grande persistance directionnelle et de longs déplacements.

Les résultats du MMC suggèrent une grande différence entre deux états sur la base de la persistance directionnelle, avec un état montrant une importante persistance directionnelle dans les déplacements des BESL et l'autre faible (Tableau 8 et Figure 13). L'état ayant la plus grande persistance directionnelle a également la longueur de pas la plus importante. Ceci suggère que les deux classes de mouvements identifiés sont : un état de déplacements unidirectionnels sur de longues distances et un état de nage multidirectionnelle dans un espace plus restreint.

Ce modèle de mouvement à deux états a été incorporé dans les deux modules *Béluga_référence* et *Béluga_domaines_vitaux* et la distribution spatiale simulée des bélugas a été comparée aux distributions extraites des inventaires aériens (Figure 7). Finalement, les données de profondeur ont été utilisées pour paramétrer un module statistique de plongée des BESL à deux paramètres (c.-à-d. durée entre deux plongées et profondeur de plongée) pour obtenir un modèle de mouvement des bélugas en 3D.

3.1.1.4 Validation

3.1.1.4.1 Module *Béluga_référence*

Pour chaque pas de temps dans le simulateur (=1 minute), chaque béluga choisit une longueur de déplacement horizontal et un angle de braquage selon deux distributions de Von Mises et Gamma respectivement. Les paramètres utilisés pour ces distributions ont été estimés à partir des suivis focaux de bélugas. Afin de reproduire la couche de base de la densité spatiale des BESL, nous altérons le mouvement sur la base de la connaissance de la distribution spatiale de la population

extraite des données d'inventaires aériens. Une préférence vers les aires d'utilisation intensive est obtenue par l'introduction d'un biais sur les angles de braquages vers celles-ci ainsi qu'un biais vers des longueurs de déplacements plus courtes à proximité de ces aires intensives.

Après 7 jours de simulation, en biaisant ainsi les angles de braquages et les longueurs de déplacement, le module *Béluga_référence* permet de reproduire la distribution observée des bélugas dans la simulation avec un coefficient de corrélation de 0.83 (IC : 0.78-0.87). Le module *Béluga_référence* permet de reproduire le patron de 1.6% (IC : 1.0 - 2.4%) de la population de BESL observée en tout temps dans le Saguenay, les données réelles d'inventaires aériens indiquant une proportion de BESL dans le Saguenay de 5%. Finalement, après 7 jours de simulation, 22% (IC : 21-23%) des BESL avaient visité le Saguenay au moins une fois, nos analyses précédentes ayant permis d'estimer que 53% des BESL étaient des utilisateurs du Saguenay (section 3.1.1.1). La distribution des profondeurs de plongée simulées est également en adéquation avec la distribution des plongées réelles extraites des données VHF (Figure 14).

Ces résultats indiquent que le module *Béluga_référence* permet de reproduire les patrons, même s'il reste un potentiel d'amélioration.

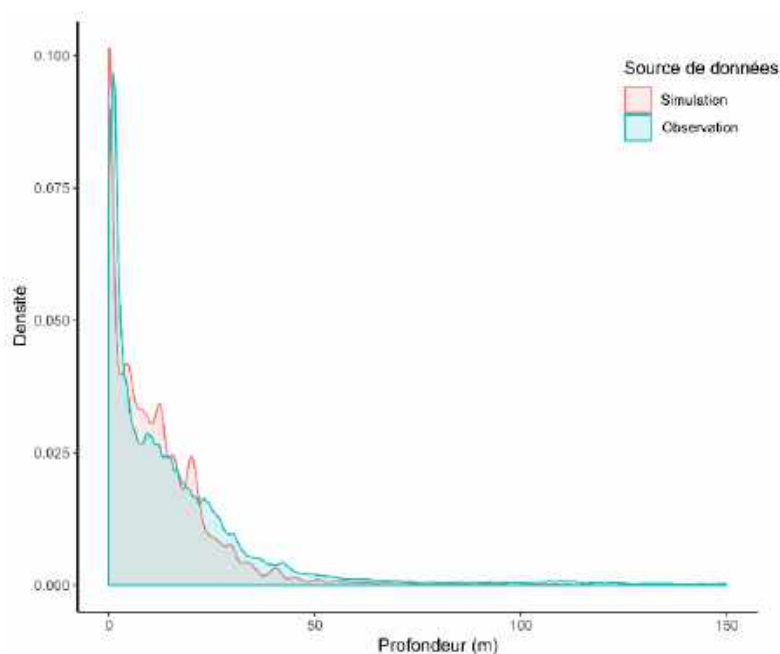


Figure 14: Distribution des profondeurs de plongée pour les BESL simulées (rouge) et observées dans les données VHF (verte)

3.1.1.4.2 Module *Béluga_domaines_vitaux*

Le module *Béluga_référence* a été bonifié en ajoutant les domaines vitaux des BESL au mouvement. Pour chaque béluga, une liste des secteurs est associée définissant les limites de son domaine vital. Cette liste a été générée en utilisant les données de photo-identification qui ont fourni les informations sur les secteurs où chaque béluga a et n'a pas été vu. Un modèle de régression catégorique de Bayes a été utilisé pour mesurer la dépendance entre les secteurs (p. ex.

si un béluga a été vu dans le secteur 2, il y a une forte probabilité qu'il puisse être vu dans le secteur adjacent 3, et une plus petite probabilité de le voir dans le secteur distant 4). En utilisant ce modèle catégorique, une liste a été générée pour chaque individu en utilisant le secteur où i a été initialisé. Quand les individus se déplacent dans un secteur qui n'est pas dans sa liste de secteurs de son domaine vital, son mouvement subséquent est biaisé vers les secteurs de cette liste.

Après 7 jours de simulation, en biaisant ainsi les angles de braquages et les longueurs de déplacement, le module *Béluga_référence* permet de reproduire la distribution observée des bélugas dans la simulation avec un coefficient de corrélation de 0.81 (IC : 0.76-0.86). Le module *Béluga_domaines_vitaux* a permis de reproduire le patron de 1.0% (IC : 0.3 – 2.0%) de la population de BESL observée en tout temps dans le Saguenay, les données réelles d'inventaires aériens indiquant une proportion de BESL dans le Saguenay de 5%. Finalement, après 7 jours de simulation, 22% (IC : 20-25%) des BESL avaient visité le Saguenay au moins une fois, nos analyses précédentes ayant permis d'estimer que 53% des BESL étaient des utilisateurs du Saguenay (section 3.1.1.1).

Ces résultats indiquent des performances comparables entre les deux modules *Béluga_référence* et *Béluga_domaines_vitaux* en ce qui a trait à la reproduction de patrons spatiotemporels importants pour les BESL.

3.1.2 Module de propagation acoustique

3.1.2.1 Intégration

Le module de niveaux de bruit à la source correspond au modèle polynomial de degrés élevés dérivé par (Simard et coll. 2016). Ce modèle a comme avantage d'avoir été construit à partir d'observations opportunistes rétro-propagées en supposant une source monopole c.-à-d. corrigée pour l'atténuation encourue par les réflexions du son à la surface de l'eau (voir (Chion et coll. 2019)). Les niveaux de bruit à la source sont estimés pour chacune des fréquences centrales des bandes en 1/3 d'octave entre 12.5 Hz et 1000 Hz avant d'être redistribués à part égale pour couvrir tout l'espace en fréquence couvert par chaque bande.

Le module de transmission acoustique correspond à une intégration rigoureuse en langage JAVA du solveur d'équation parabolique RAM développé originalement en FORTRAN par (Collins 1993). La solution à la propagation de l'onde sonore est calculée pour chacune des fréquences centrales des bandes en 1/3 d'octave entre 12.5 Hz et 1000 Hz avant d'être redistribués à part égale pour couvrir tout l'espace en fréquence couvert par chaque bande. Ceci induit une incertitude de l'ordre de quelques dixièmes de dB à tout au plus 2 dB sur le bruit reçu intégré mais permet de grandement accélérer les temps de calcul requis. La profondeur de la source d'émission est estimée à 70% la valeur du tirant d'eau de chaque navire en accord avec la norme (ISO 17208-2 2019). La profondeur du récepteur correspond à la profondeur à laquelle se situe l'animal au pas de temps donné. La carte bathymétrique, de par sa taille de pixel, fixe la résolution spatiale à 100 mètres dans le plan de la surface de l'eau. Nous exploitons la pleine résolution de l'information bathymétrique en mettant à jour la solution de l'équation parabolique à chaque intervalle de 100 mètres afin d'obtenir une précision optimale sur la propagation acoustique. Divers modèles polynomiaux de la variation de la vitesse du son en fonction de la profondeur dans la colonne d'eau furent synthétisés à partir de l'information trouvée dans les archives de l'Observatoire global du Saint-Laurent. La vitesse du son est obtenue en fonction de la profondeur, salinité et température

à partir de l'équation (2) de (Leroy et coll. 2008). Nos modèles polynomiaux permettent de computer la vitesse du son à intervalle de 1 mètre sur toute la longueur de la colonne d'eau. L'information géologique (c.-à-d. nature/type des sédiments) est obtenue pour la zone d'intérêt par (Loring et Nota 1973) et convertie en propriétés géo-acoustiques interprétables par RAM (c.-à-d. coefficient d'absorption, vitesse du son et densité des sédiments) selon les travaux de (Jensen et coll. 2011). Une pré-simulation aura permis d'obtenir le bruit reçu par plus de 2000 animaux exposés à un seul navire-marchand. De cette distribution, il apparaît que, statistiquement, le bruit reçu attribué à un navire situé à plus de 40 km d'un receveur se fond à même le bruit ambiant (Carr et coll. 2006) et devient donc, par le fait même, imperceptible dans le référentiel de l'animal. Afin de largement réduire les temps de calcul, seule l'exposition au bruit par les navires retrouvés à l'intérieur d'un rayon de 40 km est comptabilisée. Des séries de simulations effectuées avec cet algorithme ont permis de valider qualitativement les niveaux de bruit reçus à basses fréquences dans divers secteurs, sur la base des informations disponibles dans la littérature (Aulanier et coll. 2016).

3.1.3 Prochaines étapes

Afin de couvrir le spectre de fréquences d'intérêt pour le BESL (cf. Annexe 4), nous prévoyons intégrer le bruit d'origine anthropique et sa propagation à moyennes et hautes fréquences. Pour cela, nous poursuivrons notre veille scientifique pour identifier les plus récents avancements relativement à la caractérisation du bruit des navires à moyennes et hautes fréquences. Nous prévoyons également implanter un algorithme de perte de transmission de type « traceur de rayons » plus efficace en temps de calcul pour caractériser la propagation acoustique à moyennes et hautes fréquences. Nous intégrerons également des pondérations fréquentielles pour tenir compte des caractéristiques de l'audiogramme du béluga du Saint-Laurent. Finalement, nous explorerons la question de la propagation du bruit à l'intérieur du champ proche d'une source (p. ex. < 500 m), particulièrement d'intérêt pour les hautes fréquences.

3.2 Volet Scénarios

3.2.1 Augmentation du trafic dans la rivière Saguenay

Le trafic maritime est identifié comme une menace au rétablissement de plusieurs espèces de baleines en péril qui utilisent l'estuaire du fleuve Saint-Laurent et la rivière Saguenay, incluant le le BESL (Pêches et Océans Canada 2009, 2018a, 2018b, 2019) et le rorqual bleu (Pêches et Océans Canada 2012). En 2017, il y a eu environ 4800 transits de navires marchands et de croisière dans l'ESL et environ 450 dans le Saguenay (Turgeon 2019).

Les quatre nouveaux développements industrialo-portuaires sur les rives du Saguenay conduiraient à une augmentation du nombre de transits de navires dans l'habitat estival des baleines du Saint-Laurent incluant le BESL (Gouvernement du Québec 2015). Dans le contexte de ce programme de recherche, afin d'estimer quels seraient les impacts de tels projets industrialo-portuaires sur le BESL, les promoteurs de ces projets ont partagé les informations confidentielles sur les transits additionnels de navires que leurs projets impliqueraient. Ces données ont été utilisées pour alimenter les simulations présentées plus loin dans ce rapport. Au total, en combinant les quatre projets industrialo-portuaires, il est estimé qu'un maximum de 820 nouveaux transits s'ajouteraient annuellement au trafic actuel dans le Saguenay, ce qui est cohérent avec les estimations utilisées dans d'autres études (Pêches et Océans Canada 2018a).

3.2.2 Mesures de réduction du bruit sous-marin de la navigation marchande

La revue détaillée des mesures de réduction du bruit de la navigation marchande est présentée en Annexe 3. Une synthèse est présentée ci-dessous.

On distingue deux catégories principales de mesures permettant de réduire le BSM des navires : les mesures technologiques et les mesures opérationnelles, également appelées mesures de gestion. La première catégorie regroupe les mesures qui s'intéressent directement aux sources de bruit rayonné des navires. Cette première catégorie peut être subdivisée en trois groupes de mesures qui correspondent aux trois principales sources de bruit émis par les navires : les mesures visant à réduire le bruit de cavitation des hélices, les mesures visant à réduire le bruit généré par le rayonnement des vibrations des moteurs et les mesures visant à réduire le bruit hydrodynamique de la coque du navire. Pour chacun des trois groupes, les mesures peuvent s'appliquer de manière non exclusive soit à la conception du navire, soit lors de travaux de modernisation (« retrofit ») au cours de la vie du navire ou soit lors d'opérations de maintenance. D'autres mesures technologiques permettent également de réduire indirectement le bruit des navires notamment toutes les technologies reposant sur l'utilisation de la force vélique qui permettent de réduire à différents degrés le bruit de cavitation et le bruit de vibration des moteurs. La deuxième catégorie de mesures est liée à l'organisation spatio-temporelle du trafic maritime. Les mesures opérationnelles sont ancrées dans un espace donné et ont pour but de modifier la quantité et la répartition spatio-temporelle du BSM. Dépendamment des mesures, celles-ci permettent de réduire le bruit sur un espace-temps très large qui va de la notification en temps réel, visant à réduire le bruit dans un court laps de temps sur la zone de présence du navire, jusqu'aux mesures de réductions de vitesse qui permettent de diminuer le bruit de manière continue et dans tous les espaces empruntés par les navires. Les deux catégories de mesures sont complémentaires et leurs effets peuvent en partie se cumuler. Il faut noter aussi que les temps d'implémentation sont très variables et que l'efficacité et les coûts des différentes mesures sont encore insuffisamment documentés. Enfin, une troisième catégorie de mesures liée à l'organisation imbriquée des

différents acteurs de la chaîne logistique du transport maritime est présentée. À partir d'exemples, cette dernière partie met en avant la capacité de ces autres acteurs de cette chaîne (p. ex. les autorités portuaires, les clients/utilisateurs du transport marchand) à contribuer soit directement à la réduction du bruit sous-marin, soit indirectement en facilitant la mise en place de mesures de réduction du bruit sous-marin par l'industrie du transport maritime.

3.3 Volet Analyses

3.3.1 Résultats des scénarios testés avec le simulateur 3MTSim

Les résultats présentés dans cette section visent à répondre aux deux questions rappelées ci-dessous :

- Q1 : l'ajout de nouveaux transits de navires marchands dans le Saguenay et l'estuaire maritime, dans le scénario du déploiement de la Stratégie maritime du Québec, augmente-t-il de façon statistiquement significative l'exposition des bélugas au bruit sous-marin ?
- Q2 : la prise en compte des domaines vitaux des bélugas reproduisant les caractéristiques de fidélité au site des animaux à l'échelle de l'individu a-t-elle un impact statistiquement significatif sur l'estimation de leur exposition cumulative au bruit des navires marchands ?

Les résultats sont présentés pour les deux métriques RL (niveau du bruit instantané des navires reçu par un béluga) et SEL (bruit cumulatif des navires reçu par un béluga).

3.3.1.1 Niveaux de bruit instantané RL

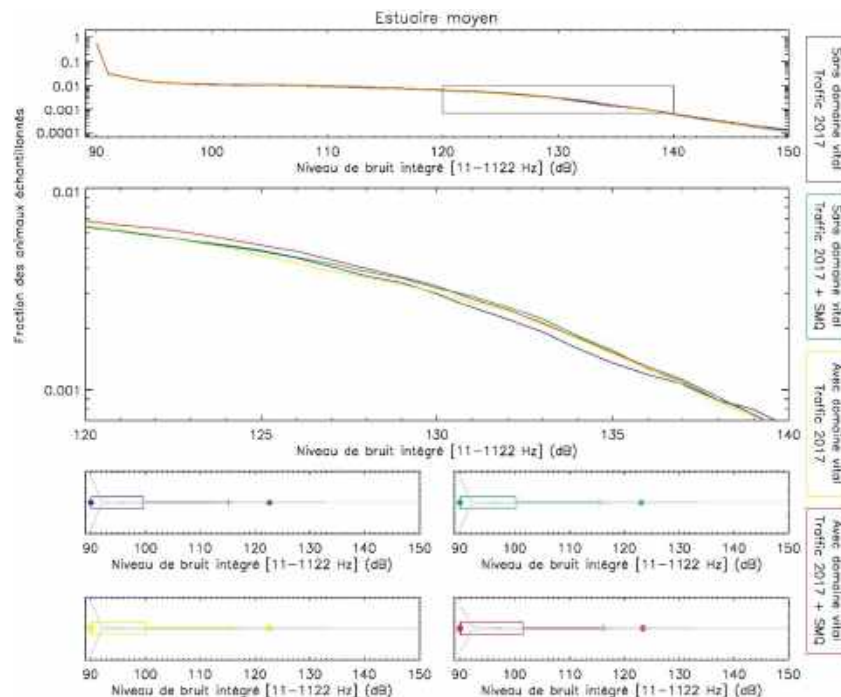


Figure 15 : Panneau supérieur : Histogrammes de la fraction relative des niveaux de bruit instantané reçu pour chaque scénario (axe logarithmique) pour le secteur de l'Estuaire moyen. Panneau du milieu : Grossissement de la section encadrée au panneau supérieur afin de saisir les différences entre les divers scénarios pour les niveaux de bruit instantané élevés (> 120 dB). Panneaux inférieurs : Diagrammes-moustaches des niveaux de bruit instantané reçu pour les 4 scénarios étudiés. Les 5ième (point), 10ième (trait), 25ième, 50ième, 75ième (boîte), 90ième (trait) et 95ième (point) percentiles sont représentés. Les courbes de type « violon » en gris représentent la probabilité de densité de distribution des mesures pour chaque scénario.

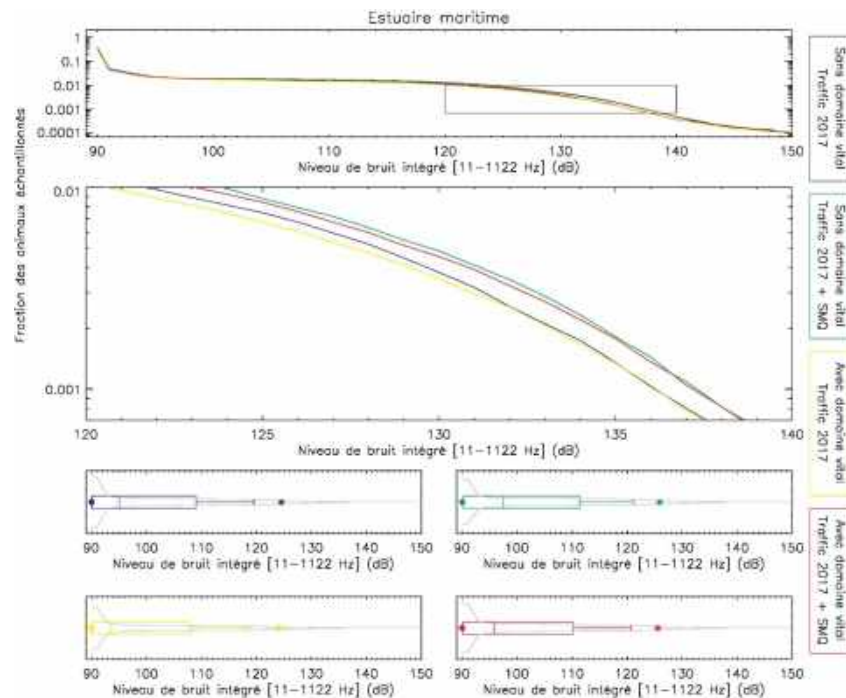


Figure 16 : Identique à la Figure 15 pour le secteur de l'Estuaire maritime

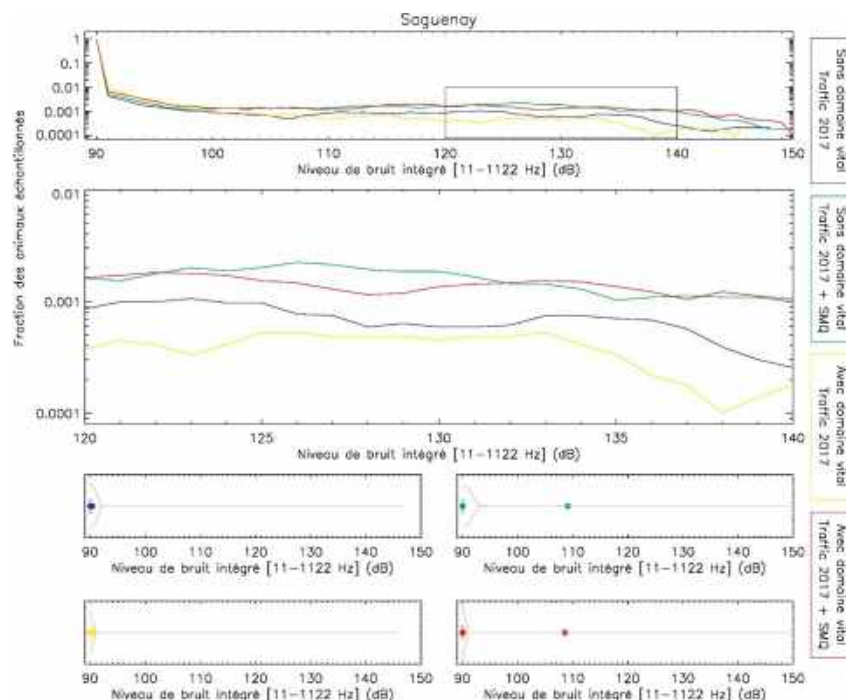


Figure 17 : Identique à la Figure 15 pour le secteur du Saguenay

La Figure 15, Figure 16 et Figure 17 présentent les niveaux de bruit instantanés reçus par les bélugas pour les quatre scénarios testés, dans les trois secteurs de l'habitat estival du BESL, respectivement l'estuaire moyen, l'estuaire maritime et le Saguenay. Les graphiques indiquent

qu'il existe des différences de RL observées entre les quatre scénarios pour tous les niveaux de bruit.

Afin de déterminer si ces différences de RL sont statistiquement significatives, nous avons effectué un test de Student (t-test) entre tous les scénarios deux à deux (Tableau 9). Il s'avère que dans la grande majorité des cas, les différences entre les scénarios comparés deux à deux sont statistiquement significatives. En particulier, l'ajout de transits additionnels occasionne systématiquement une hausse statistiquement significative des niveaux de bruit RL reçus par les bélugas. De la même façon, la prise en compte des domaines vitaux pour les bélugas affecte également de façon statistiquement significative les niveaux de bruit RL reçus par les bélugas par rapport aux scénarios où les bélugas n'ont pas de domaines vitaux.

Tableau 9: Test de Student (t-test) sur les niveaux de bruit instantanés RL reçus par les bélugas dans les différents secteurs de l'habitat, pour vérifier si les différences entre les 4 scénarios sont statistiquement significatives. Scénario #1 : trafic 2017 et bélugas sans domaine vital ; Scénario #2 : trafic 2017 + SMQ et bélugas sans domaine vital ; Scénario #3 : trafic 2017 et bélugas avec domaines vitaux ; Scénario #4 : trafic 2017 + SMQ et bélugas avec domaines vitaux.

		Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
Saguenay	Scénario 2	p < 0.001	---	---
	Scénario 3	p < 0.001	p < 0.001	---
	Scénario 4	p < 0.001	p > 0.20	p < 0.001
Estuaire maritime	Scénario 2	p < 0.001	---	---
	Scénario 3	p < 0.001	p < 0.001	---
	Scénario 4	p < 0.001	p < 0.001	p < 0.001
Estuaire moyen	Scénario 2	p < 0.001	---	---
	Scénario 3	p < 0.05	p < 0.05	---
	Scénario 4	p < 0.001	p < 0.001	p < 0.001

p < 0.05 : les différences statistiques des histogrammes sont significatives.

p > 0.05 : les différences peuvent être le fruit du hasard.

La section suivante compare les périodes bruyantes (c.-à-d. RL > 120 dB) auxquelles sont exposées les bélugas pour chacun des quatre scénarios.

3.3.1.2 Périodes bruyantes

Le Tableau 10 et le Tableau 11 indiquent qu'en ajoutant le trafic maximal prévu selon les quatre projets industrialo-portuaires proposés (c.-à-d. 820 transits additionnels répartis uniformément sur une année), l'augmentation de la proportion des périodes bruyantes serait maximale pour le Saguenay, suivi de l'estuaire maritime et de l'estuaire moyen. Le Saguenay étant actuellement un refuge acoustique naturel, l'augmentation relative des périodes bruyantes serait de l'ordre de + 450% si on tient compte des domaines vitaux des bélugas (+ 161% sinon). Cette importante hausse relative des périodes bruyantes pour le Saguenay (Tableau 11) s'explique par le fait que le Saguenay est actuellement un refuge acoustique naturel en ce qui a trait au bruit de la navigation marchande (Tableau 10). Un ajout de 820 transits annuellement (~2.2/jour) viendrait presque tripler le nombre de 447 transits de grands navires dans le Saguenay en 2017 (Turgeon 2019). Pour l'ensemble de l'habitat estival du BESL, l'augmentation serait de + 18% (+ 15% sans tenir compte des domaines vitaux des bélugas).

Tableau 10: Pourcentage de RL instantanés > 120 dB – Périodes bruyantes pour chaque secteur et chaque scénario

Secteur	Scénario 1 (reference)	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Saguenay	1.3%	3.4%	0.6%	3.3%
Estuaire maritime	9.4%	11.5%	8.7%	10.9%
Estuaire moyen	6.6%	6.8%	6.6%	7.2%
Habitat estival	7.6%	8.8%	7.4%	8.7%

Tableau 11: Augmentation des périodes bruyantes (RL > 120 dB) en présence du trafic additionnel (820 transits additionnels dans l'estuaire maritime et le Saguenay) par rapport au trafic 2017. Les deux colonnes font la distinction entre les modules de déplacements de bélugas prenant en compte ou non les domaines vitaux individuels des animaux.

Secteur	Bélugas sans domaine vital (=sans fidélité au site)	Béluga avec domaine vital (=avec fidélité au site)
	Ajout des transits additionnels dans le Saguenay et l'estuaire maritime (SMQ) par rapport au trafic 2017	
Saguenay	+ 161%	+ 450%
Estuaire maritime	+ 22%	+ 25%
Estuaire moyen	+ 3%	+ 9%
Habitat estival	+ 15%	+ 18%

3.3.1.3 Exposition cumulative (SEL) des BESL

La Figure 18 présente les distributions des expositions cumulatives pour les bélugas privilégiant chacun des trois secteurs (Saguenay, estuaire maritime et estuaire moyen). On remarque des différences dans les distributions des SEL au niveau des valeurs médianes et des valeurs extrêmes pour chaque secteur, en fonction du scénario considéré.

Le calcul de l'exposition cumulative SEL des BESL a été estimé par échantillonnage en raison de l'important temps de calcul requis pour le calculer de façon exhaustive lors des simulations. Les résultats présentés pour les SEL sont donc préliminaires à ce stade-ci. Afin de produire des résultats finaux, il faudra conduire des simulations sur de plus longues durées (p. ex. 30 jours au lieu de 8) et calculer le SEL pour chaque béluga sur la base des niveaux de bruit reçu sur des périodes de temps plus rapprochées (p. ex. à chaque minute).

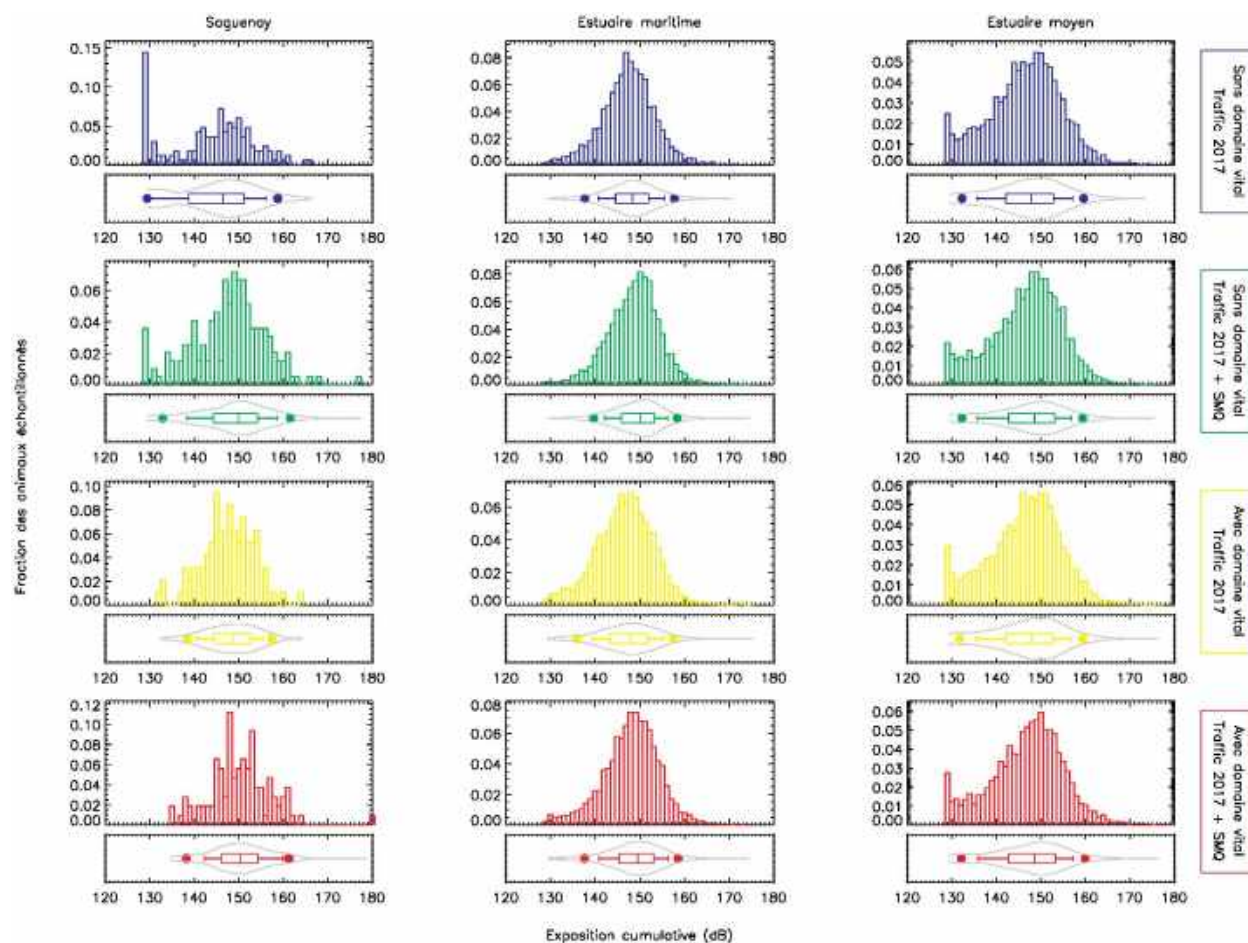


Figure 18: *Panneaux supérieurs : Distributions des SEL par secteur et par scénario. Panneaux inférieurs : Diagrammes-moustaches des expositions cumulatives prédites par secteur et par scénarios. Les 5ème (point), 10ème (trait), 25ème, 50ème, 75ème (boîte), 90ème (trait) et 95ème (point) percentiles sont représentés. Les courbes de type « violon » en gris représentent la probabilité de densité de distribution des SEL.*

Malgré ces limites dues aux importantes ressources computationnelles requises par le simulateur, le Tableau 12 indique que la prise en compte des domaines vitaux a également un effet statistiquement significatif sur les niveaux de bruit cumulatifs SEL reçus par les bélugas dans les différents secteurs de l'habitat estival du BESL.

Tableau 12: Test de Student (t-test) sur les niveaux de bruit cumulatifs SEL reçus par les bélugas dans les différents secteurs de l'habitat, pour vérifier si les différences entre les 4 scénarios sont statistiquement significatives. Scénario #1 : trafic 2017 et bélugas sans domaine vital ; Scénario #2 : trafic 2017 + SMQ et bélugas sans domaine vital ; Scénario #3 : trafic 2017 et bélugas avec domaines vitaux ; Scénario #4 : trafic 2017 + SMQ et bélugas avec domaines vitaux.

		Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
Saguenay	Scénario 2	$p < 0.02$	---	---
	Scénario 3	$p > 0.05$	$p > 0.20$	---
	Scénario 4	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$
Estuaire maritime	Scénario 2	$p < 0.001$	---	---
	Scénario 3	$p < 0.001$	$p < 0.001$	---
	Scénario 4	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$
Estuaire moyen	Scénario 2	$p < 0.001$	---	---
	Scénario 3	$p > 0.20$	$p < 0.01$	---
	Scénario 4	$p < 0.001$	$p > 0.20$	$p < 0.05$

$p < 0.05$: les différences statistiques des histogrammes sont significatives.

$p > 0.05$: les différences peuvent être le fruit du hasard.

3.3.1.4 Bilan des simulations à l'an #1

Que l'on prenne en compte ou non la fidélité au site (=domaines vitaux) des bélugas à l'échelle de l'individu, les résultats indiquent qu'un ajout de navires additionnels dans le Saguenay augmenterait de façon statistiquement significative l'exposition des BESL au bruit instantané (RL) des navires marchands, en augmentant notamment les périodes bruyantes (Tableau 11). Ainsi, en l'absence de mesures de réduction du BSM des navires marchands, la réponse à la question Q1 (cf. section 3.3.1) est oui. Ceci confirme la nécessité de mettre en œuvre des mesures de réduction du BSM dans l'habitat estival du béluga.

Pour ce qui est de la question Q2, nos résultats ont montré que la prise en compte des domaines vitaux des bélugas à l'échelle de l'individu était susceptible de modifier de façon statistiquement significative l'exposition au bruit instantané RL (Tableau 9) et cumulatif SEL (Tableau 12) des BESL au bruit des navires marchands pour les différents secteurs. Ainsi, la réponse à la question Q2 est oui. Cela signifie que pour estimer précisément les niveaux d'exposition instantanés et cumulatifs à l'échelle de l'individu et dans un deuxième temps en déduire des effets à l'échelle de

la population des BESL, il est nécessaire de tenir compte des domaines vitaux à l'échelle individuelle. Ces étapes font partie des travaux en cours de réalisation programme de recherche.

Pour des raisons de limites computationnelles à l'échéance de l'an #1 du programme de recherche, nous avons dû procéder à un échantillonnage des BESL dans les simulations. Ceci a affecté la précision des sorties du simulateur notamment pour évaluer l'exposition cumulative des BESL au BSM. Pour pallier cette limite, il sera nécessaire de produire des simulations sur de plus longues périodes et d'échantillonner les BESL plus fréquemment pour raffiner l'estimation des SEL.

4 Constats et observations à l'an #1

La population de BESL est actuellement en voie de disparition et en déclin (Pêches et Océans Canada 2018b), révélant que les menaces à son rétablissement dépassent déjà les seuils soutenables. Le BSM de la navigation est l'une des trois principales menaces limitant le rétablissement du BESL (Pêches et Océans Canada 2009, 2018b). Cette menace fait donc l'objet d'un plan d'action spécifique visant à réduire le bruit d'origine anthropique dans l'habitat du béluga (Pêches et Océans Canada 2019). Les effets de la navigation sur le comportement des BESL ont été documentés à plusieurs reprises et sont synthétisés dans le rapport produit par Ocean Wise pour le présent programme de recherche (Annexe 4). Ces effets incluent le changement de vitesse de déplacement des animaux, la formation de groupes plus rapprochés, le changement de durée des plongées ou encore le possible abandon de certains habitats. Une corrélation négative entre le nombre de bateaux et le nombre de jeunes bélugas de l'année à l'embouchure du Saguenay a par ailleurs été révélée par Parcs Canada (Conversano, Turgeon, et Ménard 2017). Plusieurs autres effets sur la communication des BESL ont également été mis en lumière (Lesage et coll. 1999; Vergara et coll. 2019).

L'importance du Saguenay, de par son utilisation par le BESL incluant de nombreux veaux et jeunes, est documentée (Conversano et coll. 2017). Les nouvelles analyses conduites sur les données de photo-identification des BESL disponibles à ce jour ont révélé que le pourcentage des individus connus de la population qui fréquentent le Saguenay, sans égard à la fréquence de visite, s'élève à environ 50% des adultes (tous sexes confondus) et environ 67% des femelles adultes. Bien que les fonctions écologiques du Saguenay ne soient pas encore connues précisément, ces premiers résultats renforcent l'importance du Saguenay pour le BESL en y apportant la dimension de son utilisation à l'échelle de l'individu.

Les développements de la plateforme de simulation des déplacements des BESL et de leur exposition au BSM des navires marchands ont été conduits selon la planification prévue. Le module de déplacement des BESL implémenté dans la plateforme lors de la première année du programme de recherche permet un premier niveau de réalisme en ce qui a trait aux mouvements individuels des BESL en 3D et à la prise en compte de leurs comportements sociaux via leur fidélité au site. En parallèle, une revue et méta-analyse a permis de construire un simulateur réaliste du niveau de bruit sous-marin rayonné par les navires marchands. Plusieurs améliorations des différents modules de la plateforme de simulation ont été identifiées mais les développements de l'an #1 ont permis de confirmer la validité de cette approche et de produire des premières simulations pour orienter la suite de nos travaux.

Une première série de simulations a été effectuée afin d'évaluer l'impact qu'aurait l'ajout de nouveaux transits de navires marchands sur l'exposition au BSM des BESL. Les transits hypothétiques de navires marchands se rapportent à quatre projets de développement industrialo-portuaires sur les rives du Saguenay, actuellement à l'étude. Sur la base des données transmises par les promoteurs de ces quatre projets, il a été déterminé qu'un maximum d'environ 820 transits de navires marchands seraient ajoutés chaque année dans l'habitat estival du BESL, précisément dans le Saguenay et l'estuaire maritime. L'analyse des résultats d'une première série de simulations a conduit à deux principaux constats :

- 1- La prise en compte de la caractéristique sociale de fidélité au site du BESL conduit à une estimation de l'exposition instantanée et cumulative au bruit des navires marchands significativement différente de celle d'un scénario dans lequel cette caractéristique sociale

est ignorée. Ce résultat confirme l'importance d'intégrer la dynamique sociale et spatiale de la population du BESL au meilleur des connaissances disponibles pour effectuer une évaluation précise de l'impact acoustique de la navigation.

- 2- Les simulations ont révélé que l'ajout de 820 transits additionnels annuellement (~2.2 transits additionnels / jour en moyenne) est susceptible d'entraîner une hausse des périodes bruyantes (c.-à-d. lorsque le bruit à basse fréquence en provenance de navires reçu par un béluga est supérieur à 120 dB large bande) comprise entre 161% et 450% par rapport à l'année de référence 2017, pour les BESL qui fréquentent le Saguenay. Cette importante hausse relative des périodes bruyantes s'explique par le fait que le Saguenay est actuellement un refuge acoustique naturel en ce qui a trait au bruit de la navigation marchande, un ajout de 820 transits annuellement venant presque tripler le nombre de 447 transits de grands navires dans ce secteur en 2017 (Turgeon 2019). Ce résultat confirme qu'un ajout de navires additionnels transitant dans le Saguenay est susceptible d'augmenter de façon significative l'exposition des BESL qui fréquentent cette portion de leur habitat.

Il est important de rappeler que les simulations conduites à l'an #1 du programme de recherche n'incluent pas de mesure de réduction du bruit des navires marchands. De telles mesures de réduction du BSM existent et ont fait l'objet d'une revue de la littérature, permettant d'identifier des pistes prometteuses, qu'il s'agisse de mesures opérationnelles ou technologiques (Annexe 3). L'impact de ces mesures de réduction du BSM de la navigation fera l'objet de prochains développements et de nouvelles simulations dans le cadre de ce programme de recherche.

Notons également que seul le trafic additionnel en provenance de quatre projets de développement industrialo-portuaire dans le Saguenay a été considéré pour simuler l'effet d'un possible accroissement du transport maritime sur le BSM dans l'habitat du BESL. Les perspectives commerciales (p. ex. traités de libre-échange) ainsi que plusieurs autres projets à l'étude dans d'autres secteurs sont également susceptibles d'avoir un impact sur le nombre de transits de navires marchands dans l'habitat essentiel du BESL. Une évaluation complète de l'impact cumulatif du trafic marchand sur le BESL devra donc tenir compte de ce portrait complet pour élaborer des mesures efficaces.

Finalement, en l'absence d'étude quantitative disponible au moment de produire les simulations, nous avons posé l'hypothèse que les BESL ne modifient pas leur comportement en fonction du bruit de la navigation reçu et continuent de fréquenter les différents secteurs selon, notamment, des caractéristiques de fidélité au site. Cependant, des observations sur la population du BESL suggèrent qu'on ne peut pas exclure un risque d'abandon temporaire ou permanent de certains habitats sous l'effet d'une augmentation du trafic maritime (Pippard 1985). Par conséquent, dans la prochaine année du programme de recherche nous investiguerons le risque d'abandon du Saguenay par le BESL dans le scénario d'une augmentation de la navigation marchande.

5 Recommandations à l'an #1

Le présent programme de recherche (2018-2023) ainsi que l'initiative de recherche conduite dans le cadre du Plan de protection des océans (2017-2022) visent notamment à évaluer l'exposition cumulative des BESL au BSM de la navigation ainsi que leurs impacts et effets cumulatifs sur cette population. Pour ce faire, ces deux initiatives s'appuient sur la collecte, l'analyse et l'intégration d'un grand nombre de jeux de données sur le BESL, la navigation, le BSM et ses impacts. Ces initiatives permettront d'informer le processus d'harmonisation des activités de navigation avec la population de BESL dans son habitat estival.

Dans le cadre du présent programme de recherche, des analyses en cours visent à décrire la structure sociale des BESL. Les résultats de ces analyses auront des répercussions sur l'évaluation de l'exposition cumulative des BESL au BSM de la navigation. Bien qu'il ne soit pas encore possible de déterminer précisément les effets du bruit sous-marin de la navigation dans l'estuaire du Saint-Laurent et le Saguenay sur le BESL à l'échelle de l'individu, des communautés ou de la population, le déclin de la population de BESL observé au cours des dernières années suggère que les menaces à son rétablissement dépassent les seuils soutenables. L'ajout d'activités de navigation dans l'habitat essentiel du BESL sans mise en place de mesures de réduction du BSM efficaces résulterait en une augmentation de l'exposition des animaux au BSM d'origine anthropique. Un tel scénario irait donc à l'encontre des efforts de rétablissement du BESL.

Par conséquent, afin de procéder à une évaluation complète de l'exposition des BESL au BSM de la navigation sous différents scénarios d'accroissement du trafic marchand dans son habitat estival, nous planifions :

- D'intégrer dans la plateforme de simulation les scénarios réalistes d'accroissement du transport marchand anticipé pour le Saint-Laurent et le Saguenay qui seront rendus disponibles par le Ministère des Transports du Québec;
- De compléter et d'intégrer dans le simulateur les résultats de l'analyse complète de la dynamique sociale des BESL à partir des données de photo-identification du GREMM;
- D'intégrer dans la plateforme de simulation l'ensemble des segments de la navigation afin d'obtenir un portrait complet des niveaux de bruit cumulatif reçus par les BESL dans leur habitat estival et de la contribution relative de chacun de ces segments.

D'autre part, afin d'assurer de réduire le BSM de la navigation dans l'habitat estival du BESL estimé au moyen de la plateforme de simulation, conformément aux exigences de rétablissement du BESL, nous recommandons et planifions solliciter :

- L'implication des acteurs de l'industrie du transport maritime dans une démarche de co-construction de scénarios de mesures efficaces menant à une réduction significative du BSM.
- L'implication des intervenants tiers de la chaîne du transport maritime (p.ex. fournisseurs et utilisateurs de services du transport maritime) dans la co-construction de solutions facilitant la mise en œuvre de mesures efficaces par l'industrie du transport maritime menant à une réduction significative du BSM.

Finalement, compte tenu du haut niveau d'incertitude actuel entourant les effets de la navigation et du BSM sur la population du BESL et compte tenu de la situation précaire (déclin) de cette

population en voie de disparition, conformément au principe de précaution, nous recommandons la plus grande prudence dans la prise de décisions pour lesquelles des effets écologiques dommageables et irréversibles ne peuvent être exclus.

6 Prochaines étapes

6.1 Écologie du BESL

Plusieurs projets et analyses sont en cours pour améliorer nos connaissances sur l'écologie du BESL. Tout d'abord, nous conduirons des analyses en collaboration avec Parcs Canada sur plusieurs jeux de données (c.-à-d. observations terrestres des bélugas et données AIS) pour déterminer s'il existe un risque d'abandon du Saguenay par le BESL en cas d'intensification du transport marchand dans ce secteur. Un cadre d'analyse statistique sera également mis en place afin d'étudier les mécanismes qui sous-tendent la sélection d'habitat par cette population (Annexe 1). Finalement, nous poursuivrons nos analyses de réseaux pour caractériser les communautés de BESL et décrire finement leur structure sociale-spatiale. Les résultats de ces analyses seront intégrés à la plateforme de simulation pour l'évaluation de l'exposition des BESL au bruit cumulatif de la navigation.

6.2 Navigation

Dans la prochaine année, nous déploierons des efforts de recherche sur la navigation dans l'estuaire et le Saguenay en se concentrant sur plusieurs dimensions :

- Navigation de plaisance : avec le démarrage d'un nouveau projet de doctorat en janvier 2020, la prochaine année sera consacrée à la mise en place d'un protocole visant à caractériser et modéliser la dynamique des activités de plaisance dans l'habitat estival du BESL ainsi qu'à déterminer ses impacts.
- Traversiers : la dynamique spatiotemporelle des traversiers est bien décrite dans les données AIS. Les efforts seront dédiés à l'identification des données disponibles sur le BSM des traversiers en service dans l'habitat estival du BESL.

Lors de la première année du programme, nous nous sommes concentrés sur la modélisation du bruit à basse fréquence. Dans la suite du programme, nous nous intéresserons également au BSM à moyennes et hautes fréquences, particulièrement importantes pour le BESL.

6.3 Plateforme de simulation

L'emphase sera mise sur l'intégration régulière des nouvelles connaissances produites sur l'écologie du BESL et sur la navigation dans la plateforme. Les scénarios d'augmentation du transport marchand et de réduction du BSM seront également traduits dans le langage du simulateur pour être testés. Finalement, un nouveau chantier sera initié visant à évaluer l'incertitude des sorties du simulateur lors de l'estimation de l'exposition des BESL au bruit de la navigation pour différents scénarios.

6.4 Réduction du bruit sous-marin

6.4.1 Analyse économique multicritère de la réduction du bruit sous-marin

La mise en place du projet repose sur deux étapes qui seront menées en parallèle au cours de la deuxième année.

Concernant l'analyse liée aux mesures technologiques, un travail d'enquête va être mené afin de caractériser le degré de connaissance de l'industrie maritime concernant la problématique du BSM et des mesures technologiques existantes permettant de réduire le bruit des navires. Il s'agit aussi d'identifier les éventuelles technologies d'ores et déjà appropriées par l'industrie et d'estimer les réductions de bruit qui sont possibles d'atteindre au regard des caractéristiques des flottes. Ce travail sera mené dans le cadre d'une collaboration avec l'industrie maritime.

Concernant les mesures de gestion, la prochaine étape va porter dans un premier temps sur l'application d'une méthode validée d'évaluation économique permettant de calculer la variation du coût logistique en fonction de plusieurs scénarios de ralentissement ou de relocalisation de voies de navigation. Cette première méthode servira dans un second temps à développer une méthode d'évaluation propre au contexte du Saint-Laurent et qui reposera sur l'estimation des impacts économiques directs et indirects de l'allongement de la durée des transits.

6.4.2 Recherche concertée de mesures de réduction du bruit sous-marin

La deuxième année du programme de recherche sera axée sur l'exploration de mesures de réduction du BSM de la navigation par l'entremise de différents forums d'échanges et de co-construction. En 2020, le G2T3M explorera notamment des routes alternatives pour réduire l'exposition des BESL au bruit des navires marchands dans l'estuaire moyen. Ce travail de co-construction conduit par plusieurs membres du G2T3M se fera sous la coordination de Clément Chion. La plateforme de simulation fera partie des outils utilisés pour évaluer les différentes mesures qui seront co-construites.

6.4.3 Refuges acoustiques

Parmi les mesures de réduction du BSM qui seront explorées, l'identification de refuges acoustiques, spatiaux et temporels, ainsi que leur efficacité feront l'objet d'une série d'analyses au cours de la deuxième année du programme de recherche. L'identification de ces refuges sera fondée sur une combinaison de critères prenant en compte l'importance relative des secteurs candidats pour les différentes communautés de bélugas, potentiellement considérées comme des unités de conservation significatives, et pour les différents segments de la navigation.

7 Références

- Aulanier, F., Y. Simard, N. Roy, M. Bandet, et C. Gervaise. 2016. « Groundtruthed Probabilistic Shipping Noise Modeling and Mapping: Application to Blue Whale Habitat in the Gulf of St. Lawrence ». P. 070006 in *Proceedings of Meetings on Acoustics*. Vol. 27. ASA.
- Boquet, Roxane et Claude Rioux. 2018. « Estimation de la valeur non marchande des services rendus par les écosystèmes du parc marin du Saguenay–Saint-Laurent ». *Le Naturaliste canadien* 142(2):157–166.
- Bousquet, F. et C. Le Page. 2004. « Multi-Agent Simulations and Ecosystem Management: A Review ». *Ecological Modelling* 176:313–32.
- Boxall, Peter C., Wiktor L. Adamowicz, Maria Olar, G. E. West, et G. Cantin. 2012. « Analysis of the economic benefits associated with the recovery of threatened marine mammal species in the Canadian St. Lawrence Estuary ». *Marine Policy* 36(1):189–197.
- Canada. 2002. *Species at Risk Act (Canada)*.
- Carr, Scott A., Marjo H. Laurinolli, Cristina D. S. Tollefsen, et Stephen P. Turner. 2006. *Cacouna energy LNG terminal: Assessment of underwater noise impacts*. JASCO Research Ltd.
- Chion, C. 2011. « An agent-based model for the sustainable management of navigation activities in the Saint Lawrence Estuary ».
- Chion, Clément, Guy Cantin, Suzan Dionne, Benoit Dubeau, Philippe Lamontagne, Jacques-André Landry, Danielle Marceau, Cristiane CA Martins, Nadia Ménard, Robert Michaud, et others. 2013. « Spatiotemporal modelling for policy analysis: Application to sustainable management of whale-watching activities ». *Marine Policy* 38:151–62.
- Chion, Clément, Dominic Lagrois, et Jérôme Dupras. 2019. « A meta-analysis to understand the variability in reported source levels of noise radiated by ships from opportunistic studies ». *Frontiers in Marine Sciences*.
- Chion, Clément, Dominic Lagrois, Jérôme Dupras, Samuel Turgeon, Ian H. McQuinn, Robert Michaud, Nadia Ménard, et Lael Parrott. 2017. « Underwater acoustic impacts of shipping management measures: Results from a social-ecological model of boat and whale movements in the St. Lawrence River Estuary (Canada) ». *Ecological Modelling* 354:72–87.
- Chion, Clément, Lael Parrott, et Jacques-André Landry. 2012. *Collisions et cooccurrences entre navires marchands et baleines dans l'estuaire du Saint-Laurent--Évaluation de scénarios de mitigation et recommandations*. Université de Montréal.
- Chion, Clément, Samuel Turgeon, Guy Cantin, Robert Michaud, Nadia Ménard, Véronique Lesage, Lael Parrott, Pierre Beaufils, Yves Clermont, et Caroline Gravel. 2018. « A voluntary conservation agreement reduces the risks of lethal collisions between ships and whales in the St. Lawrence Estuary (Québec, Canada): From co-construction to monitoring compliance and assessing effectiveness ». *PloS one* 13(9):e0202560.
- Chion, Clément, Samuel Turgeon, Robert Michaud, Jacques-André Landry, et Lael Parrott. 2009. *Portrait de la Navigation dans le Parc Marin du Saguenay--Saint-Laurent. Caractérisation des activités sans prélèvement de ressources entre le 1er mai et le 31 octobre 2007*. École de technologie supérieure / Université de Montréal.

- Collins, M. D. 1993. « A Split-Step Padé Solution for the Parabolic Equation Method ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 93(4):1736–1742.
- Collins, Michael D. 1995. « User's Guide for RAM Versions 1.0 and 1.0 p ». *Naval Research Lab, Washington, DC* 20375.
- Conversano, Manuela, Samuel Turgeon, et Nadia Ménard. 2017. *Caractérisation de l'utilisation de l'embouchure du Saguenay et de la baie Sainte-Marguerite par le béluga du Saint-Laurent et par le trafic maritime entre 2003 et 2016. Analyse des données d'observation terrestre et recommandations sur des mesures de gestion visant à réduire le dérangement dans les aires de haute résidence du béluga dans le parc marin du Saguenay–Saint-Laurent*. Tadoussac (QC): Parcs Canada.
- Croft, Darren P., Richard James, et Jens Krause. 2008. *Exploring animal social networks*. Princeton University Press.
- Erbe, Christine, Colleen Reichmuth, Kane Cunningham, Klaus Lucke, et Robert Dooling. 2016. « Communication masking in marine mammals: A review and research strategy ». *Marine pollution bulletin* 103(1):15–38.
- Faille, Geneviève, Christian Dussault, Jean-Pierre Ouellet, Daniel Fortin, Réhaume Courtois, Martin-Hugues St-Laurent, et Claude Dussault. 2010. « Range fidelity: the missing link between caribou decline and habitat alteration? » *Biological conservation* 143(11):2840-50.
- Farcas, Adrian, Paul M. Thompson, et Nathan D. Merchant. 2016. « Underwater noise modelling for environmental impact assessment ». *Environmental Impact Assessment Review* 57:114–122.
- Farine, Damien R. 2017. « A guide to null models for animal social network analysis ». *Methods in ecology and evolution* 8(10):1309-20.
- Francois, R. E. et G. R. Garrison. 1982a. « Sound absorption based on ocean measurements: Part I: Pure water and magnesium sulfate contributions ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 72(3):896–907.
- Francois, R. E. et G. R. Garrison. 1982b. « Sound absorption based on ocean measurements. Part II: Boric acid contribution and equation for total absorption ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 72(6):1879–1890.
- Gassmann, Martin, Sean M. Wiggins, et John A. Hildebrand. 2017. « Deep-water measurements of container ship radiated noise signatures and directionality ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 142(3):1563–1574.
- Gomez, C., J. W. Lawson, A. J. Wright, A. D. Buren, D. Tollit, et V. Lesage. 2016. « A Systematic Review on the Behavioural Responses of Wild Marine Mammals to Noise: The Disparity between Science and Policy ». *Canadian Journal of Zoology* 94(12):801-19.
- Gouvernement du Québec. 2015. *La stratégie maritime à l'horizon 2030–Plan d'action 2015-2020*. Québec.
- Hemmera Envirochem Inc. 2016. *Vessel Quieting Design, Technology, and Maintenance Options for Potential Inclusion in EcoAction Program Enhancing Cetacean Habitat and Observation Program*. Burnaby (BC).
- Hooten, Mevin B., Devin S. Johnson, Brett T. McClintock, et Juan M. Morales. 2017. *Animal*

movement: statistical models for telemetry data. CRC press.

ISO 17208-2. 2019. *Underwater Acoustics - Quantities and Procedures for Description and Measurements of Underwater Sound from Ships - Part 2: Determination of Source Levels from Deep Water Measurements*. International Standardization Organization.

Jaeger, T. Florian. 2008. « Categorical data analysis: Away from ANOVAs (transformation or not) and towards logit mixed models ». *Journal of Memory and Language* 59(4):434-46.

Jensen, Finn B., William A. Kuperman, Michael B. Porter, et Henrik Schmidt. 2011. *Computational ocean acoustics*. Springer Science & Business Media.

Leos-Barajas, Vianey et Théo Michelot. 2018. « An Introduction to Animal Movement Modeling with Hidden Markov Models using Stan for Bayesian Inference ». *arXiv preprint arXiv:1806.10639*.

Leroy, Claude C., Stephen P. Robinson, et Mike J. Goldsmith. 2008. « A new equation for the accurate calculation of sound speed in all oceans ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 124(5):2774–2782.

Lesage, Véronique, Cyrille Barrette, Michael Kingsley, et Becky Sjare. 1999. « The effect of vessel noise on the vocal behavior of belugas in the St. Lawrence River estuary, Canada ». *Marine Mammal Science* 15(1):65–84.

Loring, Douglas Howard et Dirk Johannes Gregorius Nota. 1973. *Morphology and sediments of the Gulf of St. Lawrence*. Fisheries and Marine Service.

McQuinn, Ian H., Véronique Lesage, Dominic Carrier, Geneviève Larrivée, Yves Samson, Sylvain Chartrand, Robert Michaud, et James Theriault. 2011. « A Threatened Beluga (*Delphinapterus leucas*) Population in the Traffic Lane: Vessel-Generated Noise Characteristics of the Saguenay-St. Lawrence Marine Park, Canada ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 130:3661.

Michaud, Robert. 2014. *St. Lawrence Estuary beluga (*Delphinapterus leucas*) population parameters based on photo-identification surveys, 1989-2012*. 2013/130. GREMM.

Mosnier, A., R. Larocque, M. Lebeuf, J. F. Gosselin, S. Dubé, V. Lapointe, V. Lesage, D. Lefaiivre, S. Senneville, et C. Chion. 2016. *Définition et caractérisation de l'habitat du béluga (*Delphinapterus leucas*) de l'estuaire du Saint-Laurent selon une approche écosystémique*. Mont-Joli (QC, Canada): Fisheries and Oceans Canada.

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

Pêches et Océans Canada. 2009. *Plan de rétablissement du béluga du Saint-Laurent*.

Pêches et Océans Canada. 2012. *Programme de rétablissement du rorqual bleu (*Balaenoptera musculus*), population de l'Atlantique Nord-Ouest au Canada - population de l'Atlantique Nord-Ouest*.

Pêches et Océans Canada. 2018a. *Effets potentiels des projets de construction de terminaux maritimes dans le fjord du Saguenay sur le béluga du Saint-Laurent et son habitat*. 2018/025. Région du Québec.

- Pêches et Océans Canada. 2018b. *Le béluga de l'estuaire du Saint-Laurent - un examen scientifique de l'efficacité des mesures de rétablissement pour trois populations de baleines en péril*.
- Pêches et Océans Canada. 2019. *Plan d'action pour réduire l'impact du bruit sur le béluga et les autres mammifères marins en péril de l'estuaire du Saint-Laurent*. Ottawa.
- Pippard, L. 1985. « Status of the St. Lawrence River population of Beluga, *Delphinapterus leucas*. » *Canadian field-naturalist*. Ottawa ON 99(3):438–450.
- Québec. 2010. « Loi sur les espèces menacées ou vulnérables.[En ligne]< http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=2&file=/E_12_01/E12_01.html> ». Consulté le 10.
- Renilson Marine Consulting. 2009. *Reducing underwater noise pollution from large commercial vessels*. International Fund for Animal Welfare.
- Richardson, W. J., C. R. Greene, C. I. Malme, et D. H. Thomson. 1995. *Marine Mammals and Noise Academic Press*. San Diego.
- Sigaud, Marie, Jerod A. Merkle, Seth G. Cherry, John M. Fryxell, Andrew Berdahl, et Daniel Fortin. 2017. « Collective decision-making promotes fitness loss in a fusion-fission society ». *Ecology letters* 20(1):33-40.
- Simard, Yvan, Nathalie Roy, Cédric Gervaise, et Samuel Giard. 2016. « Analysis and modeling of 255 source levels of merchant ships from an acoustic observatory along St. Lawrence Seaway ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 140(3):2002–2018.
- Southall, B. L., A. E. Bowles, W. T. Ellison, et J. J. Finneran. 2008. « Marine Mammal Noise Exposure Criteria: initial scientific recommendations ». *Bioacoustics* 17(1-3):273-75.
- Turgeon, Samuel. 2019. *Portrait de la navigation dans le parc marin du Saguenay–Saint-Laurent - 2017*. Parcs Canada.
- Vard Marine Inc. 2019. *Ship underwater radiated noise*. Transport Canada.
- Vergara, Valeria, J. Wood, A. Ames, V. Lesage, et Robert Michaud. 2019. « Mom, can you hear me? Impacts of underwater noise on mother-calf contact calls in endangered belugas (*Delphinapterus leucas*) ». Mystic (CT), États-Unis.
- Wang, Jin-Feng, A. Stein, Bin-Bo Gao, et Yong Ge. 2012. « A review of spatial sampling ». *Spatial Statistics* 2:1-14.
- Weilgart, Lindy S. 2007. « The impacts of anthropogenic ocean noise on cetaceans and implications for management ». *Canadian Journal of Zoology* 85(11):1091–1116.
- Wenz, Gordon M. 1962. « Acoustic ambient noise in the ocean: Spectra and sources ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 34(12):1936–1956.
- Wladichuk, Jennifer L., David E. Hannay, Alexander O. MacGillivray, Zizheng Li, et Sheila J. Thornton. 2019. « Systematic source level measurements of whale watching vessels and other small boats ». *Journal of Ocean Technology* 14(3).
- Yang, Zhao, René Algesheimer, et Claudio J. Tessone. 2016. « A Comparative Analysis of Community Detection Algorithms on Artificial Networks ». *Scientific Reports* 6:30750.

Annexe 1 : Projet de doctorat en biologie (Sept 2019 — Août 2022) – Emmanuelle Barreau

Comportement de sélection d’habitat, de déplacement et de fusion-fission du béluga du Saint-Laurent

Résumé

La population de bélugas du Saint-Laurent est actuellement inscrite à l’annexe 1 de la Loi sur les espèces en péril du Canada à titre d’espèces en voie de disparition. Au Québec, cette espèce est désignée menacée en vertu de la Loi sur les espèces menacées et vulnérables. Plusieurs menaces à son rétablissement sont reliées aux activités de navigation qui ont lieu dans son habitat essentiel estival, telles que l’exposition au bruit sous-marin et le dérangement. Toutefois, l’atténuation des impacts du trafic maritime dans le Saint-Laurent passe par une bonne compréhension du comportement de sélection de l’habitat et de déplacement de cette espèce. En se basant sur la répartition spatiale connue des bélugas dans l’estuaire du Saint-Laurent et la rivière Saguenay, ce projet de doctorat visera à examiner de manière plus approfondie les mécanismes sous-jacents à la répartition spatio-temporelle des bélugas dans son aire de répartition estivale, en prenant en compte d’une part les facteurs biotiques et abiotiques rencontrés dans son aire de répartition d’été et d’autre part, le comportement social du béluga. Le projet comportera trois volets de recherche. Le premier visera à déterminer le rôle relatif des facteurs abiotiques, biotiques et de la taille et composition des groupes et troupeau dans les déplacements de cette espèce. Le deuxième volet visera à mieux comprendre la dynamique de fusion-fission des groupes de bélugas, tandis que le troisième cherchera à déterminer la fonction des différentes aires de forte résidence en étudiant les comportements de surface et de plongée qui y sont observés. La synthèse de ces résultats fournira de nouvelles connaissances sur la dynamique spatiale et le comportement social des bélugas qui seront intégrées, à moyens termes, dans un modèle de déplacement des bélugas. Ce modèle permettra d’améliorer notre compréhension des impacts du trafic maritime sur la population de bélugas de l’estuaire du Saint-Laurent.

Problématique et objectifs de recherche

L’utilisation de l’habitat par une espèce résulte d’une part, d’un comportement spécifique à celle-ci et d’autre part, des caractéristiques environnementales de son milieu. Bien que les aires de forte résidence du béluga soient connues dans l’estuaire du Saint-Laurent (Lemieux Lefebvre et coll.2012, Mosnier et coll. 2016), la compréhension des mécanismes sous-jacents à cette répartition spatiale ainsi que les déplacements des individus reste incomplète. Ainsi, l’objectif principal de ce projet est de déterminer quels sont les facteurs, à la fois environnementaux et comportementaux, qui influencent la dynamique spatiale des bélugas dans leur aire de répartition estivale du Saint-Laurent.

Le déplacement des animaux au sein de leur domaine vital est connu pour généralement être influencé par des facteurs à la fois abiotiques et biotiques (Nathan *et coll.* 2008), facteurs qui sont actuellement peu ou pas connus pour le béluga du Saint-Laurent (Mosnier et coll. 2016). D’autre part, le béluga possède une structure sociale qui semble influencer le déplacement des individus (Colbeck et coll.2013). Par conséquent, il serait pertinent de considérer l’effet de la taille et de la composition du groupe ou du troupeau sur le déplacement des bélugas afin de mieux comprendre

la dynamique spatiale des bélugas du Saint-Laurent. Ainsi, le premier chapitre du doctorat visera à déterminer le rôle relatif des facteurs abiotiques et biotiques (p. ex., quantité de proies telle que décrit dans Mosnier et coll. 2016), et de la taille et composition des groupes et troupeaux, dans le déplacement des individus.

Le deuxième chapitre visera à examiner les comportements de plongées et de surface associés aux zones de forte résidence du béluga. Les besoins écologiques et biologiques des bélugas dans l'estuaire sont différents entre les individus (p. ex., selon leur sexe et leur âge) et les fonctions associées à chaque zone restent incertaines. Les comportements de plongée et de surface du béluga ont fait l'objet d'une étude permettant de les relier entre eux et de les associer à des fonctions potentielles tels que le soin aux jeunes, ou encore l'alimentation (Lemieux Lefebvre et coll. 2018). Cependant, on ne sait pas si ces comportements et leurs fonctions potentielles sont associés à certaines zones de résidence et certaines périodes estivales. Cela sera étudié dans le deuxième chapitre de la thèse afin de mieux comprendre la sélection d'habitats par les groupes d'individus.

Le béluga, comme plusieurs autres espèces ayant un fort comportement social, se déplace au sein de groupes constitués de plusieurs individus dont le nombre et l'identité varient due à une dynamique de fusion-fission des groupes qui est encore incomprise (Aureli et coll. 2008). Le troisième chapitre de ce projet de doctorat visera donc à mieux comprendre cette dynamique de fusion-fission des groupes de bélugas, en testant notamment l'hypothèse que la fission et la fusion des groupes se font préférentiellement dans certaines zones de l'estuaire et lors d'activités comportementales spécifiques (p. ex., fusion des groupes dans des aires dédiées principalement à l'alimentation, fission dans des aires dédiées principalement au déplacement, tel qu'observé chez le bison d'Amérique; Fortin et coll. 2009).

Méthodologie

Le GREMM et le MPO vont mettre à disposition leurs bases de données décrivant la répartition spatiale des groupes et troupeaux de bélugas, et le déplacement des individus suivis par télémétrie, dans l'aire de répartition estivale de l'espèce au sein de l'estuaire du Saint-Laurent durant ces dernières décennies. Ces bases de données contiennent également l'information sur la taille et la composition des groupes et troupeaux, et les comportements de surface et de plongées des individus. Des bases de données décrivant les caractéristiques biotiques du Saint-Laurent, ainsi que la répartition spatiale de certaines proies du béluga sont également disponibles.

La réalisation de ce projet de doctorat reposera essentiellement sur l'analyse statistique de ces bases de données afin de répondre aux objectifs de recherche. Selon les besoins, des données complémentaires pourraient être récoltées sur le terrain afin de combler certaines bases de données, notamment dans des secteurs de l'aire de répartition estivale "pauvres" en données.

Retombées scientifiques anticipées

Ce projet fournira des connaissances inédites qui seront valorisées et utilisées dans le but d'améliorer la compréhension des effets du trafic maritime et du bruit sur la sélection d'habitats et le déplacement du béluga dans l'estuaire du fleuve Saint-Laurent en été. En effet, l'identification des facteurs biotiques et abiotiques qui influencent le déplacement des bélugas, ainsi que du rôle de la taille et de la composition des groupes et troupeaux dans ces déplacements, va permettre de mieux paramétrer le modèle de déplacement du béluga dans le l'estuaire du Saint-Laurent (modèle

en cours de développement). Ce modèle sera également amélioré via les nouvelles connaissances acquises sur la dynamique de fusion-fission des groupes de bélugas. Ultimement, l'ensemble des connaissances de ce projet permettront de mieux prédire à l'aide de ce modèle, les zones de développement maritime à privilégier tout en limitant les impacts sur la population de bélugas de l'estuaire du Saint-Laurent.

Références

- Aureli F *et al* (2008) Fusion-Fission dynamics : New research frameworks. *Current Anthropology* 49, 627-354
- Colbeck GJ *et al* (2013). Duchesne, P., Postma, L. D., Lesage, V., Hammill, M. O., & Turgeon, J. (2013). Groups of related belugas (*Delphinapterus leucas*) travel together during their seasonal migrations in and around Hudson Bay. *Proc R Soc B* 280 (1752), 20122552.
- Fortin D *et al* (2009) Group-size-mediated habitat selection and group fusion–fission dynamics of bison under predation risk. *Ecology* 90, 2480-2490
- Lemieux Lefebvre S, Michaud R, Lesage V & Berteaux D (2012) Identifying high residency areas of the threatened St. Lawrence beluga whale from fine-scale movements of individuals and coarse-scale movements of herds. *Mar Ecol Prog Ser*, 450, 243-257
- Lemieux Lefebvre S, Lesage V, Michaud R, & Humphries MM (2018) Classifying and combining herd surface activities and individual dive profiles to identify summer behaviours of beluga (*Delphinapterus leucas*) from the St. Lawrence Estuary, Canada. *Can J Zool* 96, 393–410
- Mosnier A *et al* (2016) Définition et caractérisation de l'habitat du béluga (*Delphinapterus leucas*) de l'estuaire du Saint-Laurent selon une approche écosystémique. Secr. can. de consult. sci. du MPO. Doc. de rech. 2016/052. vi + 93 p.
- Nathan R *et al* (2008) A movement ecology paradigm for unifying organismal movement research. *PNAS*, 105, 19052-19059

ANNEXE 2 : Communications scientifiques produites à l'an #1

Articles scientifiques publiés :

Chion C, Lagrois D et Dupras J. A meta-analysis to understand the variability in reported source levels of noise radiated by ships from opportunistic studies. *Frontiers in Marine Science*, Volume 6 (2019): 714.

Chion C, Bonnell TR, Lagrois D, Michaud R, Dupuch A. Reducing the impacts of shipping on the St. Lawrence estuary beluga population: Modelling and prediction of whale exposure to vessel noise under prospective scenarios *The Journal of Ocean Technology*, Volume 14, No 3 (2019): 138-139.

Conférences internationales:

Chion C, Bonnell TR, Michaud R, Dupras J, Dupuch A, Lagrois D, Lesage V. Can beluga exposure to shipping noise be reduced despite a traffic increase? An individual-based model to inform a noise abatement process in the St. Lawrence Estuary and the Saguenay River (2019). *The Effect of Noise on Aquatic Life Conference*, La Haye (Pays-Bas), 7-12 juillet 2019.

Chion C, Bonnell TR, Lagrois D, Michaud R, Lesage V, Dupuch A. Can beluga exposure to shipping noise be reduced despite a traffic increase? An individual-based model to inform a noise abatement process in the St. Lawrence Estuary and the Saguenay River (2019). *World Marine Mammal Conference*, Barcelone (Espagne), 9-13 décembre 2019.

Conférences nationales

Chion C. Atténuer les impacts du transport maritime sur les mammifères marins dans l'estuaire du Saint-Laurent et le fjord du Saguenay : co-construction et science au cœur de la solution (2018). *Colloque des 20 ans du parc marin du Saguenay-Saint-Laurent*, Tadoussac (QC), 17-19 octobre 2018.

Guetté A, Dupras J, Chion C. Quel est le coût de la réduction du bruit sous-marin des navires marchands dans l'habitat essentiel du béluga du Saint-Laurent ? (2019) *Colloque du Centre des Sciences de la Biodiversité du Québec (CSBQ)*, 18-20 décembre 2019.

ANNEXE 3 : Revue des mesures de réduction du bruit sous-marin rayonné par les navires marchands

REVUE DE LITTÉRATURE DES MESURES DE RÉDUCTION DU BRUIT SOUS-MARIN RAYONNÉ



Photographie Adrien Guetté, Saint-Laurent

Adrien Guetté, PhD
Université du Québec en Outaouais

Août 2019

Table des matières

1. Mesures technologiques de réduction du bruit sous-marin rayonné.....	3
1.1. Les mesures visant à réduire le bruit de cavitation.....	3
1.1.1. Conception des hélices.....	5
1.1.2. Modification du flux de sillage.....	6
1.1.3. Traitements supplémentaires.....	10
1.2. Les mesures visant à réduire le bruit de la machinerie.....	11
1.2.1. Réduction de l'intensité du bruit des moteurs.....	13
1.2.2. Réduction du bruit rayonné dans l'eau.....	14
1.3. Les mesures visant à réduire le bruit de la coque du navire.....	15
1.3.1. Conception de la forme de la coque.....	16
1.3.2. Entretien de la surface de la coque.....	16
1.3.3. Revêtements de la coque.....	16
1.3.4. Système « Masker ».....	16
1.3.5. Lubrification à air de la coque.....	17
1.3.6. Ajout de « Stern Flaps ».....	18
1.4. Autres mesures technologiques de réduction indirecte du BSR.....	18
1.4.1. Cerfs-volants de traction.....	18
1.4.2. Rotors « Flettner ».....	19
1.4.3. Voiles conventionnelles.....	21
1.4.4. Propulsion vélique.....	21
1.4.5. Alimentation à quai (« Cold Ironing »).....	22
1.4.6. Maintenance.....	23
2. Mesures opérationnelles liées à l'organisation spatio-temporelle du trafic maritime.....	24
2.1. Réduction de la vitesse des navires.....	24
2.1.1. Généralités.....	24
2.1.2. Exposition cumulée.....	25
2.2. Notification et évitement en temps réel.....	26
2.3. Modification de la répartition temporelle (saisonnière) du trafic maritime.....	27
2.4. Relocalisation des voies maritimes.....	28
2.5. Création de zones silencieuses.....	29
2.6. Convoyage (navigation par étapes).....	30
3. Mesures organisationnelles des autres « joueurs » de la chaîne logistique du transport maritime.....	31
3.1. Les administrations portuaires.....	32
3.1.1. Adaptation des installations portuaires.....	32
3.1.2. Offre d'incitatifs financiers aux navires silencieux.....	32
3.2.1. Développement d'ententes entre les clients pour la réutilisation des navires.....	33
3.2.2. Assouplissement des délais imposés par les clients pour le convoyage des navires.....	33
3.2.3. Augmentation de la capacité de stockage des clients pour adapter la saisonnalité du transport des produits.....	34

1. Mesures technologiques de réduction du bruit sous-marin rayonné

Dans cette première partie, on distingue trois catégories de mesures de réduction relevant des trois principales sources de bruit sous-marin rayonné émis par les navires : les mesures visant à réduire le bruit de cavitation des hélices, les mesures visant à réduire le bruit généré par le rayonnement des vibrations des machineries et les mesures visant à réduire le bruit hydrodynamique de la coque du navire (Renilson et al., 2012). Pour chacune des trois catégories, les mesures peuvent s'appliquer de manière non exclusive soit à la conception du navire, soit lors d'opérations de modernisation (« retrofit ») au cours de la vie du navire ou soit lors de la maintenance. Une quatrième sous-partie présente d'autres mesures technologiques qui ne sont pas directement liées à la cavitation, aux machineries et/ou à la coque mais qui peuvent permettre de réduire l'emprunte acoustique des navires. Pour chaque mesure, une estimation du coût est donnée lorsque celui-ci est disponible dans la littérature.

1.1. Les mesures visant à réduire le bruit de cavitation

La grande majorité des navires de commerce ont été conçus sans tenir compte du BSR. Pour beaucoup de ces navires, le bruit de cavitation généré par les hélices est la source dominante (Spence and Fischer, 2017). Du plus, si le BSR d'une source dépasse de 10dB les autres sources, alors celles-ci sont couvertes par la source de BSR principale. Sachant que le BSR généré par la cavitation des navires a largement le potentiel de dépasser de 10dB le BSR des machineries et des autres sources de BSR, c'est bien souvent la cavitation qui domine la signature du BSR des navires (Renilson et al., 2012).

Dans ce contexte, les mesures de réduction de la cavitation doivent être considérées en premier lieu. De manière générale, certaines hélices de par leur conception permettent de réduire la cavitation. L'optimisation de la charge de l'hélice, l'homogénéisation du flux d'eau parvenant aux hélices et l'adaptation des caractéristiques des pales (diamètre, nombre, pas, asymétrie, sections, etc.) du navire sont les principaux paramètres permettant de réduire le BSR de la cavitation.

Renilson et al., (2013) proposent cinq catégories de mesures permettant de réduire le BSR liées à la cavitation.

- Améliorer la surface des pales des hélices. Il a été montré que des imperfections sur la surface des pales liées à des chocs, des aspérités ou au dépôt de salissures entraînent une réduction de l'efficacité et l'augmentation du BSR de cavitation. Une des premières mesures consiste donc à assurer un entretien régulier des pales tout le long de la vie des navires.

- Adapter la conception des hélices aux conditions de navigation prévisibles des navires notamment en matière de chargement, de vitesse et de condition de mer.
- Optimiser certaines propriétés des hélices. Il s'agit par exemple des technologies « High Skew Propellers » ; « Contracted and Loaded Tip (CLT) propellers », « Kappel propellers » et « New Blade Section (NBS) propellers ». Ces différentes technologies relèvent de la conception des hélices. Les auteurs rappellent que ces technologies n'ont pas été vérifiées de manière indépendante et que leur efficacité à réduire le BSR n'est que supposée dans l'état actuel des connaissances.
- Modifier les interactions entre les hélices et le gouvernail des navires peut améliorer l'efficacité et donc diminuer le BSR. Plusieurs concepts ont été proposés notamment le « twisted rudder » qui permet de modifier l'angle du gouvernail en fonction du sillage principale ou le « Costa Propulsion Bulb (CPB) » qui est un concept où les hélices sont intégrées hydrodynamiquement au gouvernail par un « bulb » placé à l'arrière des hélices et relié au gouvernail.
- Changer la forme de la coque peut permettre de prendre en compte l'asymétrie de l'écoulement autour des navires.

A. Feizi Chekab et al., (2013) recensent une série de méthodes de réduction du BSR généré par les hélices. L'intérêt de l'approche provient principalement de la proposition de classification des mesures. 15 mesures sont ainsi classées en fonction de (i) leur niveau de coût et technologie requis et (ii) leur simplicité de mise en place sur les navires existants (Figure 1).

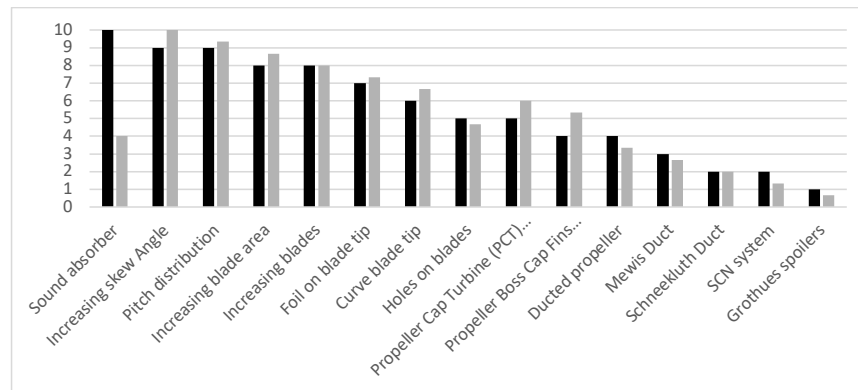


Figure 1 : Reproduit d'après A. Feizi Chekab et al., (2013). Histogramme des mesures de réduction du BSR classées sur une échelle relative en fonction du coût et de la technologie requise (barres noires) et de leur simplicité d'implantation sur la flotte existante (barres grises).

Les mesures liées à la géométrie des hélices apparaissent comme étant celles les plus contraignantes en matière de coût, de technologie et de difficulté d'implantation sur les navires existants contrairement aux mesures modifiant le champ de sillage pour le rendre plus homogène sur l'hélice.

La liste la plus exhaustive de mesures technologiques permettant de réduire la cavitation est proposée dans le rapport réalisé par VARD Marine en 2019 pour Transport Canada. Le rapport recense 27 mesures technologiques permettant de réduire la cavitation. Celles-ci sont classées entre les mesures liées à la conception de l'hélice, les mesures modifiant le flux de sillage qui se concentre sur les pales de l'hélice et les mesures liées aux traitements supplémentaires.

Pour chaque mesure, le rapport propose une matrice d'évaluation comportant les critères suivants : avantages/bénéfices, inconvénients/défis, niveau de disponibilité de la technologie, le coût estimé, l'applicabilité (type de navire et si la mesure concerne les nouveaux ou les navires existants), l'effet escompté (l'étendue des fréquences en Hz et la réduction du BSR en dB).

1.1.1. Conception des hélices

Les mesures liées à la conception des hélices présentées dans cette section sont extraites de VARD (2019).

- Réduire le nombre de tours par nœuds (*Reduction of Turns per Knot (TPK)*)

Réduire le nombre de tours d'hélice à vitesse constante. Nécessite un plus grand diamètre d'hélice.

- Augmenter l'immersion des hélices (*Increased Propeller Immersion*)

Maintenir l'hélice suffisamment immergée pour ne pas favoriser l'apparition de cavitation.

- Hélices courbées (*High Skew Propeller*)

Augmenter la courbure des pales des hélices.

- Hélices à embouts recourbés (*Contracted Loaded Tip Propellers (CLT)*)

Les hélices sont conçues avec une recourbure aux extrémités des pales, réduisant la cavitation.

- Hélice contrarotative (*Contra-rotating Propellers*)

Ajout d'une hélice tournant dans le sens inverse permet de réduire la charge sur la pale et réduire la cavitation.

- Hélices Kappel (*Kappel Propellers*)

Modification des pales d'hélice avec des pointes courbées du côté de l'aspiration. Cette technologie permet de réduire la force du vortex et ainsi la cavitation.

- Hélice à ailettes inclinées vers l'arrière (*Propeller with Backward Tip Raked Fin*)
Modification des pales d'hélice avec une courbure du côté de la pression.

- Propulseur sur pied (*Podded Propulsors*)

La propulsion fixée sur un pied peut améliorer le sillage de l'hélice et ainsi réduire la cavitation.

- Propulsion à jet d'eau (*Water Jets*)

Propulsion par jet d'eau qui réduit le BSR à partir de la vitesse de démarrage de cavitation.

- Jets à pompe (*Pump Jets*)

Utilisé dans des applications ultras silencieuses telles que les sous-marins.

- Hélice composite (*Composite Propeller*)

Utilisation de composites permettant la distorsion de la lame (pointe) sous charge afin de retarder l'apparition de la cavitation.

1.1.2. Modification du flux de sillage

Les dispositifs d'amélioration de la propulsion (PID pour *Propulsion improving devices*) sont différents dispositifs de conduits (*duct*), ailerons de pré-tourbillonnement (*pre-swirl fins*), ailerons de coque (*fin on hull*), gouvernails (*rudder*), capuchons (*caps*), hélices contrarotatives (CRP pour *contra-rotating propeller*) ou d'autres modifications apportées à la coque ou à l'hélice afin d'augmenter l'efficacité. L'objectif principal de ces appareils est de réduire la consommation de carburant en améliorant le flux autour de la coque ou de l'hélice. Les trois principales zones de modification sont l'avant de l'hélice, l'arrière de l'hélice ou les modifications sur l'hélice ou le capuchon. Les dispositifs de pré-tourbillonnement visent à améliorer les conditions d'entrée de l'hélice, les conduits peuvent améliorer l'efficacité de la propulsion, par exemple en améliorant le flux entrant de l'hélice, et des dispositifs post-tourbillonnement sont utilisés pour récupérer une partie de l'énergie de rotation dans le flux de sillage de l'hélice.

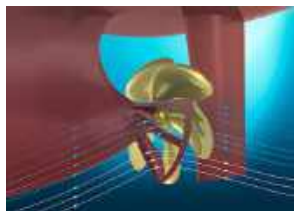
Différents dispositifs d'amélioration de la propulsion sont présentés ci-dessous.

- Optimisation du combinateur (*CPP Combinator Optimization*)

Le réglage du pas et du régime des hélices à pas réglable peut atténuer le début précoce de la cavitation, à vitesse constante et pendant les accélérations.

- Stator pré-tourbillonnement (*Pre-swirl Stator*)

Se compose de pales situées en avant de l'hélice, qui augmentent les performances du flux.



Source : Wartsila

- Conduit de *Schneekluth* (*Schneekluth Duct*)

Conduit ovale situé juste avant la partie supérieure de l'hélice et qui améliore les performances d'écoulement.



Source : Hans Buch

- Hélice Boss Cap Fin (*Propeller Boss Cap Fin (PBCF)*)

Petites ailettes situées sur le moyeu de l'hélice qui réduit la cavitation du vortex.



Photo: Mitsui O.S.K. Lines

- *Propeller Cap Turbines (PCT)*

Des pales en formes d'hydroptères intégrés dans le moyeu réduisent la cavitation du vortex, comme le PBCF.

- Ailerons Grothues (*Grothues Spoilers*)

Série d'ailerons incurvés fixées à la coque en avant de l'hélice, conçues pour améliorer l'écoulement vers l'hélice, réduire la cavitation et augmenter l'efficacité énergétique.



Crédits image : schneekluth.com

- Conduit Mewis (*Mewis Duct*)

Combinaison d'un conduit, avec des pales dans le conduit, le tout placé avant l'hélice.
Combine les effets des pales et du conduit.



Source : becker-marine-system.com

- *Promas*

Intégration de l'hélice, du « hubcap », du bulbe de gouvernail et du gouvernail dans une même unité hydrodynamique.



Source : <http://www.nauticexpo.com>

- Bulbe de propulsion Costa (*Costa Propulsion Bulb (CPB)*)

Concept où les hélices sont intégrées hydrodynamiquement au gouvernail par un « bulb » placé à l'arrière des hélices et relié au gouvernail.

- Gouvernail vrillé (*Twisted Rudder*)

Modifie l'angle du gouvernail en fonction du sillage principale.



Source : <https://www.becker-marine-systems.com>

- Corps asymétrique pour navire à simple vis (*Asymmetric Body for Single Screw Vessels*)
Le but de la conception d'un « after body » asymétrique est de prendre en compte le flux asymétrique d'une hélice à vis unique autour de la ligne médiane.

La faisabilité des opérations de retrofit sur les hélices et le gouvernail varient selon les types de navires. Les dispositifs d'égailisation du sillage et de séparation du flux sont les mieux adaptés pour résoudre les problèmes hydrodynamiques connus et les navires fonctionnant à des vitesses faibles ou moyennes. Ils sont moins efficaces lorsque la géométrie de la coque a été conçue correctement. Les dispositifs de pré-tourbillonnement peuvent être utilisés sur tous les types de navires, principalement pour les navires minces et rapides, et doivent être conçus avec l'hélice et d'autres dispositifs post-tourbillons pertinents.

D'après *the global maritime energy efficiency partnerships*, il y a quelques considérations à prendre en compte relativement aux PID. Il est important d'évaluer différents dispositifs et d'identifier ceux qui pourraient potentiellement améliorer l'efficacité en fonction du profil opérationnel du navire. Les simulations numériques de la dynamique des fluides sont recommandées pour évaluer l'efficacité des dispositifs.

Les coûts de différentes mesures d'amélioration de la propulsion sont donnés par *The Global maritime energy efficiency partnerships* (Tableau 1).

Tableau 1: Coûts d'installation d'après The Global maritime energy efficiency partnerships

Mesures d'amélioration de la propulsion	Navires concernés	Estimation des coûts d'installation
Pre-swirl	Slender and faster vessels, e.g. container and RoRo	\$250 000 – \$300 000 (USD)

Ducts	Bulky and slower vessels, e.g. bulker, tanker, multi-purpose	\$525 000 – \$575 000 (USD)
Post-swirl fins – propeller boss cap fins	All segments, especially vessels with high loaded propellers (RoRo, container)	\$100 000 – \$150 000 (USD)
Wheels – Grim vane wheel	Bulky vessels with space available	\$525 000 – \$575 000 (USD)
Bulbs – Costa bulb	All segments with slow steaming, especially container	\$250 000 – \$300 000 (USD)
Twisted rudder	All segments with slow steaming, especially container	\$650 000 – \$700 000 (USD)
Propeller optimization	All segments with slow steaming, especially container	\$250 000 – \$300 000 (USD) + material costs of 1.5 t/MW and \$7,000 USD/t unless existing propeller is recycled
Advanced propeller design – winglets – Kappel	All segments with slow steaming, especially container	\$525 000 – \$575 000 (USD)

1.1.3. Traitements supplémentaires

Cette troisième section regroupe les autres mesures qui ont le potentiel de réduire le bruit de cavitation des navires.

- Système à bulles d'air (*Air Bubbler System (Prairie)*)

L'injection d'air à travers les trous dans les extrémités des pales d'hélice remplit le vide laissé par la cavitation lorsque les hélices tournent, permettant ainsi aux bulles de cavitation de se contracter plus lentement à mesure que la zone sous pression est minimisée. Cette mesure est principalement utilisée à des fins de furtivité militaire.



Source : Official Website of the United States Navy

- Entretien des pales d'hélice (*Propeller Blade maintenance*)

Les imperfections d'une pale d'hélice peuvent favoriser la cavitation. Le polissage entre cales sèches peut empêcher cela, réduisant ainsi la cavitation.

- Revêtement anti-adhérent (*Anti-Fouling Coating* (voir 1.1.3. « revêtement de la coque »))

Appliquer un revêtement anti-adhérent à la surface d'une hélice dans le but de réduire l'encrassement.

- Modification du bord de fuite des hélices (*Application of Anti-Singing Edge*)

Modification du bord de fuite des hélices, conçu pour modifier le phénomène de perte de tourbillon naturel.

A noter que l'efficacité de beaucoup des mesures présentées n'a pas à ce jour été montrée par des études indépendantes. Voir l'annexe A du rapport VARD (2019) pour le détail de l'évaluation de chaque mesure.

Par ailleurs, une présentation détaillée et illustrée de certaines des technologies recensées par VARD (2019) peuvent être consultées dans les rapports « *reducing underwater noise pollution from large commercial vessels* » de Renilson Marine Consulting Pty Ltd (2009) et « *Comprehensive listing of possible improvement solutions and mitigation measures* » de AQUO project (2015).

1.2. Les mesures visant à réduire le bruit de la machinerie

Le BSR produit par les moteurs principaux et secondaires est principalement généré par le bruit de structure dans les fondations, qui se propagent dans la coque, renforçant les vibrations de la coque immergée et aboutissant ainsi au rayonnement final du son (Baudin and Mumm, 2015). Le niveau de BSR généré par les moteurs dépend du type de moteurs, de leur localisation dans le navire et d'autres facteurs de conception du navire (Spence and

Fischer, 2017). Il faut noter que lorsque la cavitation d'un navire est importante, le BSR des moteurs est souvent masqué. Par conséquent, le BSR des moteurs sera dominant lorsque la cavitation d'un navire est basse ce qui peut se produire notamment à vitesse réduite ou si des mesures de réduction de la cavitation ont été mises en place à la conception ou par modernisation du navire.

Tous les équipements produisent des vibrations sur leur fondation ainsi que des bruits aériens qui se répercutent sur les structures environnantes. Le bruit généré par les machineries provient de trois principales sources : la voie aérienne, le bruit transmis à la première structure et celui transmis à la seconde structure (Spence and Fischer, 2017) (Figure 2).

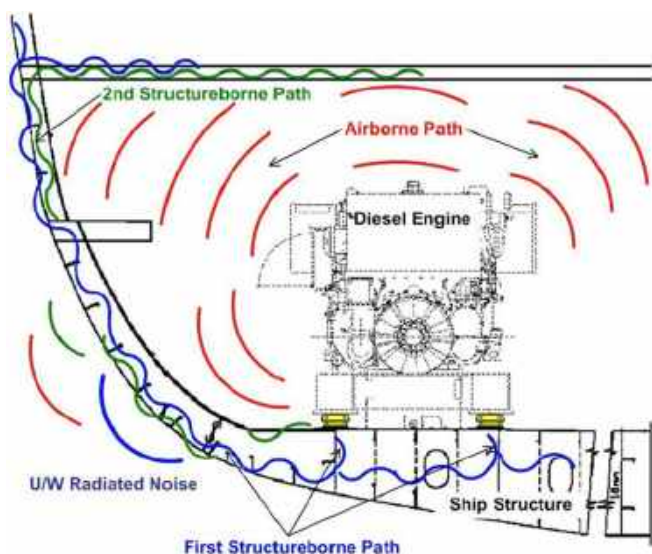


Figure 2: Schéma illustrant les chemins de transmission du bruit sous-marin provenant de machines (extrait de Spence and Fischer, 2017)

Les mesures de mitigation du BSR lié aux machineries concernent donc la réduction de l'intensité du bruit produit par les moteurs et l'isolation de la source de bruit à la coque du navire. Il faut noter que la réduction du BSR lié aux moteurs et aux vibrations nécessite une connaissance précise des caractéristiques du navire qui doivent faire l'objet d'un diagnostic. Appliquer les mesures de réduction sans cette connaissance présente le risque de n'avoir aucun effet. Les mesures doivent donc être adaptées à chaque navire.

Le rapport Hemmera Envirochem Inc (2016) synthétise les approches de réduction du BSR en cinq grandes mesures qui correspondent soit à l'utilisation de moteurs plus silencieux soit à la réduction du BSR des moteurs et des machineries. Il s'agit de l'utilisation (i) de turbines à vapeur, (ii) de moteurs diesel-électriques qui sont plus silencieux que les moteurs

Diesel deux temps conventionnels, (iii) de combinaison de technologies telles que l'alimentation par LNG, de turbines électriques et à entraînement électrique, (iv) de montures élastiques flexibles qui relient deux pièces et qui isolent des vibrations, (v) de renforcements structurels des fondations des machines et qui réduisent la transmission des vibrations à la coque.

VARD (2019) propose la revue la plus exhaustive des mesures relatives au choix de la machinerie et aux améliorations permettant de réduire les vibrations. Une synthèse de ces mesures est proposée à suivre.

1.2.1. Réduction de l'intensité du bruit des moteurs

Les premières mesures proposées concernent des alternatives aux moteurs Diesel qui constituent le choix par défaut de la grande majorité des navires de commerce.

- Électrique (diesel).

L'utilisation d'une transmission électrique plutôt que mécanique permet de nombreuses approches de réduction du BSR, allant de l'utilisation de supports et d'enceintes à la suppression active du BSR. Une plus large gamme de propulseurs est également disponible.

- Turbine à gaz / à vapeur.

Les turbines tournantes sont généralement plus silencieuses que les moteurs diesels, mais ont un rendement énergétique moindre et un coût de conception plus élevé. À l'heure actuelle, très peu de navires à vapeur sont construits (à l'exception des navires nucléaires), mais de nombreux navires de guerre utilisent des turbines à gaz pour une densité de puissance élevée.

- Moteur Stirling.

Le moteur Stirling à combustion externe produit moins de bruit que les moteurs à combustion interne conventionnels. Les caractéristiques de suivi de charge sont relativement faibles et il est donc difficile d'avoir des variations rapides de puissance. Les utilisations principales sont les sous-marins et les navires de guerre pour réduire le bruit rayonné.

- Propulseurs « azimuthing ».

Les propulseurs en azimuth peuvent avoir des moteurs à l'intérieur de la coque avec engrenages de transmission (électromécaniques) ou à l'extérieur de la coque dans un carénage d'hélice (entièrement électrique). L'un ou l'autre type peut avoir des avantages en termes de BSR de propulseurs, tandis que les moteurs entièrement électriques ont un BSR de moteur électrique. Les informations à ce sujet sont limitées.

1.2.2. Réduction du bruit rayonné dans l'eau

Les mesures présentées dans cette section permettent de réduire le bruit rayonné dans l'eau sans modification du bruit généré par les machineries.

- Supports résilients (équipement).

Les supports à ressorts empêchent la transmission de l'énergie vibratoire des machines et la génération d'énergie dans l'eau par la coque. Nécessite une sélection et une installation appropriées des supports. Cette technique est peu adaptée aux moteurs Diesels deux-temps en raison du poids trop important.

- Plancher flottant (pont).

Un pont flottant est construit et monté de manière résiliente sur le pont, isolant efficacement toutes les machines du faux pont. Cette technique s'applique seulement aux équipements légers.

- Fondation « raft » (système d'isolation de vibration de double étape).

Le moteur est monté sur une couche supérieure, supportée par une structure en acier, qui est également supportée par la poutre de coque sur un ensemble de supports de niveau inférieur. Cela réduit le BSR en créant une barrière supplémentaire à la transmission des vibrations. Cette technique est également peu adaptée aux moteurs Diesel deux-temps en raison de leur poids élevé.

- Enceintes acoustiques.

Structures conçues pour contenir une machine spécifique, en absorbant les bruits aériens. Cette technique réduit la transmission d'énergie par l'air à la coque. Elle est généralement utilisée uniquement avec les plus petits moteurs diesel et turbines à gaz.

- Annulation active.

Réduction de l'excitation mécanique de la structure de coque par excitation secondaire pour annuler l'excitation d'origine. Utilise des capteurs pour mesurer l'excitation, un dispositif pour lire le capteur et des actionneurs pour produire une excitation en contre phase. Le coût est très élevé.

- Éperon.

La conception des engrenages peut être utilisée pour optimiser le nombre de dents et l'angle de changement de profil. Cela optimisera la réduction du BSR des dents, réduisant ainsi le bruit des machines. Nécessite également une fabrication de haute qualité.

- Contrôle du débit des gaz d'échappement.

Composant d'écoulement d'échappement conçu pour réduire le BSR produit par la détente soudaine des gaz d'échappement d'un moteur diesel à 2 temps.

- Mousses métalliques.

Les mousses métalliques sont spécialement conçues pour la dissipation acoustique du BSR des machineries. Elles peuvent être utilisées comme revêtement à l'intérieur des réservoirs de carburant. Le revêtement intérieur de la paroi de la citerne avec la mousse métallique pourrait entraîner une réduction de 10 dB du son transmis à l'océan si celle-ci est correctement conçue.

- Structure (épaississement de la coque / poutre / plancher).

L'épaisseur des éléments structurels est directement liée à l'atténuation du BSR. La structure rigide crée un décalage d'impédance et est particulièrement efficace avec des montages élastiques.

- Tuiles d'amortissement structurel.

L'application de tuiles d'amortissement intégrées dans la structure d'un navire absorbe l'énergie de vibration et entraîne une réduction du BSR.

- Revêtement de découplage acoustique.

Couche de mousse de caoutchouc ou de polyéthylène appliquée sur l'extérieur de la coque du navire, conçue pour réduire le rayonnement sonore de l'énergie vibratoire des machines. Cette technique est le plus souvent appliquée aux sous-marins.

Les mesures liées à la réduction du BSR des machines concernent principalement la phase de construction de nouveaux navires plus que les navires existants en raison des coûts souvent importants (Baudin et Mumm, 2015).

1.3. Les mesures visant à réduire le bruit de la coque du navire

La forme de la coque a une influence considérable non seulement sur la puissance nécessaire à la propulsion du navire, mais également sur le bruit hydroacoustique se propageant à partir de son hélice. Une coque bien conçue nécessitera moins d'énergie pour une vitesse donnée, ce qui entraînera également moins de BSR dans l'eau. De plus, une forme de coque bien conçue assurera un flux de sillage entrant à l'hélice plus uniforme, augmentant l'efficacité de la propulsion et réduisant le BSR et les vibrations causés par l'écoulement de sillage irrégulier (Renilson Marine Consulting Pty Ltd, 2009).

Les caractéristiques de la coque ont donc un triple enjeu pour la réduction du BSR de par le BSR hydroacoustique, le BSR transmis par les machineries et le flux de sillage plus ou moins homogène qui parvient à l'hélice. Plusieurs mesures d'entretien, de modernisation et de conception permettent de réduire le BSR de la coque même s'il est reconnu que les mesures les plus efficaces doivent être adoptées à la conception du navire (Southall and Scholik-Schlomer, 2008).

1.3.1. Conception de la forme de la coque

Bien que les caractéristiques principales de la coque soient généralement bien optimisées, on observe toutefois une variation importante du degré d'optimisation de la forme de la coque et de l'hélice d'un chantier naval à un autre. Une série complète de tests par modélisation informatique de la dynamique des fluides est nécessaire pour optimiser pleinement la forme de la coque. Les chantiers navals ont tendance à optimiser autour du tirant d'eau et de la vitesse de conception spécifiée, mais accordent moins d'attention à l'efficacité du tirant d'eau de ballast, et peu ou pas d'attention aux conditions de charge partielle.

Coût de mise en œuvre.

Lorsque l'optimisation de la forme de la coque est envisagée, il est avantageux d'inclure les navires sœurs dans l'analyse CFD afin de réduire les coûts pour la flotte. Le coût d'une analyse CFD complète visant à déterminer la forme optimale de la coque d'un navire spécifique sera compris entre 150 000 et 500 000 USD. Données d'après <https://glomeep.imo.org>

1.3.2. Entretien de la surface de la coque

Un mauvais entretien peut entraîner une augmentation de la résistance. Renilson Marine Consulting Pty Ltd, (2009) suggère un entretien tous les six mois (voir 1.1.5. Maintenance des navires).

1.3.3. Revêtements de la coque

Les revêtements réduiront la résistance de la coque du navire à l'eau, réduiront la puissance nécessaire du moteur et réduiront le BSR des machines et le BSR du frottement de la coque dans l'eau. Le revêtement de coque est applicable à tous les types et âges de navires. Les navires sont généralement recouverts tous les cinq ans. En appliquant un revêtement haute performance, la résistance de la coque peut être réduite. Le potentiel de réduction de la résistance au frottement sera plus élevé pour les navires entiers comme les vraquiers et les pétroliers. Pour les navires existants, les navires les plus anciens présentent un potentiel plus élevé. Pour ces navires, on suppose que le sablage de la coque sera nécessaire pour obtenir le plein effet. La mesure entraînera une dépense en capital tous les cinq ans lorsque le navire sera en cale sèche.

Le coût du revêtement de la coque dépend de la taille et du segment du navire et son prix variera en fonction du produit choisi. Cependant, on peut s'attendre à un prix compris entre 30 000 et 500 000 USD (d'après <https://glomeep.imo.org>)

1.3.4. Système « Masker »

Le système Masker correspond au système « Prairie » (utilisé pour masquer une partie du bruit de cavitation de l'hélice, voir 1.1.3) pour la coque. La technologie Masker forme un écran de bulles d'air autour de la coque du navire, réduisant ainsi la transmission du bruit des machines aux eaux environnantes. Masker crée un décalage d'impédance acoustique entre la coque et l'eau, grâce aux ceintures de masquage situées autour de la coque, créant ainsi une couverture de bulles d'air entre le bruit des machines de la coque et l'eau. L'air Masker dissimule le bruit des machines basse fréquence qui rayonne à travers la coque. Cette technologie est surtout utilisée sur les navires militaires.



Le navire, à gauche sur la photographie utilise la technologie Masker.
Source : Military Analysis Network.

1.3.5. Lubrification à air de la coque

La technique consiste à injecter de l'air sur les surfaces mouillées de la coque pour améliorer les caractéristiques hydrodynamiques du navire. Le système, entraîné par un moteur auxiliaire, crée un coussin d'air sur la partie inférieure plate du navire. La croissance des salissures sur la coque est réduite en raison de la diminution de la surface mouillée lors de l'utilisation d'un système à cavité d'air, ce qui contribue à minimiser la résistance à la traînée. Cette mesure aura pour avantage de réduire la consommation de carburant en raison de la résistance réduite de la coque et donc de la diminution de la charge du moteur principal.

Plusieurs constructeurs de navires ont introduit des systèmes de lubrification à air (ALS) afin de réduire la résistance au frottement de la coque et ainsi réaliser des économies d'énergie. Les constructeurs annoncent des réductions substantielles de la résistance, mais qui n'ont pas été confirmées par des études indépendantes. Il existe présentement au moins deux navires de croisières (Le *Diamond Princess* de Princess Cruise Lines et le Norwegian Joy de Norwegian Cruise Lines) ainsi qu'un tanker (le Amalienborg de Weco Takers) équipés d'un système à bulles d'air.

Il a été suggéré de mener des études sur ces navires pour tester l'efficacité du système à réduire le BSR (Bahtiaran, 2019).

Le coût de mise en œuvre est compris entre 2% et 3% du coût de la nouvelle construction pour un navire.

1.3.6. Ajout de « Stern Flaps »

Les « Stern Flaps » sont d'extensions placées à l'arrière du navire qui par la modification de la vague arrière permet de réduire la consommation et le BSR. Les « Stern Flaps » peuvent être ajoutés au cours d'opération de modernisation des navires à l'image des navires de l'US Army.

1.4. Autres mesures technologiques de réduction indirecte du BSR

1.4.1. Cerfs-volants de traction

Le cerf-volant fonctionne à partir de l'énergie éolienne qui est transférée sur le navire et entraîne une réduction de la puissance moteur nécessaire pour déplacer le navire. Dans des conditions normales, le cerf-volant génère une force de traction sur le navire qui peut être traduite en une puissance moteur équivalente.

D'après Comer (2019) seulement quelques navires utilisent ou ont utilisé des cerfs-volants, notamment le *Michael A.* un cargo général, le *M/V Theseus*, le *M/V BBC Skysails* et le vraquier *Aghia Marina*. Tous ces navires utilisent la technologie de SkySails, qui revendique un potentiel d'économie de carburant de 10% à 15% et une production pouvant atteindre 2 000 kW (www.skysails.info).

Traut et al., (2014) ont estimé que la puissance de sortie d'un cerf-volant de remorquage se situerait entre 127 kW et 461 kW dans une étude de cas de cinq routes commerciales potentielles. Selon les navires, cela pourrait entraîner des économies de 1% à 32% en énergie courante et en carburant. Leloup et al., (2016) ont utilisé un modèle analytique pour évaluer les performances d'un cerf-volant en tant que source d'alimentation auxiliaire. Un cerf-volant de 320 m² sur un pétrolier de 50 000 t_{pl}, permettrait par exemple d'économiser 10% de carburant avec une vitesse de vent de 10 m / s et jusqu'à 50% à 15,6 m / s. Traut et ses collègues (2014) ont noté que les performances des cerfs-volants sont plus volatiles que les voiles à rotor, mais ont néanmoins conclu que les cerfs-volants sont une solution à faible émission de carbone qu'il convient de continuer à prendre en compte. Enfin Shukla et Ghosh, (2009) mesurent une économie d'environ 8,3% de carburant diesel sur un transit Mumbai en Inde à Durban en Afrique du Sud.

D'après GloMEEP, le système fonctionne mieux pour les navires de plus de 30 mètres et dont la vitesse est inférieure à 16 nœuds, quel que soit leur âge. Un autre facteur important est la durée d'utilisation des cerfs-volants et leur effet. En raison des vents dominants et d'autres limitations du système de cerf-volant, il est supposé que les cerfs-volants ne peuvent être utilisés que 20% à 30% du temps. Les cerfs-volants sont plus favorables sur les longs échanges internationaux.

Toutefois, cette technologie n'est pas considérée comme mature selon GloMEEP et sa capacité à réduire le BSR n'est que supposée.



Un exemple de navire avec cerf-volant est le MV « Beluga » où une installation de test est utilisée depuis 2008. Source : Skysails

Table X. Coût des voiles en fonction de leur taille, d'après Glomeep.imo.org¹

Taille de la voile [m ²]	Coût d'achat [USD]
160	280 000
320	480 000
640	920 000
1 280	1 755 000
2 500	2 590 000
5 000	3 420 000

1.4.2. Rotors « Flettner »

Les rotors Flettner sont des cylindres verticaux qui tournent et développent une portance due à l'effet Magnus lorsque le vent les traverse. Les rotors Flettner doivent être entraînés mécaniquement pour développer la force de levage et de propulsion. La manœuvrabilité est limitée par la vitesse et la direction du vent. Les rotors Flettner peuvent réduire la consommation d'énergie d'un navire, mais ils ne peuvent pas être utilisés comme propulsion principale.

Les rotors Flettner ont été utilisés sur plusieurs navires de commerce ces dernières années, dès la conception (p. ex. le vraquier Afros de 63 000 tpl) et au moins trois rénovations en 2018, dont le navire de croisière Viking Grace de 2 800 passagers, le cargo polyvalent Fehn

¹ <https://glomeep.imo.org/technology/kite/>

Pollux de 4 250 dwt et le pétrolier Maersk Pelican de 110 000 dwt. L'un des navires les plus célèbres avec des voiles à rotor est le E-Ship 1 (voir illustration). Les voiles à rotor peuvent être montées sur un navire existant et peuvent se rétracter pendant le chargement et le déchargement. En appliquant un modèle numérique, Traut et al (2012) ont estimé qu'il est possible d'atteindre 16% d'économie de carburant pour un vraquier type équipé de trois rotors Flettner sur un itinéraire allant de Tubarao (Brésil) à Grimsby (Royaume-Uni). Cela représente environ 5,3% d'économie par rotor. Plus tard, Traut et ses collègues (2014) ont modélisé des itinéraires supplémentaires dans cinq études de cas et ont constaté que la contribution éolienne moyenne était comprise entre 193 kW et 373 kW par rotor, soit l'équivalent de 2% à 24% d'économie de carburant pour un navire type. De Marco et al., (2016) ont conclu que deux rotors Flettner pourraient fournir jusqu'à 30% des besoins en puissance de propulsion d'un navire-citerne de 75 000 tnl. Enfin Talluri et al., (2018) ont affirmé que les voiles de rotor pourraient permettre d'économiser jusqu'à 20% de carburant pour les cargos commerciaux, à condition que trois rotors soient installés. Toutefois, comme le souligne l'étude de Talluri et al., l'implémentation de rotors n'est économiquement viable que sous certaines conditions de routes, de configuration initiale du navire et de la projection du prix de la taxation carbone qui pourrait être mise en place dans les années à venir.

Concernant la navigation marchande, cette technologie est considérée, dépendamment des sources, comme pas toujours mature et sa capacité à réduire le BSR n'a pas été explicitement testée.



Flettner rotor on E Ship 1, source: IWSA

Le coût de mise en œuvre pour un rotor Flettner va de 400 000 USD à 950 000 USD selon la taille du rotor. La taille d'une livraison type avec plusieurs voiles à rotor commence entre 1 000 000 et 3 000 000 USD.

Le potentiel de réduction de consommation est compris entre 3% et 15% sur la consommation de carburant du moteur principal, en fonction de la taille du navire, du segment, du profil d'exploitation et des zones d'activité. Les données concernant la réduction du BSRs sont absentes.

D'après <https://glomeep.imo.org>

1.4.3. Voiles conventionnelles

Les installations fixes sur le navire sous forme de voile flexible, de voile rigide ou de « turbosail » peuvent utiliser le vent pour remplacer une partie de la puissance de propulsion nécessaire. Les trois options ont des avantages et des inconvénients et doivent être choisies en fonction du type, du commerce et de la taille du navire. Les économies dépendent fortement des conditions de vent dans lesquelles le navire évolue.

Les voiles ne peuvent être considérées que pour les navires disposant de suffisamment d'espace ce qui exclut souvent les porte-conteneurs. Il n'y a pas de limite d'âge pour les voiles ou les ailes fixes. La stabilité due au poids élevé et à la force supplémentaire exercée par les voiles n'est pas considérée comme un problème pour les navires. On suppose que les mâts et les voiles peuvent fournir une puissance d'environ 710 kW par mât installé, ce qui se traduira par une poussée vers l'avant et réduira la puissance nécessaire du moteur principal. L'effet de chaque mât pourra atteindre 1 200 kW en 2020 et rester constant par la suite. L'effet de chaque mât varie en fonction du vent et ne sera donc pas efficace en continu. On estime que les voiles seront opérationnelles 15% du temps. L'effet et l'applicabilité de cette mesure dépendent également de la vitesse de fonctionnement (le plus utile dans la plage de vitesse inférieure).

Coût de mise en œuvre : le prix par mât (installation comprise) devrait diminuer en fonction du nombre de mâts installés à bord. Ainsi, le coût en capital impliqué variera entre 170 000 et 300 000 USD par mât installé.

Le potentiel de réduction dépend de la taille du navire, du segment, du profil d'exploitation et des zones commerciales. Le potentiel de réduction probable est estimé entre 1% et 10% de la consommation de carburant du moteur principal.

D'après <https://glomeep.imo.org>

1.4.4. Propulsion vélique

Des innovations relatives à la conception de navires marchands à voiles arrivent également à maturité. C'est notamment le cas de Neoline qui construit présentement deux navires

rouliers de 136 mètres. Dotés chacun de deux mâts, ces navires pourront transporter l'équivalent de 280 conteneurs ou de 500 voitures. La motorisation servira uniquement aux équipements de bord et aux manœuvres portuaires. Le constructeur annonce une réduction de 80 à 90 % de la consommation. Les données concernant le BSR des navires ne sont pas disponibles mais en condition de navigation par voile, le BSR généré par le navire devrait être réduit à la coque. Des navires plus grands (210 m de long), équipés de trois mâts, sont envisagés à l'horizon 2030. Le premier navire devrait relier à partir de 2022 Saint-Nazaire à Baltimore (Etats-Unis) avec une escale au retour à Saint-Pierre et Miquelon.



Navire de type ro-ro fabrique par Neoline. Source : Neoline

Le coût total des deux bateaux est estimé entre 80 et 90 millions d'euros.
--

1.4.5. Alimentation à quai (« Cold Ironing »)

Le « cold ironing » est le processus qui consiste à fournir de l'énergie à un navire à quai pendant que ses moteurs principaux et auxiliaires sont éteints. Cette mesure permet de réduire le BSR généré par les navires à quai.

L'alimentation à quai peut être installée pour tous les types de navires nécessitant de l'énergie dans les ports. Elle est utilisée depuis des années, en particulier pour les plus petits navires, mais également pour certains navires à passagers de grande taille. Le fait que les petits navires tirent leur énergie du réseau de distribution terrestre lorsque leur bateau est amarré n'est pas un phénomène nouveau. La puissance à terre a été largement utilisée pendant de nombreuses années pour les navires à puissance modérée, généralement moins de 50 à 100 kW. Ces navires sont capables d'utiliser la tension et la fréquence normales du réseau et de remplacer l'énergie des générateurs par l'alimentation à quai par des investissements marginaux.

Pour les plus grands navires avec des exigences de puissance plus élevées (100 kW jusqu'à 10 à 15 MW), des installations spécifiques et relativement coûteuses sont nécessaires, à la fois à terre et à bord des navires. Cela peut inclure la mise à niveau de la capacité du réseau,

des convertisseurs de fréquence et des connecteurs complexes haute puissance. Par conséquent, peu de navires et de ports sont capables d'utiliser la puissance à terre, même si les avantages environnementaux sont considérables. Néanmoins, le « cold ironing » peut être considéré comme une technologie mature utilisée régulièrement depuis les années 1980. Le coût de mise en œuvre (<https://glomeep.imo.org>) est présenté au Tableau 2.

Tableau 2: Coût estimé de la mise en œuvre de l'alimentation à quai à bord des navires

	1000 – 4999	5000 – 9999	10000 – 24999	25000 – 49999	50000 – 99999	>= 100000
(USD)	GT	GT	GT	GT	GT	GT
Crude tankers	\$50 000 – \$350 000	\$100 000 – \$400 000	\$100 000 – \$400 000	\$100 000 – \$400 000	\$300 000 – \$750 000	\$300 000 – \$750 000
Chemical / product tankers	\$50 000 – \$350 000	\$100 000 – \$400 000	\$300 000 – \$750 000	\$300 000 – \$750 000		
Gas tankers	\$50 000 – \$350 000	\$300 000 – \$750 000	\$300 000 – \$750 000	\$300 000 – \$750 000	\$300 000 – \$750 000	\$300 000 – \$750 000
Bulk carriers	\$50 000 – \$350 000	\$50 000 – \$350 000	0,5 – 3 Mill	0,5 – 3 Mill	\$100 000 – \$400 000	
General cargo	\$50 000 – \$350 000	\$50 000 – \$350 000	0,5 – 3 Mill	\$100 000 – \$400 000		
Container vessels	\$50 000 – \$350 000	\$50 000 – \$350 000	\$100 000 – \$400 000	\$300 000 – \$750 000	\$300 000 – \$750 000	\$300 000 – \$750 000
Ro Ro vessels	\$50 000 – \$350 000	\$50 000 – \$350 000	\$100 000 – \$400 000	\$100 000 – \$400 000	\$300 000 – \$750 000	

1.4.6. Maintenance

Plusieurs études ont montré que l'entretien régulier des hélices et de la coque pouvait réduire le BSR des navires (Baudin and Mumm, 2015; Southall, 2005). Dans certains cas, les navires mal entretenus peuvent constituer des contributeurs disproportionnés au BSR total dans une zone. L'identification et la réparation de ces navires exceptionnellement bruyants peut entraîner une réduction substantielle du BSR (McKenna et al., 2013). Renilson (2009) suggère une inspection des hélices et de la coque tous les 6 mois, avec un entretien approprié chaque fois que le navire est en cale sèche quel que soit la raison. Baudin et Mumm (2015) estiment que l'entretien régulier permettrait une réduction de 1–2 dB.

Le nettoyage de la coque s'applique à tous les types et âges de navires. En fonction du degré et du type d'encrassement à éliminer, un plongeur peut nettoyer 200 à 400 m2 par

heure de surfaces planes (moins sur les parties avant et arrière). L'opération peut être effectuée pendant les escales normales (soutage, mouillage, attente du passage par le canal, etc.).

Le coût lié au nettoyage et aux réparations légères des hélices est estimé à 20 000 USD (Renilson Marine Consulting Pty Ltd, 2009).^t

Le prix du nettoyage de la coque dépendra du choix entre un plongeur et un véhicule télécommandé, en plus de la taille du bateau. Le coût total sera compris entre 5 000 et 50 000 USD.

2. Mesures opérationnelles liées à l'organisation spatio-temporelle du trafic maritime

Dans cette deuxième partie, une série de mesures opérationnelles de mitigation du bruit liées à la navigation est présentée à partir de la littérature. Les mesures opérationnelles sont ancrées dans un espace donné et ont pour but de modifier la quantité et la répartition spatio-temporelle du bruit sous-marin. Les mesures présentées ont une portée spatiale et temporelle très large, qui va de la notification en temps réel, qui vise à réduire le bruit sur un petit espace – temps jusqu'aux réductions de vitesse des navires qui permet de diminuer le bruit de manière continue et dans tous les espaces empruntés par les navires.

2.1. Réduction de la vitesse des navires

2.1.1. Généralités

La vitesse des navires constitue un des facteurs intrinsèques les plus fortement corrélés au BSR (McKenna et al., 2013). Chion et al., (2018) ont montré à partir de l'analyse des données reconstituées de sept études, une relation linéaire positive entre le bruit et la vitesse (+1.09 dB re 1 µPa²). Cette même étude rapporte que tous les travaux (N=10) montrent une relation positive entre la réduction de la vitesse et le BSR. Ces réductions s'étendent de 0.36 dB/nœud à un maximum de 2.65 dB/nœud.

On peut en conclure qu'à l'échelle d'une zone définie, la réduction de la vitesse des navires entraînera systématiquement une diminution du BSR.

A l'échelle individuelle des navires, les auteurs s'accordent à dire qu'il existe une variabilité importante de la relation vitesse et BSR. L'étude du programme ECHO² a défini

² <https://www.portvancouver.com/wp-content/uploads/2017/05/2017-11-09-Preliminary-results-of-slowdown-trial-Summary.pdf>

différentes relations BSR vs vitesse en fonction des classes de navire (Tableau 3). Cette variabilité s'étend de 1.31 dB kn⁻¹ pour les navires de passagers à 2.23 dB kn⁻¹ pour les vraquiers et les cargos en général.

Tableau 3: Relation vitesse vs BSR, rapportée par le programme ECHO (Port Metro Vancouver)

Classe de navire	SL vs Vitesse
Vraquier / cargo général	2.23 dB kn ⁻¹
Porte-conteneur	1.36 dB kn ⁻¹
Passagers	1.31 dB kn ⁻¹
Transport de véhicules	1.60 dB kn ⁻¹
Navire-citerne	n.d.

De plus, cette variabilité peut également s'exprimer au sein d'une même classe de navires en raison des caractéristiques uniques des navires.

Par exemple, Kipple (2002), n'observe pas de réduction significative du BSR pour les navires équipés de moteurs Diesel-électriques. La relation vitesse vs BSR est également très dépendante du type d'hélice. Pour les navires équipés d'hélices à pas variable, la réduction de la vitesse n'a aucune incidence sur le BSR et peut même entraîner son augmentation (Audoly et al., 2016). Enfin, la variabilité de la relation s'explique par la vitesse initiale de cavitation (Cavitation Inception Speed, CIS) unique à chaque navire et à chaque condition puisqu'elle dépend à la fois de la conception du navire (conçu pour des conditions spécifiques) et de son entretien. La réduction de la vitesse sera d'autant plus efficace que celle-ci permettra d'atteindre une vitesse inférieure à la vitesse initiale de cavitation (IMO, 2014).

2.1.2. Exposition cumulée

Il faut noter que la réduction de vitesse implique une durée d'exposition au BSR plus longue pour une zone donnée. Afin de réduire le BSR global du transport maritime, il est nécessaire de prendre en compte l'exposition cumulée, qui peut être calculée par le BSR sur une durée spécifique. Cette mesure permet de calculer la réduction nette obtenue en intégrant l'émission de dB supplémentaire lié au ralentissement. McKenna et al., (2013) ont proposé une équation permettant de calculer la réduction nette d'exposition au BSR.

Plusieurs approches de simulation ont été menées pour comparer différents scénarios d'exposition en fonction du niveau de BSR et de la durée (voir par exemple Chion et al., 2017; Williams et al., 2019, Figure 3).

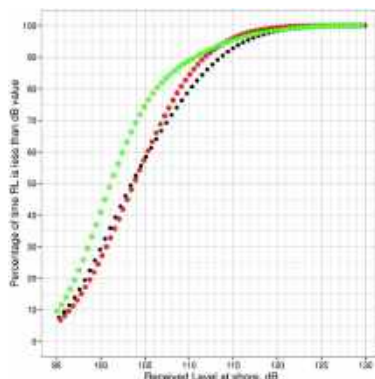


Figure 3: D'après Williams et al. 2019. Distribution cumulée du niveau reçu à Lime Kiln. Chaque courbe représente le pourcentage de temps (par exemple, heures de la journée) pendant lequel le niveau reçu à Lime Kiln est inférieur à un niveau donné. La courbe noire représente la distribution modélisée pour les conditions actuelles (paramétrée avec les niveaux de source de navire observés et la distribution temporelle), par ex. 50% du temps, niveau reçu est <104 dB. La courbe rouge représente la distribution modélisée pour une limite de vitesse de 11.8 kt. La courbe verte représente une option de gestion impliquant à la fois une limitation de vitesse de 11.8 kt et une approche par convoi.

2.2. Notification et évitement en temps réel

Plusieurs systèmes de détection en temps réel et de notification existent. Les contraintes de cette approche sont liées notamment à la méthode de détection (humaine, automatique), à l'emprise spatiale couverte et le moyen de transmission de l'information pour déclencher une mesure rapide des opérateurs ou des navires.

La surveillance en temps réel des cétacés a été envisagée par exemple pour le battage de pieux lors de la construction de parcs éoliens en Allemagne (Berkowitz and Dumez, 2017). Une bouée d'écoute en temps réel avertit les marins de la présence de baleines franches de l'Atlantique Nord afin de réduire le risque de collision avec les navires. Dans ce cas, un dispositif d'hydrophones statiques enregistre en continu sur une zone donnée.

Une autre approche de surveillance en temps quasi réel est développée par l'université de Dalousie. Un outil cartographique interactif <https://whalemap.ocean.dal.ca/> affiche les emplacements récents connus des baleines au fur et à mesure qu'elles se déplacent. La carte indique en temps quasi réel l'information de détection des baleines transmise par divers partenaires de Pêches et Océans Canada, qui contribuent aux efforts de détection par voie

aérienne, maritime et par planeur sous-marin acoustique (Baumgartner et al., 2013) afin de repérer les baleines noires de l'Atlantique Nord.

L'approche de détection par les navires est celle envisagée au sein du sanctuaire Pelagos. Le déploiement du système REPCET (repérage en temps réel des cétacés) se base sur la collaboration des compagnies maritimes s'engageant dans la prévention des collisions entre leurs navires et les baleines. Chaque navire équipé de REPCET transmet par satellite les observations visuelles de cétacés, réalisées par les officiers de quart, à un serveur situé à terre. Après avoir centralisé les données, ce serveur cartographie les positions des cétacés.

Quels que soient les moyens de détection, l'enjeu relève ensuite de la transmission de l'information pour déclencher une mesure de réduction des impacts. La carte *whalemap* permet avant tout d'adopter des mesures rapides par les autorités (réduction de vitesse, zone d'évitement), mais ne permet pas d'adapter une mesure à l'échelle d'un navire. Par exemple, La NOAA utilise les détections en temps réel de baleines noires pour alerter les marins via l'AIS via leur application WhaleAlert3. Dans le cas de REPCET, le système diffuse des alertes aux navires équipés et concernés par les zones à risque. Cette dernière approche est donc réduite aux seuls navires volontaires ayant acquis l'équipement spécifique pour recevoir les messages d'alerte.

De manière générale, la mise en place d'un système de détection automatique devra être adaptée au contexte géographique puisque le déclenchement d'une mesure par les navires sera confronté aux impératifs liés à la sécurité maritime. Il est donc peu probable d'atteindre une réponse réellement immédiate des navires (Williams et al. 2019). Une étude sur l'efficacité des détections de cétacés en temps réel par des observateurs de mammifères marins sur des navires de levés sismiques a révélé que les navires n'étaient tout simplement pas en mesure de réagir assez rapidement à la détection d'une baleine pour pouvoir réduire le risque (Leaper et al., 2015).

L'utilisation d'un système de détection des bélugas pour déclencher en temps réel des mesures de mitigation du BSR devrait relever plusieurs défis liés notamment à la détection automatique, la transmission rapide de l'information aux navires et à leur capacité d'adaptation dans le contexte de navigation parfois difficile du Saguenay.

2.3. Modification de la répartition temporelle (saisonnière) du trafic maritime

Étant donné que la plupart des espèces de mammifères marins sont migratrices, l'adaptation temporelle du trafic maritime en fonction des périodes de présence constitue une mesure de mitigation à considérer (Williams et al. 2019). Toutefois, la réorganisation temporelle du trafic doit être envisagée dans le cadre d'une connaissance précise de la distribution des animaux dans leur habitat tout au long de l'année. La concentration du trafic sur les périodes d'absence ou de faible présence permettrait de réduire l'exposition

totale. À notre connaissance, il n'existe pas d'expérimentation sur la concentration des transits à une période de l'année qui permettrait d'évaluer la faisabilité d'une telle mesure dans le contexte du Saint-Laurent. Cette approche est à considérer avec contraintes temporelles commerciales de l'acheminement des produits et matières transportés et des contraintes logistiques liées notamment de la navigation hivernale dans le Saguenay, Saint-Laurent.

À titre d'illustration, on observe dans le Saguenay une concentration des transits sur la période de juillet à octobre (Figure 4) alors que les mois de novembre à avril enregistrent entre 2 et 4 fois moins de passages.

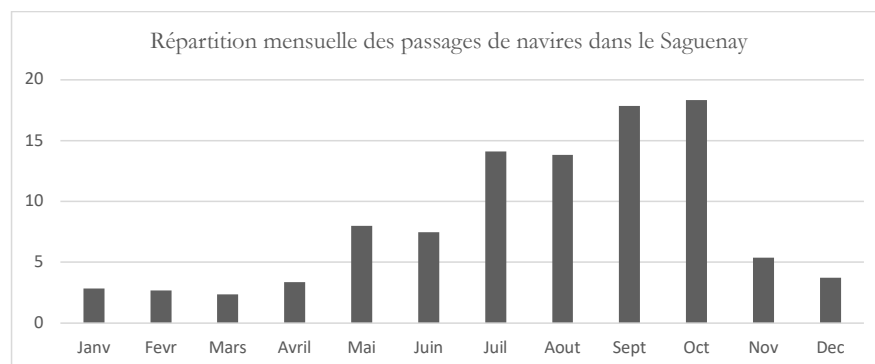


Figure 4: Répartition mensuelle en pourcentage des passages de navires marchands au départ ou à destination des ports de Chicoutimi et de La Baie, d'après les données INNAV 2009 – 2018.

2.4. Relocalisation des voies maritimes

L'avantage potentiel direct de la modification des routes de navigation est de réduire les niveaux et la durée d'exposition au BSR en augmentant la distance entre les navires générant le BSR et les individus occupant un habitat donné (MPO, 2018). Si cette mesure entraîne une augmentation potentielle des pertes de propagation du BSR entre le navire et les mammifères marins, elle entraînera toutefois une augmentation des niveaux d'exposition au BSR dans la zone entourant la nouvelle voie de navigation. Autrement dit, cette mesure propose de reporter le BSR sur un espace considéré moins sensible.

L'efficacité d'une telle mesure dépend fortement de plusieurs paramètres qui ont été identifiés pour le cas des Épaulards (population résidente du sud du Pacifique Nord-Est) (MPO, 2018). Il s'agit :

- des connaissances disponibles sur la fréquence et la durée auxquelles les baleines utilisent les différentes parties de son habitat essentiel,
- de la propagation du son entre la nouvelle voie de navigation et la présence des animaux,

- de la sensibilité de l'espèce à des fréquences acoustiques spécifiques par rapport à la propagation de ces fréquences sonores en considérant que les niveaux de BSR diminuent plus rapidement près de la source et que les fréquences élevées diminuent plus rapidement que les basses,

- des caractéristiques de propagation du son. Ces caractéristiques sont définies par : la profondeur de l'eau, le fond marin, l'état de la mer, la vitesse du son dans la colonne d'eau qui elle-même dépend de la profondeur, de la température et de la salinité, ainsi que de la fréquence du son. Il est ainsi difficile de prédire l'efficacité potentielle de cette mesure d'atténuation, étant donné que plusieurs de ces paramètres varient dans l'espace et le temps.

Il faut noter que dans le contexte du Saint-Laurent, les possibilités de relocalisation des voies de navigation sont restreintes pour le Saint-Laurent et minimales pour le Saguenay en raison des contraintes topographiques et de sécurité maritime. Enfin, Williams et al. (2019) ne trouvent pas de différences systématiques en fonction de la localisation des voies de navigation dans le détroit de Haro. Les auteurs pensent que l'escarpement du détroit de Haro (qui caractérise également le Saguenay) crée de la réverbération qui annule l'effet que pourrait avoir la relocalisation de la voie de navigation.

2.5. Création de zones silencieuses

Les zones silencieuses ou les zones dites de tranquillité sont un type de zonage de protection dans lesquels le bruit sous-marin d'origine anthropique est exclu pour une période donnée. Toutes les activités d'origine anthropique qui génèrent du BSR tel que la navigation marchande sont interdites. Ces zones sont définies en raison de leur importance pour les animaux que ce soit par exemple pour l'alimentation, la reproduction, le repos, etc. Cette mesure est considérée comme très pertinente puisque les aires marines protégées sont à ce jour les outils les plus puissants pour protéger la biodiversité marine des pressions anthropiques.

D'après MPO (2018), la mise en place de zones silencieuses entraînerait une réduction significative du niveau de BSR dans les zones concernées, mais entraînerait une augmentation des niveaux de BSR dans d'autres zones. Par ailleurs, ces zones devraient être beaucoup plus vastes que les zones d'habitat essentiel sensibles en raison de la propagation du son sous l'eau sur de longues distances. Pour que cette atténuation soit efficace, elle nécessiterait probablement une gestion dynamique, assortie d'une souplesse spatiale et temporelle, permettant de réagir au comportement des animaux.

La définition d'un zonage devrait en principe suivre un objectif précis de conservation tel que la protection d'un pourcentage de l'habitat essentiel du béluga. La désignation de zonage s'inscrit dans un contexte de connaissance avancé de la distribution du béluga et de son utilisation de l'espace.

Dans le cas du Saguenay, les zones de silence sont difficilement concevables sur une période continue en raison de la faible largeur de la rivière et la réverbération du BSR des navires qui peut se propager sur plusieurs dizaines de kilomètres. La création de zones de silence doit donc s'inscrire de manière privilégiée dans une approche temporelle, saisonnière (2.3.) voire quotidienne. MPO (2018) propose par exemple pour le cas de l'Épaulard, d'interdire le trafic maritime de nuit afin de garantir une plage temporelle silencieuse. Pour être efficace, cette plage horaire devrait concorder avec une période d'activité importante pour les bélugas et requiert une connaissance fine de l'écologie de la population à protéger.

2.6. Convoi (navigation par étapes)

L'approche par convoi signifie de grouper les passages de navires plutôt que de les diluer dans le temps et l'espace. En supposant que tous les navires impliqués dans un convoi continuent de voyager à leur vitesse normale, le regroupement des navires dans des convois maintiendra le niveau de BSR global, mais modifiera sa répartition dans le temps et dans l'espace.

La mise en place de convois augmenterait le niveau sonore et la durée d'un seul événement de transit (plusieurs navires en ligne), ainsi que la durée des périodes de repos (chevauchement spatial et temporel de la signature acoustique du navire) pour une zone donnée le long de la voie de convoi. Dans la pratique, un certain nombre de navires du convoi devraient réduire leur vitesse pour correspondre au navire le plus lent du convoi, ce qui pourrait entraîner une réduction globale du niveau de BSR.

D'après MPO (2018), l'efficacité de l'approche par convoi dépendra de la vitesse du convoi, de l'intervalle entre les navires, du nombre de convois par jour et le moment du convoi par rapport à la présence et l'activité des animaux.

Pour évaluer l'approche du convoi de manière plus quantitative, Val Veirs (2017) a développé un modèle accompagné d'une interface graphique (Figure 5) qui permet de tester facilement différents scénarios de convoi.

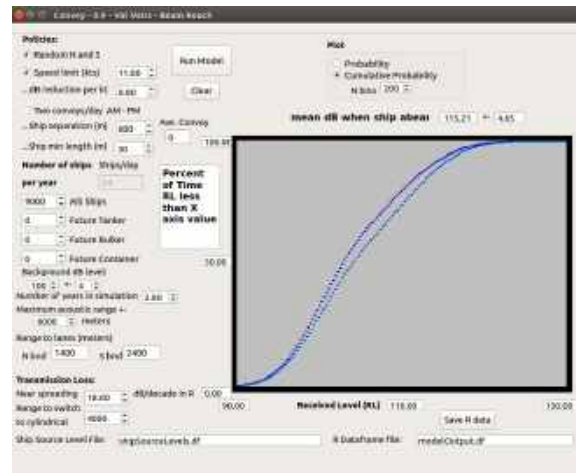


Figure 5: Le modèle calcule le pourcentage de temps pendant lequel le niveau de BSR reçu est inférieur à une valeur spécifiée. Dans le graphique ci-dessus, par exemple, le BSR est inférieur à environ 105 dB dans 50% des cas. Le modèle utilise les niveaux de source de navire rapportés par Veirs et al., (2016).

Enfin, selon les simulations AQUO, le regroupement par 3 paquets de navires en transit réduirait considérablement le BSR, tout comme il faudrait au moins 10 km entre les navires lors du transit. Les deux seraient réalisables grâce à la supervision des centres de coordination de sauvetage en mer (Baudin et al. 2015).

3. Mesures organisationnelles des autres acteurs de la chaîne logistique du transport maritime

Cette troisième partie vise à mettre en lumière une autre catégorie de mesures largement absentes de la littérature scientifique liée à l'organisation imbriquée des différents acteurs de la chaîne logistique du transport maritime. Si la majeure partie des mesures recensées relèvent principalement des armateurs, il convient aussi de souligner l'importance qu'ont les autres acteurs de la chaîne logistique du transport maritime pour réduire le bruit sous-marin. Cette dernière partie souhaite mettre en avant quelques exemples illustrés de la capacité des autres acteurs du transport maritime à contribuer soit directement à la réduction du bruit sous-marin, soit de manière indirecte en facilitant la mise en place de mesures par l'industrie maritime.

3.1. Les administrations portuaires

3.1.1 Adaptation des installations portuaires

Par leurs installations, les administrations portuaires peuvent permettre de réduire directement le BSM des navires et également jouer le rôle de facilitateur pour que d'autres acteurs puissent développer des mesures de réduction du BSM.

De manière directe tout d'abord, les administrations portuaires ont la possibilité de réduire le BSM en proposant un service d'alimentation à quai, qui consiste à fournir de l'énergie à un navire à quai pendant que ses moteurs principaux et auxiliaires sont éteints (voir pour 1.4.5. Alimentation à quai (« Cold Ironing ») pour une description détaillée). Cette technologie est considérée comme mature et relève uniquement des administrations portuaires pour leur implémentation.

Par ailleurs, les administrations portuaires peuvent aussi aider les armateurs et les clients à développer d'autres mesures. C'est le cas par exemple du convoyage des navires (voir 2.6. Convoyage (navigation par étapes) pour une description détaillée) qui nécessite outre une entente entre les clients et les armateurs, des capacités d'accueil simultané des navires dans les ports. Enfin, les administrations portuaires doivent de manière générale veiller à pouvoir accueillir les navires disposant de technologies ou de logistiques spécifiques permettant de réduire le BSM voire de les favoriser grâce par exemple à des dispositifs incitatifs.

3.1.2 Offre d'incitatifs financiers aux navires silencieux

Par la mise en place de politiques tarifaires qui prennent en compte le BSM des navires, les autorités portuaires ont la capacité d'inciter les armateurs à investir davantage dans les mesures de réduction du BSM. On peut citer par exemple le programme EcoAction du port de Vancouver qui a été lancé en 2007 et qui offre des tarifs de droits portuaires préférentiels aux navires qui respectent les meilleures pratiques environnementales. Différentes préoccupations environnementales sont éligibles à une taxation préférentielle à laquelle figure la composante bruit sous-marin des navires. Le programme Echo du port de Vancouver a commissionné en 2016 une étude (Hemmera Envirochem Inc, 2016) afin de définir (i) les technologies, la maintenance et les options de conception existantes permettant de rendre les navires plus silencieux et (ii) les options et critères qui peuvent être utilisés pour encourager les navires plus silencieux et réduire le bruit dans le port de Vancouver. Sur la base de ce rapport, les autorités portuaires de Vancouver ont retenu trois systèmes de notation éligibles à un niveau or (le plus haut), qui permet d'obtenir les tarifs portuaires les plus avantageux. Il s'agit des classifications des sociétés Bureau Veritas, DNV-GL et RINA. De plus, trois technologies d'hélice permettant de réduire le bruit de cavitation sont également éligibles à un tarif portuaire réduit (niveau bronze). Il s'agit des technologies Propeller Boss Cap Fins (PBCF), Schneekluth duct et Becker Mewis duct.

Cette liste est amenée à évoluer en fonction du développement des connaissances relatives à l'efficacité des différentes mesures technologiques ou opérationnelles et pourrait être adaptée à différents contextes notamment celui du Saguenay et du Saint-Laurent.

3.2. Les clients des armateurs

3.2.1 Développement d'ententes entre les clients pour la réutilisation des navires

Il existe différents cas de figure où les navires naviguent à vide que ce soit après avoir déchargé les marchandises transportées ou pour se rendre sur les lieux de chargement. Une meilleure organisation des navires permettrait de réduire le nombre de transits nécessaire pour la même quantité de produits transportés. Pour compenser l'augmentation du trafic maritime dans la rivière du Saguenay liée au développement du terminal maritime en rive nord, le promoteur a proposé de partager certains navires avec le terminal de Rio Tinto. Précisément, comme le mentionne l'Agence canadienne d'évaluation environnementale dans leur rapport concernant le terminal maritime en rive nord du Saguenay (Agence canadienne d'évaluation environnementale, 2018), la minière Arianne Phosphate a récemment signé un protocole d'entente avec Rio Tinto concernant le partage de services maritimes visant l'utilisation des navires vides de Rio Tinto pour acheminer le concentré d'apatite aux marchés internationaux. Ainsi, les navires servant à acheminer les matières premières dans les installations de Rio Tinto pourraient repartir de la rivière Saguenay chargés du concentré d'apatite d'Arianne Phosphate ce qui éliminerait, selon les estimations des intéressés, la venue de 60 navires supplémentaires par année dans la rivière Saguenay si tout le concentré d'apatite peut être exporté ainsi.

Cet exemple pourrait être généralisé par le développement de protocoles d'ententes entre les clients. Toutefois, ces ententes nécessitent une plus grande souplesse de la part des clients dans les délais imposés aux armateurs. La réutilisation des navires doit également répondre à la compatibilité des quantités chargées/déchargées. Enfin, la réutilisation des navires ne peut s'effectuer qu'entre les produits compatibles et entraînera dans différents cas une augmentation du nettoyage des cales des navires. Cette mesure relève donc principalement de la volonté des clients à développer des ententes et à faciliter leur mise en place par plus de souplesse concernant les conditions d'acheminement.

3.2.2 Assouplissement des délais imposés par les clients pour le convoyage des navires

Le convoyage des navires signifie de grouper les passages de navires plutôt que de les diluer dans le temps et l'espace. Sous certaines conditions de mise en place, il a été montré que cette organisation peut permettre au moins de modifier la répartition spatio-temporelle voire de réduire la quantité de BSM totale (voir 2.6. Convoyage (navigation par étapes) pour une description détaillée).

Toutefois, la mise en place d'une telle organisation entraînera notamment la modification de la vitesse de certains navires, les plus rapides devant s'adapter à la vitesse des plus lents mais aussi des périodes d'attente pour former le convoi. Ces deux éléments auront pour conséquence d'entraîner une certaine incertitude sur les délais d'acheminement des produits. Pour développer une telle mesure, les clients doivent notamment accorder une plus grande flexibilité aux armateurs et aux pilotes concernant les temps de transit. La mise en place de cette mesure relève donc de la volonté de plusieurs acteurs dont les clients, qui imposent les délais, sont en première ligne.

3.2.3 Augmentation de la capacité de stockage des clients pour adapter la saisonnalité du transport des produits

Une des mesures présentées concerne l'adaptation des périodes de transport des produits en fonction de la présence des mammifères marins. Étant donné que la plupart des espèces de mammifères marins sont migratrices, l'adaptation temporelle du trafic maritime en fonction des périodes de présence peut constituer une mesure de mitigation (voir 2.3. Modification de la répartition temporelle (saisonnière) du trafic maritime pour une présentation détaillée). Toutefois, ce sont les clients des armateurs qui décident des dates et des délais d'acheminement des navires qui sont souvent très courts puisque les clients fonctionnent souvent en flux tendu avec peu de stock et de lieux de stockage. La mise en place d'une période saisonnière d'interdiction ou de limitation du trafic maritime nécessite donc la sensibilisation et la mobilisation des clients du transport maritime qui devraient notamment modifier leur organisation de manière à pouvoir stocker de plus grandes quantités de marchandises avant leur chargement pour livraison. Dans ce cas, c'est le client qui peut, par la suspension du transport à certaines périodes, contribuer directement à la réduction de l'exposition des MM au BSM.

Les quelques exemples présentés dans cette troisième partie visent avant tout à illustrer l'interdépendance des acteurs dans l'organisation de la chaîne logistique de transport. De nombreuses mesures présentées dans la revue nécessitent donc une implication concertée des différents acteurs afin de maximiser la réduction du bruit sous-marin de la navigation marchande et ses impacts sur les mammifères marins.

Références

- Agence canadienne d'évaluation environnementale, 2018. Terminal maritime en rive nord du Saguenay: rapport d'évaluation environnementale.
- A. Feizi Chekab, M., Ghadimi, P., Reza Djeddi, S., Soroushan, M., 2013. Investigation of Different Methods of Noise Reduction for Submerged Marine Propellers and Their Classification. *Am. J. Mech. Eng.* 1, 34–42. <https://doi.org/10.12691/ajme-1-2-3>
- AQUO project, 2015. List of improvement solutions and mitigation measures (No. Rep. R5.9).
- Audoly, C., Rousset, C., Baudin, E., Folegot, T., 2016a. Aquo project - research on solutions for the mitigation of shipping noise and its impact on marine faune - synthesis of guidelines 9.
- Audoly, C., Rousset, C., Baudin, E., Folegot, T., 2016b. AQUO PROJECT - RESEARCH ON SOLUTIONS FOR THE MITIGATION OF SHIPPING NOISE AND ITS IMPACT ON MARINE FAUNA – SYNTHESIS OF GUIDELINES 9.
- Bahtiarian, M., 2019. Quieting Ships to Protect the Marine Environment Workshop Final Report.
- Baudin, E., Mumm, H., 2015. GUIDELINES FOR REGULATION ON UW NOISE FROM COMMERCIAL SHIPPING. ACHIEVE QUIETER OCEANS BY SHIPPING NOISE FOOTPRINT REDUCTION.
- Baumgartner, M.F., Fratantoni, D.M., Hurst, T.P., Brown, M.W., Cole, T.V.N., Van Parijs, S.M., Johnson, M., 2013. Real-time reporting of baleen whale passive acoustic detections from ocean gliders. *J. Acoust. Soc. Am.* 134, 1814–1823. <https://doi.org/10.1121/1.4816406>
- Berkowitz, H., Dumez, H., 2017. Racket in the oceans. Why underwater noise matters, how to measure it, and how to manage it. <https://doi.org/10.13140/rg.2.2.11410.04807>
- Chion, C., Lagrois, D., Dupras, J., 2018. Revue des études sur l'évaluation du bruit large bande à la source des navires marchands.
- Chion, C., Lagrois, D., Dupras, J., Turgeon, S., McQuinn, I.H., Michaud, R., Ménard, N., Parrott, L., 2017. Underwater Acoustic Impacts of Shipping Management Measures: Results from a Social-Ecological Model of Boat and Whale Movements in the St. Lawrence River Estuary (Canada). *Ecol. Model.* 354, 72–87.
- Comer, B., 2019. Rotors and bubbles: Route-based assessment of innovative technologies to reduce ship fuel consumption and emissions. *Int. Counc. Clean Transp.* 19.
- De Marco, A., Mancini, S., Pensa, C., Calise, G., De Luca, F., 2016. Flettner Rotor Concept for Marine Applications: A Systematic Study. *Int. J. Rotating Mach.* 2016, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2016/3458750>

Hemmera Envirochem Inc, 2016. Vessel Quieting Design, Technology, and Maintenance Options for Potential Inclusion in EcoAction Program.

IMO, 2014. GUIDELINES FOR THE REDUCTION OF UNDERWATER NOISE FROM COMMERCIAL SHIPPING TO ADDRESS ADVERSE IMPACTS ON MARINE LIFE.

Kipple, B., 2002. Underwater Acoustic Signatures of Six Cruise Ships That Sail South-East Alaska. Glacier Bay National Park and Preserve.

Leaper, R., Calderan, S., Cooke, J., 2015. A Simulation Framework to Evaluate the Efficiency of Using Visual Observers to Reduce the Risk of Injury from Loud Sound Sources. *Aquat. Mamm.* 41, 375–387. <https://doi.org/10.1578/AM.41.4.2015.375>

Leloup, R., Roncin, K., Behrel, M., Bles, G., Leroux, J.-B., Jochum, C., Parlier, Y., 2016. A continuous and analytical modeling for kites as auxiliary propulsion devoted to merchant ships, including fuel saving estimation. *Renew. Energy* 86, 483–496. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.08.036>

McKenna, M.F., Wiggins, S.M., Hildebrand, J.A., 2013. Relationship between Container Ship Underwater Noise Levels and Ship Design, Operational and Oceanographic Conditions. *Sci. Rep.* 3, 1760.

MPO, 2018. Technical review: potential effectiveness of mitigation measures to reduce impacts from project-related marine vessels on Southern Resident Killer Whales. *Can. Sci. Advis. Secr.* 23.

Renilson, M., Leaper, R., Boisseau, O., 2013. Hydro-acoustic noise from merchant ships – impacts and practical mitigation techniques. p. 8.

Renilson, M., Leaper, R., Boisseau, O., 2012. A review of practical methods for reducing underwater noise pollution from large commercial vessels. *Trans. R. Inst. Nav. Archit. Part Int. J. Marit. Eng.* 154A79-A88 10.

Renilson Marine Consulting Pty Ltd, 2009. REDUCING UNDERWATER NOISE POLLUTION FROM NOISE POLLUTION FROM LARGE COMMERCIAL VESSELS LARGE COMMERCIAL VESSELS.

Shukla, P.C., Ghosh, K., 2009. Revival of the Modern Wing Sails for the Propulsion of Commercial Ships 3, 6.

Southall, B., Scholik-Schlomer, A., 2008. Final report of the NOAA International Conference: “Potential Application of Vessel-Quieting Technology on Large Commercial Vessels,” NOAA.

Southall, B.L., 2005. “Shipping Noise and Marine Mammals: A Forum for Science, Management, and Technology”. Final Rep. Natl. Ocean. Atmospheric Adm. NOAA Int. Symp. 40.

Spence, J.H., Fischer, R.W., 2017. Requirements for Reducing Underwater Noise From

- Ships. IEEE J. Ocean. Eng. 42, 388–398. <https://doi.org/10.1109/JOE.2016.2578198>
- Talluri, L., Nalianda, D.K., Giuliani, E., 2018. Techno economic and environmental assessment of Flettner rotors for marine propulsion. Ocean Eng. 154, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.02.020>
- Traut, M., Bows, A., Gilbert, P., Mander, S., Stansby, P., Walsh, C., Wood, R., 2012. Low C for the High Seas Flettner rotor power contribution on a route Brazil to UK. Second Int. Workshop Success. Strateg. Supply Chain Manag. Template 8.
- Traut, M., Gilbert, P., Walsh, C., Bows, A., Filippone, A., Stansby, P., Wood, R., 2014. Propulsive power contribution of a kite and a Flettner rotor on selected shipping routes. Appl. Energy 113, 362–372. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.07.026>
- Vard Marine Inc, 2019. Ship Underwater radiated noise. Transport Canada/Government of Canada.
- Veirs, S., Veirs, V., Wood, J.D., 2016. Ship noise extends to frequencies used for echolocation by endangered killer whales. PeerJ 4, e1657. <https://doi.org/10.7717/peerj.1657>
- Veirs, V., 2017. A QT program to model underwater sounds from commercial shipping. https://github.com/veirs/convoy_0.
- Williams, R., Veirs, S., Veirs, V., Ashe, E., Mastick, N., 2019. Approaches to reduce noise from ships operating in important killer whale habitats. Mar. Pollut. Bull. 139, 459–469. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.05.015>

ANNEXE 4 : Rapport d’Ocean Wise Conservation Association pour le programme de recherche, sur les métriques acoustiques en lien avec les impacts sur le BESL

Framework for Noise-Related Metrics Ecologically Relevant for Beluga Whales, with Special Emphasis on the St Lawrence Estuary Beluga Population

Dr. Valeria Vergara
Ocean Wise Conservation Association
Marine Mammal Research Program
03/18/2019

Contents

Introduction	2
Ecologically Relevant Impacts of Noise on Beluga Whales	2
Behavioral disturbance	3
Communication masking	4
Echolocation masking	4
Auditory impairment	5
Mortality	5
Important Considerations in Identifying Ecologically Relevant Metrics	6
Hearing Sensitivity of Belugas	6
Communication and Echolocation Bandwidths of Belugas	7
Critical Bandwidth and Critical Ratio	7
Vocal Compensation Strategies	8
Responsiveness and Representativeness of the Metrics	8
Quiet Zones and Sound Propagation Characteristics of a Site	9
Knowledge Gaps and Caveats	9
Ecologically Relevant Metrics	9
Glossary of Key Terms	13
References	16
Appendix 1: 1/12th octave bands from 500 Hz to 100 kHz	21

Introduction

The St. Lawrence Estuary (SLE) beluga population was legally listed as endangered by the Species at Risk Act (SARA) in 2016 due to its failure to recover (Gosselin, Hammill, and Lesage 2007; Hammill et al. 2007; Mosnier et al. 2015). High noise levels and anthropogenic disturbance, in addition to a shortage of prey availability and high levels of contaminants, were identified amongst the three main threats to the recovery of this endangered population (Department of Fisheries and Oceans 2017).

The purpose of this review is to provide a framework for acoustic metrics that are ecologically relevant for beluga whales, associated with the principal risks of impacts of noise. Since of the portion of the SLE beluga population exposed to commercial marine traffic (15-53%), the vast majority (72-81%) are females with calves or juveniles (Lesage et al. 2014), this framework will emphasize mother-calf pairs, while also considering individuals and the population as a whole. There is expert agreement that biologically relevant threshold values are difficult to determine because there are so many factors that can affect a whale's response to noise, which can vary according to time, location, behavior, group composition, or ecological context (e.g. see Heise et al. 2017 for killer whales). Therefore, this review will emphasize metrics that tend to be more useful than absolute threshold values for measuring noise exposure and comparing and/or detecting changes in the quality of the St. Lawrence beluga soundscape. In addition, this review will briefly summarize the ecologically relevant impacts of noise and the most important considerations in identifying ecologically relevant metrics. These metrics can then form the basis of underwater noise-related indicators in the St Lawrence River Estuary (SLE). They will: a) reflect how belugas are affected by noise, b) be practical in terms of the requirements for field measurements and modeling, and c) inform both ongoing noise-impact models, management of underwater noise in the SLE and discussions of possible noise mitigation or compensation strategies.

The metrics are presented in a summary table ([Table 2](#)), organized according to the most important noise impacts on beluga whales. The purpose, rationale, method of measurement, optimal values for each metric (when available), and examples – if any – applicable to the SLE beluga are provided. A [glossary](#) of definitions and explanations for terms related to underwater noise metrics, with an emphasis on those particularly relevant to belugas, is also provided, and the terms used throughout this manuscript are linked to the glossary for quick check-up.

Ecologically Relevant Impacts of Noise on Beluga Whales

There is general agreement that there are a number of principal impacts of motorized vessel noise on odontocete species (e.g. Heise et al. 2017 and Merchant et al. 2018): behavioral disturbance and associated physiological stress, communication masking, echolocation masking, and permanent or temporary auditory impairment (see [glossary](#) for brief definitions of each of these impacts). Some of these impacts may act synergistically, for example, the potential impact of shipping noise on foraging

efficiency ([echolocation masking](#)) may be compounded by the simultaneous masking of some of the communication calls that may serve to coordinate foraging (Veirs et al., 2016), or by reduced prey availability (Heise et al. 2017). Below is a brief summary of each of these impacts outlining any existing literature for the species of interest, the beluga, with emphasis on the St Lawrence Estuary population (when data are available).

Behavioral disturbance

[Behavioral responses](#) to noise can be very variable, context dependent, and less predictable than other effects. They may depend on past exposure of the individual to the noise, habituation, individual noise tolerance and hearing sensitivity, age, sex and presence of calves, sound transmission characteristics of the habitat, etc. Some behavioral reactions, such as displacement from preferred habitats, cessation of foraging, or interruption of nursing, can have more severe impacts on critical biological parameters such as growth, reproduction and survival than other reactions such as an alteration of vocalizations. Behavioral responses to noise can be associated with increased physiological stress (e.g. Rolland et al. 2012 for North Atlantic right whales). This is an important consideration, as we know that chronic stress can be unfavorable to individual fitness and may have population-level consequences (Wright et al. 2007). For example, if an animal remains in a particular habitat because there are no alternative locations to fulfill its biological needs, the noise and persistent disturbance can cause chronic physiological stress (Lesage et al. 2014).

There is currently no widely accepted metric to assess and quantify the impact of behavioral disturbance on critical biological parameters (Southall et al. 2007; Wartzok et al. 2004), but bioacousticians agree that metrics that measure acoustic exposure (e.g. [Sound Pressure Level, SPL](#)) can help (see Table 2).

The following are the available studies on behavioral responses of beluga whales to vessel noise, excluding vocal compensation (which I will list under a separate section):

- Blane and Jackson (1994) reported that St Lawrence beluga altered their behaviour by increasing swim speed, forming tighter groups, and prolonging diving intervals, in response to large ships.
- Pippard (1985) attributed the abandonment of the Bay of Tadoussac by beluga groups to the development of the Tadoussac marina.
- Caron and Sergeant (1988) indicated that belugas may have been displaced from a primary habitat in the Saguenay River Estuary in response to noise from large ships. A 60% decline in passage rates of belugas coincided with an increase in recreational boat traffic.
- Conversano 2013 (cited in Ménard et al., 2014) found a significant negative correlation between the number of all types of boats and the percentage of young of the year observed in beluga groups at the mouth of the Saguenay. This could be explained by behavioral avoidance of the area (i.e. displacement) if females with neonates avoid this area during high traffic periods.
- In a study that tested Temporary Threshold Shifts (TTS) in two belugas and five bottlenose dolphins with 1-s intense tones, Schlundt et al. (2000) found that belugas altered their behaviour at 180-190 dB re: 1 μ Pa.
- Erber and farmer (2000) modeled the zone of behavioral disturbance for bubbler icebreaker noise extended to ranges of about 32 km.

- Cosens and Dueck (1988) and Finley et al. (1990) reported changes in beluga swimming behavior at distances of 40–60 km from an ice-breaker in Lancaster Sound, indicating that belugas potentially avoid icebreakers as soon as they detect it.
- Stewart et al. (1982) reported that belugas in Bristol Bay (Alaska) stopped feeding and moved away from small motorboats but were habituated to dense groups of fishing boats.

Communication masking

The masking of a beluga communication signal occurs when the effective range over which the signal can be detected and decoded by another beluga is reduced. This effective range is known as the [communication space](#) or active space of a signal. Mother-calf pairs are especially vulnerable to masking because calves (especially newborn calves) vocalize at lower intensity than adults (i.e. lower [source levels](#)), which greatly reduces the effective communication space of their calls, particularly in noise (Vergara et al. 2019).

Some relevant studies of communication masking in beluga whales are the following:

- Vergara et al. (2019) found that the median communication range of an adult beluga broadband contact call with a median [peak frequency](#) of 3.7 kHz would reach 4.3 km in the absence of boat noise, and would be reduced by 59% under the median underwater noise levels found at Baie Sainte Margerite. Beluga neonates produce calls with much lower [source levels](#) than adults (median of 121 dB re 1μPa at 1m, n = 33 calls from a neonate throughout his first week of life, vs. 146 dB re 1μPa at 1m, n = 53, for adults), so the communication space is considerably smaller than that of adults to start with. A neonate broadband contact call (first month of life) with a peak frequency of 3.9 kHz would reach a median distance of 360 m (IQ range 140 to 1070 m) and would be reduced by 53% to a median distance of 170 m.
- Gervaise et al. 2012 found that the communication space of SLE beluga calls with a [center frequency](#) of 2.5 kHz is reduced to 30% of its expected value under natural conditions (approx. 4.5 km) for half of the time in the Saguenay mouth.
- Erbe and Farmer (1998) studied masked hearing thresholds of a beluga whale. The masked signal was a broadband beluga call (0.8-8 kHz) with a source level of 160 dB re 1μPa at 1m. Their study showed that continuous noise is more effective than pulsed noise at masking beluga vocalizations.

Echolocation masking

Echolocation masking is the reduction of the effective range over which an echolocating beluga can hear the returning echoes of its echolocation signals. This is key, because masking of echolocation by noise therefore reduces foraging efficiency (an impact that could have population-level consequences especially if compounded by poor food availability), and it may impair navigation, orientation, and hazard avoidance. The echolocation space of an animal is smaller than its communication space because the transmission loss for the echoing click at a given distance is twice that of a communication call, especially for high frequency echolocation clicks that suffer more scattering and absorption losses than lower frequency communication calls (Clark et al. 2009).

Auditory impairment

Although received levels from shipping may not be high enough and of long enough duration to cause [permanent threshold shifts](#) (PTS), [temporary threshold shifts](#) (TTS) is a possibility in some cases (Southall et al., 2007; Heise et al., 2017) and if belugas are exposed to multiple loud vessels repeatedly, a TTS could potentially cause a PTS-onset. The problem, however, is that PTS and TTS studies in marine mammals are limited. We certainly do not know the levels of long-duration continuous noise exposure that may cause TTS or PTS-onset in belugas. Southall et al. (2007) suggest that ≥ 40 dB of TTS is a conservative approximation of PTS onset for marine mammals, but this is based on a review of the terrestrial mammal literature.

Some relevant studies of auditory impairment in belugas:

- Schlundt et al. (2000) reported TTS in two belugas and five bottlenose dolphins exposed to 1-s pure tones (i.e. whistles). At frequencies of 3 kHz, 10 kHz, and 20 kHz, SPLs necessary to induce TTS-onset were 192 to 201 dB re 1 μ Pa. The mean exposure SPL for TTS-onset was 195 dB re 1 μ Pa.
- Erbe and Farmer (2000) applied a model for estimating zones of impacts of icebreakers on beluga whales in the Beaufort Sea. They determined that TTS can occur if a beluga stays within 1-4 km of a particular icebreaker (the Canadian Coast Guard icebreaker Henry Larson, recorded by the authors) with a median source level of 192 dB re 1 μ Pa in the 100 Hz to 20 kHz frequency range, for at least 20 minutes.

Mortality

Mortality is also a potential impact. Although exposure to continuous noise sources is unlikely to cause mortality due to physical trauma, this consequence should not be discarded. The following are some mechanisms under which mortality could potentially occur (i.e. individual and population-level consequences):

- 1) Stranding as a consequence of a behavioral response to noise (although reports of stranding for other cetaceans tend to be related to active sonar, not to vessel noise, see Gomez et al. 2016),
- 2) dystocia during parturition potentially induced by increased noise disturbance of parturient females (Lair et al. 2016),
- 3) disruption of communication bond between a mother and her mobile but dependent newborn calf (Vergara et al. 2019), and
- 4) echolocation masking in combination with masking of vocalizations used to coordinate foraging, compounded by decreased prey availability or prey quality may lead to chronic nutritional stress, and potentially death.

Important Considerations in Identifying Ecologically Relevant Metrics

Hearing Sensitivity of Belugas

In order to predict the impact of noise on any animal we need to understand its ability to hear the signals of importance. Most animals hear best at the frequencies they produce and have varying sensitivity to sounds of different frequencies. Behavioral audiograms are limited to captive, trained animals, which limits sample size (an important constraint, given that auditory capabilities are likely to vary between individuals depending on age, sex, exposure to pathogens and drugs, history of noise exposure, etc). The past 2 decades have seen a focus on non-invasive Auditory Evoked Potential (AEP) techniques that record responses from the surface of the skin via electrodes. These AEP techniques provide a rapid way to test hearing (Nachtigall, et al., 2007), and allow for increased sample sizes, broadening our understanding of odontocete hearing sensitivity (e.g. Mooney et al., 2018a and 2018b for belugas). Table 1 summarizes the audiogram data that exists for beluga whales to date, indicating the method of assessment. Belugas, like other mammals, have a U-shaped audiogram. They hear well up to 150 kHz, and the range of best sensitivity is between 45 and 80 kHz according to the most recent and robust studies on wild belugas (Castellote et al. 2014 and Mooney et al 2018; see Table 1). This range of best sensitivity is important because if auditory impairment occurs, it tends to be most severe in this most sensitive frequency range.

Table 1. Audiogram data for beluga whales

Reference	Method	n	Hearing range (kHz)*	Range of best sensitivity (kHz)	Maximum sensitivity (lowest threshold)	Comments
White, et al. (1978)	Behavior	2	1-130	15-110	-	
Awbrey, et al. (1988)	Behavior	3	0.125-8	4-8	-	Low frequency hearing data - Did not establish upper limit -
Erbe and Farmer (1998)	Behavior	1	0.5-10		10 (64 dB)	Low frequency hearing data - Did not establish upper limit -
Johnson et al (1989)	Behavior	1	0.4-125			Between 5 and 100 kHz the thresholds were masked by bay noise. Note that 125 kHz was the max freq tested.
Klishin, et al. (2000)	AEP	1	8-128	32-108	54 (54.6 dB)	
Finneran, et al. (2005)	Behavior	2	2-130	14-90	50 (43 dB)	One subject exhibited hearing loss above 37 kHz
Mooney, et al. (2008)	AEP	1	8-128	22-90	50 (43.9 dB)	Note that 128 kHz was the max freq tested (not the true upper hearing frequency)
Castellote et al. (2014)	AEP	7	4-150	45-80	80 (50 dB $\pm$ 11.2)	Max sensitivity is the mean of all 7 animals.
Mooney, et al. (2018)	AEP	26	5.6-150	45-80 (Good 16-100)	45, 54, and 80 (61, 59 and 61 dB, respectively).	The 26 animals include the 7 tested by Castellote et al (2014). Substantial variation in hearing thresholds (30-70 dB).
Sysueva et al. (2018)	AEP	7	11.2-128	32-76	45 (53 dB)	Inter-individual standard deviation varied from 3.2 to 12 dB. Note that 128 kHz was the max freq tested (not the true upper hearing frequency)

* Note that hearing with AEPs cannot be adequately tested at frequencies below 4 kHz. The minimum hearing range for AEP studies reflect the minimum frequency that was tested, not the minimum auditory capability. For maximum auditory capabilities, the only studies that tested true max frequencies are Castellote et al. (2014) and Mooney et al. (2018).

Communication and Echolocation Bandwidths of Belugas

Understanding the communication and echolocation bandwidth of a species is essential to understand the masking potential of noise, and the metrics necessary to measure such masking. Beluga whale echolocation clicks are very short broadband sounds that extend past 150 kHz, the upper limit of their hearing range (i.e. Castellote et al. 2012), and have peak frequencies between 40-120 kHz (Au et al. 1985, 1987; Au 1993; Castellote et al. 2012). Castellote et al (2012) found that most of the acoustic energy in click trains is centered between 30 and 100 kHz, with two [peak frequencies](#), a primary one in the range 80-90 kHz, and a secondary at 40-50 kHz. In the St Lawrence Estuary, belugas tend to produce echolocation clicks with energy concentrated in the 30 to 50 kHz frequency band (Roy, Simard and Gervaise 2010). Since both echolocation clicks and noise are broadband, measuring noise within specific Critical Bands may not be appropriate, as we do not know the frequencies that are most important for belugas to detect prey.

Beluga communication signals can be narrowband tonal calls, often referred to as whistles, and broadband, pulsed sounds that sound to the human ear like creaks, squawks and screams. Tonal calls (whistle-like) in the SLE have mean frequencies that can range from 2.6 to 8.8 kHz (Lesage et al. 1999). Broadband calls (such as contact calls) can have acoustic energy from 0.2 to 150 kHz, although some have no acoustic energy below 30 kHz (Vergara and Mikus, unpublished data). Beluga broadband contact calls used for group cohesion and mother-calf contact in the SLE can be simple (composed only of trains of pulses) or complex (trains of pulses with an overlapping acoustic element such as a whistle produced simultaneously, between 1 and 15 kHz). They have a wide bandwidth from 0.2 to 144 kHz; a relatively long duration (1.5 ± 0.5 s), and a mean peak frequency of 28.5 ± 18.7 kHz ($n = 73$) for simple contact calls and 5.2 ± 3.3 kHz ($n = 63$) for complex contact calls (Booy et al. 2018, Vergara et al. in prep). Because complex contact calls are believed to be vocal signatures that identify individuals (Vergara and Mikus, 2018) to help them keep track of their important social relationships in a turbid aquatic environment, the frequencies within the contact calls at which the individually distinct elements tend to occur (1-15 kHz) are probably of particular importance to belugas.

Critical Bandwidth and Critical Ratio

In addition to understanding the absolute hearing abilities of a species (e.g. their audiogram) in quiet conditions, there is also a need to understand their ability to detect acoustic signals in background noise, in order to estimate the masking potential of anthropogenic noise. The [Critical bandwidth \(CB\)](#) measures the width of the auditory filter within which masking can occur. Noise effectively masks a signal when it is within a Critical Bandwidth of frequency around the desired signal. Noise outside of the CB contributes much less to this masking. The narrower the CB, the better the ability of the animal to extract acoustic signals from noise, because a narrower filter can improve the Signal-to-Noise Ratio (SNR) by removing noise energy that extends beyond the frequency of the signal (Erbe et al. 2016). This is why information about the CB of a species is essential for masking models.

Critical bandwidths are difficult to measure directly (see Erbe et al. 2016 for a summary of how this can be achieved experimentally), so the [critical ratio \(CR\)](#), an indirect measure of the critical bandwidth, is the most widely used masking metric for marine mammals (Mooney et al. 2012). The CR uses

thresholds of tones masked by broadband white noise, which is a sound with constant [power spectral density \(PSD\)](#) (Lemonds et al. 2011).

Despite some debate regarding the width of the auditory filter in belugas, 1/12 of an octave, based on Erbe (2000, 2008) and Klishin et al. (2000) is likely the best current estimate of the noise masking potential. This is a narrower CB than 1/3 of an octave, widely used for studies of masking in delphinid species (mostly because it is a conservative estimate used when the frequency tuning of the species is unknown).

Integrating noise intensity across the CB and comparing it to signal intensity determines if a signal is audible. In layman's terms: using 1/12 octave bands to describe sound impacts on belugas is important because similar frequencies mask each other much more than different frequencies mask each other. If two frequencies, the call and the noise, are "coded" in different bands, this is as if they were in different channels and they tend to mask each other less.

Vocal Compensation Strategies

Many marine mammal species exhibit a variety of noise-induced vocal modifications to increase the chances of successful communication during periods of increased noise. These vocal compensation strategies include longer or louder calls, increased call rate, shifting the frequency of the signal outside the noise band, and waiting to call until noise decreases (Tyack, 2008). Evidence of these compensation strategies in odontocetes is mounting (e.g. Killer whales: Holt et al. 2011; Wieland, et al. 2010; bottlenose dolphins: Au, et al. 1982; Buckstaff 2004; Indo-Pacific bottlenose dolphin: Morisaka et al 2005; belugas: Lesage et al. 1999; Scheifele et al. 2005). However, a key consideration is that compensating behavior is likely to have costs – i.e. energetically expensive, increased stress levels, degraded communication processes and impact on activity budgets (Holt, 2009), and be effective only in limited circumstances.

That belugas modify their vocal production in response to noise is well known, as illustrated by the following studies:

- Lesage et al (1999) documented vocal responses after exposure to noise from a small motorboat and a ferry (reduction in calling rate, increases in the frequency of the calls, and an increase in the repetition of some call types).
- Scheifele et al. (2005) documented that St. Lawrence beluga whales increase the amplitude of their calls in response to vessel noise, a mechanism known as the [Lombard effect](#).
- Belugas appear to be able to adapt their echolocation strategy to increased noise by modifying the amplitude, spectral, and temporal parameters of echolocation clicks (Au et al. 1985).

Responsiveness and Representativeness of the Metrics

There is a tradeoff between how responsive to changes a metric may be, and how representative of general noise levels it might be. For example, [percentiles](#) are statistically robust, temporally representative, and generally sensitive to changes in anthropogenic noise. In selecting a percentile, however, the question to ask is which percentile is most appropriate (Merchant et al. 2018). When selecting a percentile as an indicator for monitoring noise levels, there is a tradeoff between how

representative the metric is, such as the 50% or median which tend to reflect natural soundscapes, and how responsive to changes in noise levels, such as an extreme percentile closer to 99% which could represent outliers (Merchant, 2018). Merchant and colleagues advise against using percentiles that are higher than 95th.

Quiet Zones and Sound Propagation Characteristics of a Site

Quiet refugia are important, as are the sound propagation characteristics of a site. The sound propagation characteristics of some otherwise quiet areas can increase the belugas' vulnerability to anthropogenic noise that would propagate more easily there than in other potential sites (e.g. McQuinn et al. 2011).

Knowledge Gaps and Caveats

- How is beluga hearing impacted by chronic exposure to continuous noise?
- What are the optimal and acceptable sizes of echolocation and communication spaces for helping belugas recover, and how do they vary in different conditions and environments?
- How accurate are beluga audiograms at lower frequencies? Most recent ones are through AEP (Auditory Evoked Potential) methods, which do not measure frequencies lower than 5 kHz.
- What are the sound propagation characteristics of a site?
- Assuming a given noise exposure level over the course of a day, are quiet periods interspersed by high noise episodes less impactful than constant noise at lower levels? (e.g. do shipping convoys help maintain some quiet times?).
- Estimates of percentage reduction in communication space cannot tell us the effect of such reductions, as we do not know the true detection thresholds for the different vocalization types (e.g. broadband pulsed calls vs. narrow-band whistles).

Ecologically Relevant Metrics

Each of the categories of noise impacts outlined above requires distinct metrics. Table 2 outlines potential metrics for those impacts that are measurable, taking into account the factors described above (i.e. hearing sensitivity of beluga whales, communication and echolocation bands, critical bandwidth in this species, and responsiveness of the metric). When appropriate, the criteria were adapted from the 2017 expert workshop to develop a framework for impact-focused noise metrics for Southern Resident Killer Whales, held in Vancouver, BC. The workshop recommended a series of metrics to Fisheries and Oceans Canada (DFO) to shape guidelines for the management and quantification of the impact of underwater noise not only on killer whales, but also ultimately applicable to other mid-frequency odontocetes such as the beluga whale (Heise et al., 2017). The table also provides optimal recommended values, and examples applicable to St Lawrence Estuary belugas.

Table 2. Principal impacts of noise on beluga whales and corresponding proposed metrics to evaluate such impacts

Impacts of Noise and Description	Metrics	How to measure it	Optimal/recommended Value?	Considerations	Examples applicable to SLE Beluga
Behavioural disturbance, physiological stress, hearing loss - Can act cumulative, e.g. time that individuals experience behavioral disturbance + echolocation masking equals overall lost foraging time. - Can have population-level consequences, e.g. in the case of displacement from critical habitats for long periods of time.	1) Broadband Noise Level measured in change relative to a baseline (delta), in the 90 to 95th percentile of unweighted SPL from 10 Hz to 150kHz.	In 1/12 octave band frequency resolution, which is sufficient for determining noise in critical hearing bands for belugas, in frequencies from 10 Hz to 150 kHz. The period of time over which this metric is measured needs to be considered (<i>hourly, daily, monthly, yearly</i>). Generally more frequent intervals are more valuable, since the abundance and distribution of whales and their vulnerability to noise varies seasonally (Merchant et al. 2018).	The proportion of time that the unweighted sound pressure level (SPL) in frequencies from 10 Hz to 150 kHz does not exceed the 95 th percentile of the level present under natural ambient noise conditions.	The bandwidth 0.1-150 kHz considers empirical evidence that odontocetes can respond behaviorally to low frequency sounds near the lower limit of their hearing range, and the fact that beluga hearing range can extend to 150 kHz. Alternatively, the upper frequency of the broadband noise level measurements could be set at 100 kHz, to coincide with what we know is the max good hearing <i>sensitivity</i> (rather than the max hearing <i>range</i>) according to the latest hearing study on belugas (Mooney et al. 2018).	McQuinn et al. 2011: Broad-band SPL changed by 14.3 dB re 1 µPa between the quietest and noisiest sites measured Gervaise et al. 2012: Natural ambient noise levels occurred only 9.4% of the time, mostly at night. Observed noise between 10-10 kHz (note the much narrower band than recommended here) exceeds natural (nighttime) noise by 8.4 dB re 1 µPa Ferry traffic increased ambient baseline levels by 30–35 dB re 1 µPa above 1kHz during crossings
	2) Broadband Noise Level measured as an Absolute Threshold	In absolute Received Levels (RL) in frequencies 0.1-150 kHz	RL threshold commonly used for behavioral disturbance for non-impulsive sounds (e.g. vessel noise) = 120 dB re 1 µPa (rms) For beluga, a disturbance RL threshold as low as 81 dB re 1 µPa has been identified for icebreaker propeller cavitation noise (LGL and Greeneridge, 1986)	Difficult to apply the 120 dB to threshold consistently, easy to exceed, almost <u>any</u> source of human-made underwater noise, including every powerboat, would regularly exceed this. The actual threshold of behavioral reaction can range from well below to well above 120 dB re 1 µPa, depending on circumstances (National Research Council Committee on Low Frequency Sound and Marine Mammals, 1994).	McQuinn et al. 2011: Broadband SPL _{RMS} exceeded 120 dB re 1 µPa 8–32% of the time depending on the site and they exceeded 110 dB re 1 µPa from 16 to 86% of the time depending on the site (measured from 0.01 to 23 kHz)

Impacts of Noise and Description	Metrics	How to measure it	Optimal/recommended Value?	Considerations	Examples applicable to SLE Beluga
Communication masking. Impacts group cohesion and coordination. Interferes with social behaviour. Mother-Calf pairs are especially vulnerable as they rely on acoustic communication to stay together.	Communication space reduction. Measures the percentage reduction in the size of the space in which the whales can communicate effectively. Focuses on Noise masking on the frequency bands in which belugas tend to communicate.	Various alternative methods: 1) Measure noise increases (deltas) from particular baseline levels in consecutive 1/12th critical hearing bands within the communication frequency range. These can be averaged, or a percentile taken, to yield a single metric representing the full communication band. 2) Work with a specific beluga call with a known function and structure, e.g. mother-calf contact calls. Combine source level measurements of that beluga call (must be available), transmission loss, ambient noise measurements, and a beluga audiogram. In each 1/12 octave band at each distance, either the beluga hearing curve or the noise level, whichever is greater, is subtracted from the estimated beluga call received level. This results in a signal excess, i.e. number of dB that the call is above the noise level or hearing curve at that distance for that 1/12 octave band. The maximum communication space is the distance at which the signal excess finally reaches zero in all 1/12 octave bands analyzed. Compare this space for noisy vs quiet conditions to estimate % reduction. 3) Calculate "Range Reduction Factor" as per Gervaise et al (2012): Assuming spherical spreading loss, the RRF for a given noise level, <u>PSD</u>, relative to a baseline (natural conditions) is: $RRF_{PSD} = 10^{-(PSD-PSD_{nature})/20}$	Optimal communication space has not been defined for belugas, but it was defined for another mid-frequency odontocete, killer whales, as 95% of the space available under natural ambient noise conditions at a given location.	Masking metrics do not account for vocal or behavioral compensation. Approach # 1: note that in using this approach one would not be working with any particular (i.e. known) beluga call. Approach # 2: Although this approach would show which 1/12 octave bands remain audible at particular distances, the question of how many of the 1/12 octave bands need to be audible for a call to be not just detectable, but also recognizable by conspecifics, still remains.	Vergara et al, 2019: communication range reduction of 59% of the expected value under natural conditions for adult contact calls and 53% of the expected value for newborn contact calls. Gervaise et al. 2012: Using the RRF, they estimated a reduction of communication ranges of typical beluga calls to less than 30% of their expected range under natural (quiet) conditions The observed noise can mask communication and echolocation on the 4-40 kHz bands more than 50% of the time (note that this is percentage in terms of time, not communication range).

Impacts of Noise and Description	Metrics	How to measure it	Optimal/recommended Value?	Considerations	Examples applicable to SLE Beluga
Echolocation masking Impacts individuals, and could have population-level consequences (see "Mortality", above).	Foraging space reduction. Focused on masking in the 30-120 kHz frequency band (the frequency band in which most energy of echolocation clicks occurs) and <i>measures change in foraging space</i> .	1) Calculated as the percent change (or delta) of the original echolocation distance based on baseline conditions in the presence of increased masking noise in the echolocation band. 2) As per Gervaise et al (2012), estimate echolocation range reduction factor as $RRF_{PSD} = 10^{-(PSD_{PSD_{nature}})/40}$ (40 as the divisor to account for the two-way spherical spreading loss).	No optimal value exists in the literature for beluga, but for other mid-frequency odontocetes (killer whales) optimal echolocation space is considered as 95% of the space available under natural noise conditions at any location and varies with time.	Prey availability is a key consideration. The consequences of reduced foraging efficiency due to masking of echolocation clicks are more severe. Data on source levels of echolocation clicks are available (Lammers and Castellote, 2009)	Gervaise et al. (2012): In the mouth of the Saguenay, under median noise levels, possible ranges of echolocation could be reduced to approximately 80% of the range that would occur under natural noise conditions. Under the highest percentile of observed noise echolocation ranges could be reduced to 20% of their natural range. (based on 99 th percentile – although see "Responsiveness and Representativeness of the Metrics" for cautioning against using percentiles higher than 95%),

Glossary of Key Terms

This glossary is adapted from Erbe et al. (2016), Heise et al. (2017), and Houser et al. (2017)

Audiograms are plots of absolute hearing detection thresholds (dB) under quiet conditions as a function of frequency (kHz).

Auditory masking is when the perception of a particular signal is negatively influenced by the presence of interfering noise. This is the most widespread effect of anthropogenic noise on marine mammal populations (Southall et al. 2007)

Behavioural responses or behavioral disturbances are an observable or measurable change in the activity of an animal in response to sound, including displacement from habitat, disruption of an important activity such as foraging or nursing, changes in swimming speed or direction, changes in surfacing time, etc.

Behavioural response curves are graphs based on estimates of the percentage of a population that may respond behaviorally to exposure to different levels or doses of a potential stressor such as noise.

Broadband measurements indicate that the sound pressure level measurements were made over a large frequency range

Center frequency is the frequency that divides a signal into two intervals of equal energy (Hz).

Communication masking is the reduction of the effective range over which a communication signal can be detected and decoded by members of the same species.

Communication space (also called active space) is the area over which one individual can detect the signal of a conspecific. To measure communication space of a call (such as a beluga contact call), one compares signal-to-noise ratios of the call to the background noise for a number of frequency bands that are, for belugas, [1/12th octave bands](#).

Critical band is the band of sound frequencies perceived by the inner ear within which a second signal will interfere with the perception of a first signal, due to masking. The critical band becomes wider as the center frequency increases.

Critical Bandwidth (CB) measures the width of the auditory filter within which masking can occur. Noise effectively masks a signal when it is within a Critical Bandwidth of frequency around the desired signal.

Critical ratio is a measure of the difference between signal intensity and noise power spectral density (both at the same frequency) necessary for signal detection.

Echolocation masking is the reduction of the effective range over which an echolocating animal can hear the returning echoes of its echolocation signals.

Frequency Weighing Functions (Also referred to as Auditory Weighing): A method for quantitatively compensating for the fact that animal hearing is not equally sensitive at all frequencies within their hearing range. Auditory weighing functions transform sound measurements to compensate for these differential frequency responses for different species. These frequency weighting functions are commonly applied to evaluate the potential for the detection of a sound at a specific frequency and for assessing potential noise impacts.

Functional Hearing Groups: Groups of marine mammals defined by the generalized range of frequencies that the species in the group can hear. These groups were identified by Southall et al. (2007), who reviewed the available literature. Odontocetes fall within two functional hearing groups: mid-frequency cetaceans, with functional hearing between 150 Hz and 160 kHz, and high-frequency specialists, with functional hearing estimated between 200 Hz and 180 kHz. Beluga whales are considered mid-frequency cetaceans.

Hearing threshold (or auditory threshold) is measured by behavioral or electrophysiological responses and is the Sound Pressure Level (SPL) of the quietest sound audible.

Lombard effect refers to the tendency of a human or animal to raise the [source level \(SL\)](#) of their vocalizations in a noisy environment.

M-weighting is a [frequency weighting function](#) that accounts for the ways in which the relative hearing sensitivity of marine mammal species affects the hearing of sounds at different frequencies. It is an auditory weighting function proposed by Southall et al. (2007), and it is similar to the C-weighting function used for humans, but adjusted to better match the hearing ranges for various marine mammal groups (Houser et al. 2017). Limitations in utilizing M-weighting have become clear since, with no agreement on whether applying a weighting function to the received [SPL](#) improves the predictions of noise disturbance (see Houser et al. 2017 for review).

1/3rd octave bands (Hz) are divisions of sound frequencies into bands that reflect the size of auditory filters (critical bands) in the hearing of most land mammals and birds. An octave represents a doubling in frequency. The centre frequencies are the geometric means of the frequencies within bands. While 1/3 octave band are the most commonly reported noise metric, octave bands, other bands such as 1/6 and 1/12 octave bands are also used to describe sound impact in marine mammals, particularly toothed whales. [1/12th octave bands](#) are generally recommended for beluga whales.

1/12th octave bands (Hz) are divisions of sound frequencies into bands that *may* reflect the size of the auditory filters (critical bands) in the hearing of beluga whales, or the range of frequencies that their auditory system is sensitive to. Appendix 1 shows 1/12th octave bands and their center frequencies.

Peak Frequency is the frequency (Hz) at which the maximum power (or the highest amplitude) occurs within a signal (e.g. a vocalization or an echolocation click).

Percentiles are useful when measuring how sounds change with time. The Xth percentile is the sound level below which X% of the measurements occur.

Permanent Threshold Shifts (PTS) is a permanent elevation in hearing threshold, in other words, an unrecoverable reduction in hearing sensitivity. PTS is often the result of intense and/or repeated noise

exposures, in which case it can be referred to as noise-induced hearing loss or noise induced permanent threshold shifts (Southall et al., 2006).

Power Spectral Density (PSD) of a signal is a measure of the acoustic power present in that signal as a function of frequency. The units are dB re $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ and show the power of a sound distributed within 1 Hz frequency bins. PSD plots are used to compare sound sources and acoustic environments. PSD units, however, do not reflect how an animal or human perceives a sound.

Received level is an acoustic term indicating the amplitude of a sound measured or modelled at some distance greater than 1 m from the source of the sound. Often reported in units of dB re $1\mu\text{Pa}$.

Root Mean Square (RMS) indicates how sound pressure is averaged over a specified period. The units are dB re $1\mu\text{Pa}$. It is a useful metric for continuous sound, but must be interpreted cautiously if it used to describe a pulsed or acute sound.

Signal to noise ratio (SNR) is the ratio of the amplitude of a signal to the amplitude of the background noise. In general, a higher SNR make it easier for the signal to be detected.

Sound exposure levels (SEL, similar to Leq) units are dB re $1\mu\text{Pa}^2/\text{s}$ and are the measure of the total energy of a signal over a specified time, which at minimum is usually 1 second. SELs need to be specified over the time which the sound exposure is summed.

Sound pressure levels (SPL), also known as RMS SPL units, are dB re $1\mu\text{Pa}$ for underwater sound and describe the square root sound pressure over a specific period of time. The time period is variable and should be specified, but is typically 1 second.

Source level is an acoustic term indicating the amplitude of a sound measured or modelled at a standardised 1 m from the source of the sound. Usually reported in units of dB re $1\mu\text{Pa}$ at 1 m.

Temporary Threshold Shifts (TTS) is a reversible elevation in hearing threshold, or a non-permanent reduction in hearing sensitivity, commonly resulting from noise exposure.

References

- Au, W.W.L. 1993. The sonar of dolphins. Springer-Verlag. New York.
- Au, Whitlow W. L., Ralph H. Penner, and James Kadane. 1982. "Acoustic behavior of echolocating Atlantic bottlenose dolphins." *The Journal of the Acoustical Society of America* 71 (5): 1269–75. <https://doi.org/10.1121/1.387733>.
- Au, W.W.L., Carder, D.A., Penner, P.H., Scronce, B.L. 1985. "Demonstration of adaptation in beluga whale echolocation signals." *The Journal of the Acoustical Society of America* 77 (2): 726–730
- Booy, K V., V. Vergara and Lisa Losetto. 2019. Geographic variation in simple contact calls of Canadian beluga whales (*Delphinapterus leucas*). In "Acoustic Monitoring of Beluga Whales (*Delphinapterus leucas*): Spatio-Temporal Habitat Preference and Geographic Variation in Canadian Populations". M. Sc. Thesis. University of Manitoba.
- Blane, J. & Jackson, R. 1994. "The impact of ecotourism boats on the St. Lawrence beluga whales." *Environmental Conservation* 21:267-269.
- Buckstaff, Kara C. 2004. "Effects of watercraft noise on the acoustic behavior of bottlenose dolphins, *Tursiops truncatus*, in Sarasota Bay, Florida." *Marine Mammal Science* 20 (4): 709–25. <https://doi.org/10.1111/j.1748-7692.2004.tb01189.x>.
- Caron, L.M.J., and Sergeant, D.E. (1988). "Yearly variation in the frequency of passage of beluga whales (*Delphinapterus leucas*) at the mouth of the Saguenay River, Québec, over the past decade." *Naturaliste Canadien* 115(2): 111–116.
- Castellote, M., Leeney, R. H., O’Corry-Crowe, G., Lauhakangas, R., Kovacs, K. M., Lucey, W., Krasnova, V., Lydersen, C., Stafford, K.M., and Belikov, R. 2012. "Monitoring white whales (*Delphinapterus leucas*) with echolocation loggers," *Polar Biology*, 1–17.
- Castellote, M., T Aran Mooney, Lori Quakenbush, Roderick Hobbs, Caroline Goertz, and Eric Gaglione. 2014. "Baseline hearing abilities and variability in wild beluga whales (*Delphinapterus leucas*)." *The Journal of Experimental Biology* 217 (Pt 10): 1682–91. <https://doi.org/10.1242/jeb.093252>.
- Cosens, S. E. and L. P. Dueck. 1988. "Responses of migrating narwhal and beluga to icebreaker traffic at the Admiralty Inlet ice-edge, N. W. T. in 1986." Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, edited by W. M. Sackinger and M. O. Jeffries. Geophysical Institute, Univ. of Alaska, Fairbanks, pp. 39–54.
- Department of Fisheries and Oceans. 2017. "St.Lawrence Estuary Beluga. A science based review of recovery actions for three at-risk whale populations." <https://doi.org/10.1002/ejoc.201200111>.
- Erbe, C., 2000. Detection of whale calls in noise: performance comparison between a beluga whale, human listeners and a neural network. *Journal of the Acoustical Society of America* 108 (1), 297–303.
- Erbe, C. 2008. "Critical ratios of beluga whales (*Delphinapterus leucas*) and masked signal duration." *Journal of the Acoustical Society of America* 124: 2216-2223

- Erbe, C. and D M Farmer. 1998. "Masked hearing thresholds of a beluga whale (*Delphinapterus leucas*) in Icebreaker Noise." *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 45 (7): 1373–88.
- Erbe, C. and D M Farmer. 2000. "Zones of impact around icebreakers affecting beluga whales in the Beaufort Sea." *The Journal of the Acoustical Society of America* 108 (3 Pt 1): 1332–40. <https://doi.org/10.1121/1.1288938>.
- Erbe, C., C. Reichmuth, K. Cunningham, K. Lucke, and R. Dooling. 2016. "communication masking in marine mammals: a review and research strategy." *Marine Pollution Bulletin* 103 (1–2): 15–38. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.12.007>.
- Finneran, J. J., C. E. Schlundt, D. E. Carder, and S. H. Ridgway. 2002. "Auditory filter shapes for the bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*) and the white whale (*Delphinapterus leucas*) derived with notched noise." *Journal of the Acoustical Society of America* 112: 322–328.
- Finneran, J.J., Carder, D.A., Dear, R., Belting, T., McBain, J., Dalton, L. Ridgway, S.H. 2005. "Pure tone audiograms and possible aminoglycoside-induced hearing loss in belugas (*Delphinapterus leucas*)." *Journal of the Acoustical Society of America* 117: 3936–3943.
- Finley, K.J., G.W. Miller, R.A. Davis, and C.R. Greene. 1990. "Reactions of belugas, *Delphinapterus leucas*, and narwhals, *Monodon monoceros*, to ice-breaking ships in the Canadian High Arctic." *Canadian Bulletin of Fisheries and Aquatic Sciences* 224. <http://www.igoe.org/library/9443>.
- Gervaise, C., Simard, Y., Roy, N., Kinda, B., and Ménard, N. (2012). "Shipping noise in whale habitat: Characteristics, sources, budget, and impact on belugas in Saguenay–St Lawrence Marine Park hub," . *Journal of the Acoustical Society of America* **132**: 76. doi:10.1121/1.4728190
- Gomez, C., J.W. Lawson, A.J. Wright, A.D. Buren, D. Tollit, and V. Lesage. 2016. "A systematic review on the behavioural responses of wild marine mammals to noise: the disparity between science and policy." *Canadian Journal of Zoology* 94 (12): 801–19. <https://doi.org/10.1139/cjz-2016-0098>.
- Gosselin, J-F, M. O. Hammill, and V. Lesage. 2007. "Comparison of photographic and visual abundance indices of belugas in the St. Lawrence Estuary in 2003 and 2005." *Canadian Science Advisory Secretariat Research Document*. Vol. 2007/025.
- Hammill, M. O., L. N. Measures, J-F. Gosselin, and V. Lesage. 2007. "Lack of recovery in St Lawrence Estuary Beluga." *DFO Can. Sci. Advis. Sec.* Vol. 2007/026.
- Heise, K., Barrett-Lennard, L., Chapman, R. Dakin, T., Erbe, Ch., Hannay, D., Merchant, N. et al. 2017. "Proposed metrics for the management of underwater noise for southern resident killer whales." *Coastal Oceans Report Series*. Vancouver, British Columbia. <https://doi.org/10.25317/CORI20172>.
- Holt, M. M., Noren, D. P., Veirs, V., Emmons, C. K., and Veirs, S. 2009. "Speaking up: Killer whales (*Orcinus orca*) increase their call amplitude in response to vessel noise." *The Journal of the Acoustical Society of America* 125, EL27–32
- Holt, M. M., Noren, D. P. and Emmons, C. K. 2011. "Effects of noise levels and call types on the source levels of killer whale calls." *The Journal of the Acoustical Society of America* 130 (5): 3100–3106. <https://doi.org/10.1121/1.3641446>.
- Houser, D. S., Yost, W., Burkard, R., Finneran, J. J., Reichmuth, C. and Mulsow, J. 2017. "A review of the

- history, development and application of auditory weighting functions in humans and marine mammals." *The Journal of the Acoustical Society of America* 141 (3): 1371–1413.
<https://doi.org/10.1121/1.4976086>.
- Johnson, C.S., McManus, M.W., Skaar, D., 1989. "Masked tonal hearing thresholds in the beluga whale." *The Journal of the Acoustical Society of America* 85 (6): 2651–2654.
- Klishin, V.O., Popov, V.V., Supin, A.Y., 2000. Hearing capabilities of a beluga whale, *Delphinapterus leucas*. *Aquatic Mammals* 26,212–228.
- Lair, S., L. N. Measures, and D. Martineau. 2016. "Pathologic Findings and trends in mortality in the beluga (*Delphinapterus leucas*) population of the St Lawrence estuary, Quebec, Canada, from 1983 to 2012." *Veterinary Pathology* 53 (1): 22–36. <https://doi.org/10.1177/0300985815604726>.
- Lammers, Marc O., and Manuel Castellote. 2009. "The beluga whale produces two pulses to form its sonar signal." *Biology Letters* 5 (3): 297–301. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2008.0782>.
- Lesage, V., I. H. McQuinn, D. Carrier, J.F Gosselin, and A. Mosnier. 2014. "Exposure of the beluga (*Delphinapterus leucas*) to marine traffic under various scenarios of transit route diversion in the St. Lawrence Estuary." *DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2013/125. Iv + 28 P*, no. May.
- LGL Ltd. and Greeneridge Sciences. 1986. "Reactions of beluga whales and narwhals to ship traffic and ice- breaking along ice edges in the eastern Canadian High Arctic: 1982-1984." In *Environmental Studies* (No. 37). Ottawa, ON, Canada: Indian and Northern Affairs Canada. 301 pp.
- McQuinn, I. H., Véronique Lesage, Dominic Carrier, Geneviève Larrivée, Yves Samson, Sylvain Chartrand, Robert Michaud, and James Theriault. 2011. "A threatened beluga (*Delphinapterus leucas*) population in the traffic lane: vessel-generated noise characteristics of the Saguenay-St. Lawrence marine park, Canada." *Journal of the Acoustical Society of America* 130 (6): 3661–73.
<https://doi.org/10.1121/1.3658449>.
- Ménard, N., R. Michaud, C. Chion, and S. Turgeon. 2014. "Documentation of maritime traffic and navigational interactions with St. Lawrence Estuary Beluga (*Delphinaterus Leucas*) in Calving Areas Between 2003 and 2012," no. May.
- Merchant, N. D., P. Blondel, D. T. Dakin, and J. Dorocicz. 2012. "Averaging underwater noise levels for environmental assessment of shipping." *J Acoust Soc Am* 132 (4): EL343-9.
<https://doi.org/10.1121/1.4754429>.
- Merchant, N. D., Farcas, A., Powell, C. F. 2018. "Acoustic metric specification". Report of the EU INTERREG Joint Monitoring Programme for Ambient Noise North Sea (JOMOPANS).
- Merchant, N. D., Kurt M. Fristrup, Mark P. Johnson, Peter L. Tyack, Matthew J. Witt, Philippe Blondel, and Susan E. Parks. 2015. "Measuring acoustic habitats." *Methods in Ecology and Evolution* 6 (3): 257–65. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12330>.
- Merchant, Nathan D., Enrico Pirotta, Tim R. Barton, and Paul M. Thompson. 2014. "Monitoring ship noise to assess the impact of coastal developments on marine mammals." *Marine Pollution Bulletin* 78 (1–2): 85–95. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.10.058>.
- Mooney, T. Aran, Manuel Castellote, Ian T. Jones, Lori Quakenbush, Roderick Hobbs, Eric Gaglione, and Caroline Goertz. 2018a. "Local acoustic habitat relative to hearing sensitivities in beluga whales (*Delphinapterus leucas*)." *Journal of Ecoacoustics* 2: QZD9Z5.

<https://doi.org/10.22261/JEA.QZD9Z5>.

- Mooney, T.A., M. Castellote, L. Quakenbush, R. Hobbs, E. Gaglione, and C. Goertz. 2018b. "Variation in hearing within a wild population of beluga whales (*Delphinapterus leucas*)."
Journal of Experimental Biology 221 (9). <https://doi.org/10.1242/jeb.171959>.
- Morisaka, T., Masanori Shinohara, Fumio Nakahara, and Tomonari Akamatsu. 2005. "Effects of ambient noise on the whistles of Indo-Pacific bottlenose dolphin populations."
Journal of Mammalogy 86 (3): 541–46. [https://doi.org/10.1644/1545-1542\(2005\)86%255B541%253AEOANO](https://doi.org/10.1644/1545-1542(2005)86%255B541%253AEOANO).
- Mosnier, A, T. Doniol-Valcroze, J.F. Gosselin, L.N. Measures, and M.O. Hammill. 2015. "Insights into processes of population decline using an integrated population model: the case of the St. Lawrence estuary beluga (*Delphinapterus leucas*)."
Ecological Modelling 314 (October): 15–31.
<https://doi.org/10.1016/J.ECOLMODEL.2015.07.006>.
- Nachtigall, P.E., Mooney, T. A., Taylor, K. A. and Yuen, M. L. 2007. "Hearing and Auditory evoked potential methods applied to odontocete cetaceans."
Aquatic Mammals 33: 6–13.
- National Research Council (US) Committee on Low-Frequency Sound and Marine Mammals. 1994. "Low-frequency sound and marine mammals: current knowledge and research needs." Washington (DC): National Academies Press (US); A Review of Current Knowledge. Available from:
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK236693/>
- Pippard, L. 1985. "Patterns of movement of the St. Lawrence white whales (*Delphinapterus leucas*)."
Canadian wildlife service et Parcs Canada. Rapport technique. 225p.
- Popov, V.V., Supin, A.Ya. 1987. "Characteristics of hearing in the beluga *Delphinapterus leucas*."
Dokl. Biol. Sci. 294: 370–372.
- Rolland, R.M., Parks, S.E., Hunt, K.E., Castellote, M., Corkeron, P.J., Nowacek, D.P., Wasser, S.K. and Kraus, S.D. 2012. "Evidence that ship noise increases stress in right whales."
Proc. R. Soc. B Biol. Sci. 279: 2363–8.
- Roy, N., Simard, Y., and Gervaise, C. 2010. "3D tracking of foraging beluga from their clicks: Experiment from a coastal hydrophone array,"
Applied Acoustics 71: 1050–1056
- Scheifele, P M, S Andrew, R A Cooper, M Darre, F E Musiek, and L Max. 2005. "Indication of a Lombard vocal response in the St. Lawrence river beluga."
Journal of the Acoustical Society of America 117 (3): 1486–92. <https://doi.org/10.1121/1.1835508>.
- Schlundt, C. E., Finneran, J. J., Carder, D. A., & Ridgway, S. H. 2000. "Temporary shift in masked hearing thresholds (MTTS) of bottlenose dolphins and white whales after exposure to intense tones."
Journal of the Acoustical Society of America 107: 3496–3508.
- Simard, Y., R. Lepage, and C. Gervaise. 2010. "Anthropogenic sound exposure of marine mammals from seaways: estimates for Lower St. Lawrence Seaway, Eastern Canada."
Applied Acoustics 71 (11): 1093–98. <https://doi.org/10.1016/J.APACOUST.2010.05.012>.
- Southall, B L, Ann E Bowles, William T Ellison, James J Finneran, Roger L Gentry, Charles R Greene Jr, David Kastak, et al. 2007. "Marine mammal noise exposure criteria: initial scientific recommendations."
Aquatic Mammals 33 (4): 411–509.
<https://doi.org/10.1578/AM.33.4.2007.411>.

- Stewart BS, Evans WE, and F T Awbrey. 1982. "Effects of man-made waterborne noise on behavior of beluga whales (*Delphinapterus leucas*) in Bristol Bay, Alaska." in *HSWRI Technical Report 82-145. Report from Hubbs/Sea World Research Institute, San Diego, CA for the US National Oceanic and Atmospheric Administration* (Juneau, AK), p 29 pp.
- Tyack, Peter L. 2008. "Convergence of calls as animals form social bonds, active compensation for noisy communication channels, and the evolution of vocal learning in mammals." *Journal of Comparative Psychology* 122 (3): 319–31. <https://doi.org/10.1037/a0013087>.
- Veirs, Scott, Val Veirs, and Jason D. Wood. 2016. "Ship noise extends to frequencies used for echolocation by endangered killer whales." *PeerJ* 4: e1657. <https://doi.org/10.7717/peerj.1657>.
- Vergara, V., and MA Mikus. 2018. "Contact call diversity in natural beluga entrapments in an Arctic estuary: Preliminary evidence of vocal signatures in wild belugas." *Marine Mammal Science* 00(00): 1-32 <https://doi.org/10.1111/mms.12538>
- Vergara, V., J. Wood, A. Ames, MA. Mikus, V. Lesage and R. Michaud. 2019. "Mom, Can You Hear Me? Impacts of Underwater Noise on Mother-Calf Contact Calls in Endangered Belugas (*Delphinapterus leucas*)." Second International Beluga Symposium. Mystic Aquarium, Mystic, CT. March 12-14, 2019.
- Wartzok, D., Popper, A. N., Gordon, J., and Merrill, J. (2004). "Factors affecting the responses of marine mammals to acoustic disturbance." *Marine Technology Society Journal* 37: 6-15.
- Wieland, Monika, Albyn Jones, and Susan C. P. Renn. 2009. "Changing durations of southern resident killer whale (*Orcinus orca*) discrete calls between two periods spanning 28 years." *Marine Mammal Science* 26 (1): 195–201. <https://doi.org/10.1111/j.1748-7692.2009.00351.x>.
- Williams, R., A. J. Wright, E. Ashe, L. K. Blight, R. Bruintjes, R. Canessa, C. W. Clark, et al. 2015. "Impacts of anthropogenic noise on marine life: publication patterns, new discoveries, and future directions in research and management." *Ocean and Coastal Management* 115: 17–24. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.05.021>.
- Wright, A.J., Aguilar de Soto, N., Baldwin, A.L., Bateson, M., Beale, C., Clark, C., Deak, T., Edwards, E.F., Fernández, A., Godinho, A., Hatch, L., Kakuschke, A., Lusseau, D., Martineau, D., Romero, L.M., Weilgart, L., Wintle, B., Notarbartolo di Sciara, G. & Martin, V. 2007. "Do marine mammals experience stress related to anthropogenic noise?". *International Journal of Comparative Psychology* 20: 274–316.

Appendix 1: 1/12th octave bands from 500 Hz to 100 kHz

Lower band limit (Hz)	Center Freq (Hz)	Upper band limit (Hz)	Lower band limit (Hz)	Center Freq (Hz)	Upper band limit (Hz)	Lower band limit (Hz)	Center Freq (Hz)	Upper band limit (Hz)
473.2	487.0	501.2	5308.8	5463.9	5623.4	59566.2	61305.6	63095.7
501.2	515.8	530.9	5623.4	5787.6	5956.6	63095.7	64938.2	66834.4
530.9	546.4	562.3	5956.6	6130.6	6309.6	66834.4	68786.0	70794.6
562.3	578.8	595.7	6309.6	6493.8	6683.4	70794.6	72861.8	74989.4
595.7	613.1	631.0	6683.4	6878.6	7079.5	74989.4	77179.2	79432.8
631.0	649.4	668.3	7079.5	7286.2	7498.9	79432.8	81752.3	84139.5
668.3	687.9	707.9	7498.9	7717.9	7943.3	84139.5	86596.4	89125.1
707.9	728.6	749.9	7943.3	8175.2	8414.0	89125.1	91727.6	94406.1
749.9	771.8	794.3	8414.0	8659.6	8912.5	94406.1	97162.8	100000.0
794.3	817.5	841.4	8912.5	9172.8	9440.6			
841.4	866.0	891.3	9440.6	9716.3	10000.0			
891.3	917.3	944.1	10000.0	10292.0	10592.5			
944.1	971.6	1000.0	10592.5	10901.8	11220.2			
1000.0	1029.2	1059.3	11220.2	11547.8	11885.0			
1059.3	1090.2	1122.0	11885.0	12232.1	12589.3			
1122.0	1154.8	1188.5	12589.3	12956.9	13335.2			
1188.5	1223.2	1258.9	13335.2	13724.6	14125.4			
1258.9	1295.7	1333.5	14125.4	14537.8	14962.4			
1333.5	1372.5	1412.5	14962.4	15399.3	15848.9			
1412.5	1453.8	1496.2	15848.9	16311.7	16788.0			
1496.2	1539.9	1584.9	16788.0	17278.3	17782.8			
1584.9	1631.2	1678.8	17782.8	18302.1	18836.5			
1678.8	1727.8	1778.3	18836.5	19386.5	19952.6			
1778.3	1830.2	1883.6	19952.6	20535.3	21134.9			
1883.6	1938.7	1995.3	21134.9	21752.0	22387.2			
1995.3	2053.5	2113.5	22387.2	23040.9	23713.7			
2113.5	2175.2	2238.7	23713.7	24406.2	25118.9			
2238.7	2304.1	2371.4	25118.9	25852.3	26607.3			
2371.4	2440.6	2511.9	26607.3	27384.2	28183.8			
2511.9	2585.2	2660.7	28183.8	29006.8	29853.8			
2660.7	2738.4	2818.4	29853.8	30725.6	31622.8			
2818.4	2900.7	2985.4	31622.8	32546.2	33496.5			
2985.4	3072.6	3162.3	33496.5	34474.7	35481.3			
3162.3	3254.6	3349.7	35481.3	36517.4	37583.7			
3349.7	3447.5	3548.1	37583.7	38681.2	39810.7			
3548.1	3651.7	3758.4	39810.7	40973.2	42169.7			
3758.4	3868.1	3981.1	42169.7	43401.0	44668.4			
3981.1	4097.3	4217.0	44668.4	45972.7	47315.1			
4217.0	4340.1	4466.8	47315.1	48696.8	50118.7			
4466.8	4597.3	4731.5	50118.7	51582.2	53088.4			
4731.5	4869.7	5011.9	53088.4	54638.7	56234.1			
5011.9	5158.2	5308.8	56234.1	57876.2	59566.2			